

# บทที่ 2

## ระบบเปอร์ยูนิต

## Per Unit System

## ความสำคัญของระบบเปอร์ยูนิต

การคำนวณในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น สิ่งที่ต้องการทราบค่าจะประกอบด้วยปริมาณต่าง ๆ มากมายเช่น

- ค่า Impedance ( $\Omega$ )
- ค่า Current (A)
- ค่า Voltage (V)
- ค่า Complex Power (VA)

} หน่วยของปริมาณต่าง ๆ ไม่เหมือนกัน

## ความสำคัญของระบบเปอร์ยูนิต(ต่อ)

เพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณปริมาณดังกล่าวในระบบไฟฟ้า ระบบเปอร์ยูนิตจึงมีความสำคัญในการคำนวณปริมาณต่าง ๆ ดังนี้

- เพื่อความสะดวก เพิ่มประสิทธิภาพการคำนวณ
- ลดความซับซ้อนในการคำนวณสำหรับระบบขนาดใหญ่
- ลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณ(การเปลี่ยนหน่วย) สำหรับหม้อแปลงและเครื่องจักรกลขนาดใหญ่
- ไม่ต้องคิดผลกระทบของแรงดันทั้งสองของหม้อแปลง

## ความสำคัญของระบบเปอร์ยูนิต(ต่อ)

- เป็นการคำนวณปริมาณทางไฟฟ้าเป็นหน่วยเดียวกันทั้งหมด
- ต้องทำการกำหนดขอบเขต และปริมาณอ้างอิงของส่วนต่าง ๆ ของระบบ
- หน่วยเดิมที่ใช้ในปริมาณต่าง ๆ จะถูกอ้างอิงถึงเป็นหน่วย pu ทั้งหมด
- แทนปริมาณต่าง ๆ ในวงจร per unit ได้เป็นค่า อิมพีแดนซ์ แล้วทำการวิเคราะห์ต่อเฟส

## ข้อดีของการใช้ระบบเปอร์ยูนิต

- วิเคราะห์โครงข่ายได้ง่ายขึ้น เมื่อสามารถรวมอิมพีแดนซ์ในวงจรได้โดยตรง โดยไม่ต้องคำนึงถึงระดับแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน จากผลของการเปลี่ยนระดับแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้า
- ในระบบไฟฟ้า สามเฟสสมดุลย์ ที่ประกอบด้วยวงจร Star และ Delta เมื่อใช้ระบบ Per Unit แล้ว ตัวคูณเช่น  $\sqrt{3}$  และ 3 จะไม่มีผลต่อการคำนวณในระบบ หมายความว่าไม่ว่าจะคำนวณในแบบ 3 เฟส หรือ เฟสเดียว โดยใช้ per unit จะมีผลเท่ากัน

## ข้อดีของการใช้ระบบเปอร์ยูนิต(ต่อ)

- โดยปกติค่า อิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าทั้งหลาย ผู้ผลิตจะบอกมาในรูปของเปอร์เซ็นต์ ที่คิดเทียบจากแรงดันไฟฟ้าพิกัดอ้างอิง และกำลังไฟฟ้าพิกัดอ้างอิงด้าน Output ของตัวมันเอง (name plate rating) อยู่แล้ว ซึ่งก็คือค่า Per Unit นั้นเอง

## Single Line Diagram (แผนภูมิหนึ่งสาย)

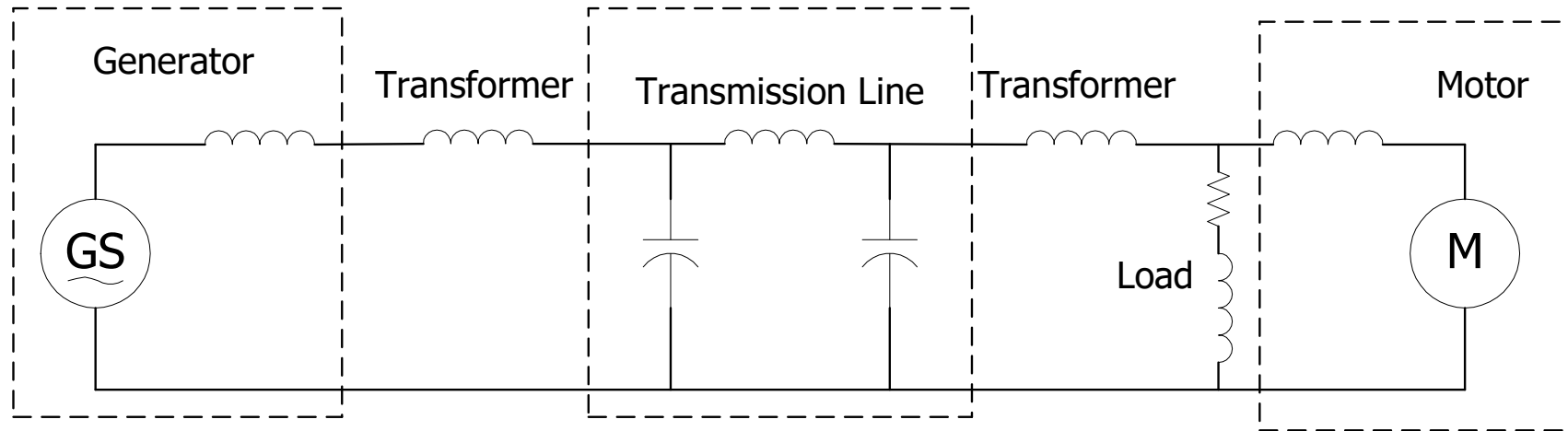
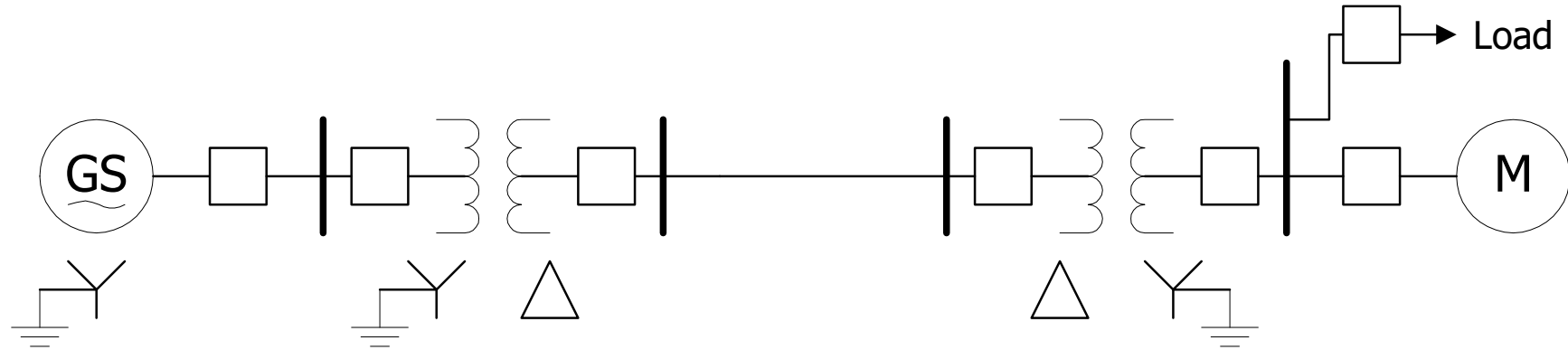
ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีวิธีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอยู่ 2 วิธีหลัก ๆ คือ

ระบบไฟฟ้า 1 เฟส

ระบบไฟฟ้า 3 เฟส

ในกรณีของระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล สามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ได้โดยการอ้างอิงมาจากวงจรไฟฟ้าเฟสเดียว โดยการเขียนเรียงกันไว้ในเส้นเดียวโดยที่ไม่มีนิวทรอล เรียกว่า แผนภูมิหนึ่งสาย หรือแผนภูมิเส้นเดียว

# Single Line Diagram (แผนภูมิหนึ่งสาย)





## ปริมาณอ้างอิงทางไฟฟ้าที่สำคัญในระบบเปอร์ยูนิต

ในการคำนวณระบบเปอร์ยูนิตจะมีปริมาณอ้างอิงที่สำคัญ 4 อย่างได้แก่

- กำลังไฟฟ้าอ้างอิง (Based Power, kVA หรือ MVA)
- แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (Based Voltage , kV)
- กระแสไฟฟ้าอ้างอิง (Based Current, kA หรือ A)
- อิมพีแดนซ์อ้างอิง (Based Impedance,  $\Omega$  )

## หลักในการเลือกปริมาณอ้างอิงทางไฟฟ้า

การคำนวณปริมาณทางไฟฟ้าในรูปเปอร์เซ็นต์จะเลือกปริมาณอ้างอิงเพียง 2 ปริมาณคือ กำลังไฟฟ้าอ้างอิงและ แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

- กำลังไฟฟ้าอ้างอิง นิยมเลือกที่พิกัดกำลังของอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ที่สุด

- แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง นิยมเลือกเป็นค่าพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อ  
ง่ายในการคำนวณ

## การคำนวณระบบเปอร์ยูนิต

- 1) เลือกปริมาณอ้างอิง (กำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า)
- 2) คำนวณปริมาณอ้างอิงที่เหลือ (กระแสไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์)
- 3) เปลี่ยนค่าในระบบให้อยู่ในรูปเปอร์ยูนิต
- 4) เขียนวงจรสมมูลที่อยู่ในรูป Impedance circuit diagram
- 5) คำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่ต้องการ(แรงดันคร่อมโหลด กระแสโหลด ฯลฯ)
- 6) เปลี่ยนปริมาณต่าง ๆ กลับเข้าเป็นหน่วย SI

## การคำนวณระบบเปอร์ยูนิต(ต่อ)

ถ้ากำหนดให้  $\Psi_{act}$  แทนปริมาณทางไฟฟ้าใด ๆ ในหน่วย SI หรือหน่วยปกติ

และ  $\Psi_{based}$  แทนปริมาณทางไฟฟ้าอ้างอิงใด ๆ ในหน่วย SI หรือหน่วยปกติ

สามารถคำนวณหาค่าเปอร์ยูนิตได้ดังนี้

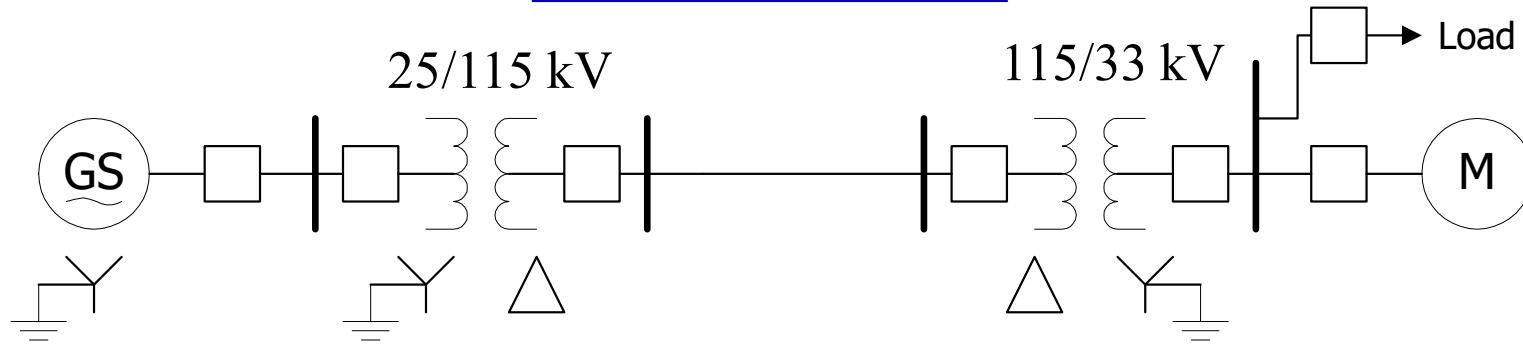
$$\Psi_{pu} = \frac{\Psi_{act}}{\Psi_{based}}$$

## ตัวอย่างที่ 2.1

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีขนาดแรงดันที่สถานีไฟฟ้าเป็น 230 kV ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังเขตอุตสาหกรรมนวนคร โดยวัดค่าแรงดันที่สถานีไฟฟ้านวนครเป็น 200 kV จงแปลงค่าแรงดันที่สถานีไฟฟ้านวนครในรูป per unit สามารถคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าในรูปเปอร์ยูนิตได้ดังนี้

$$V_{pu} = \frac{V_{act}}{V_{based}} \quad \rightarrow \quad V_{pu} = \frac{200kV}{230kV} = 0.87 pu$$

## ตัวอย่างที่ 2.2



กำหนดให้พิกัดอุปกรณ์แต่ละชนิดเป็นดังนี้

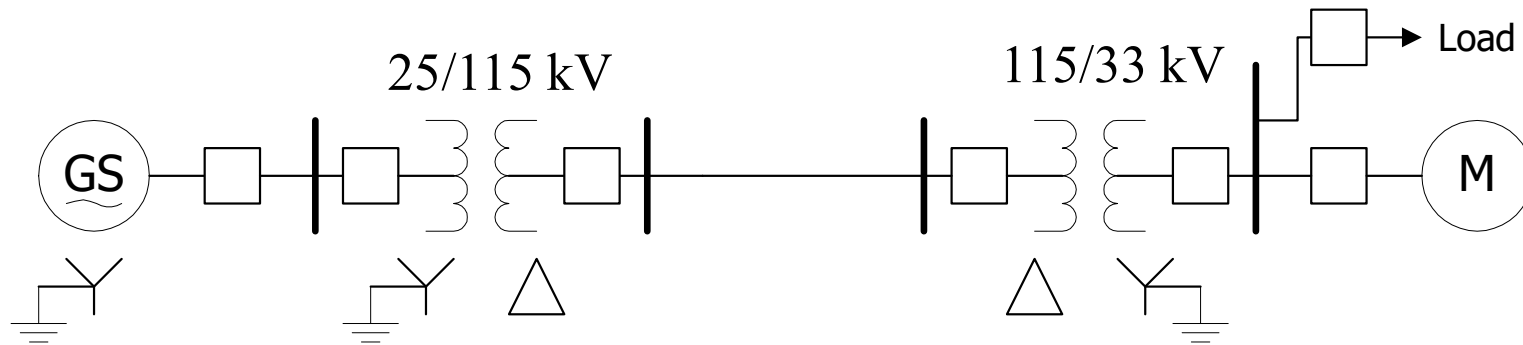
Generator : 50 MVA, 25 kV

Transformer1: 50 MVA, 25/115 kV , 15%

Transformer2: 50 MVA, 33/115 kV , 15%

จงคำนวณหาค่าลิ่งไฟฟ้าอ้างอิง, แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง, กระแสไฟฟ้าอ้างอิงและ  
อิมพีแดนซ์อ้างอิง

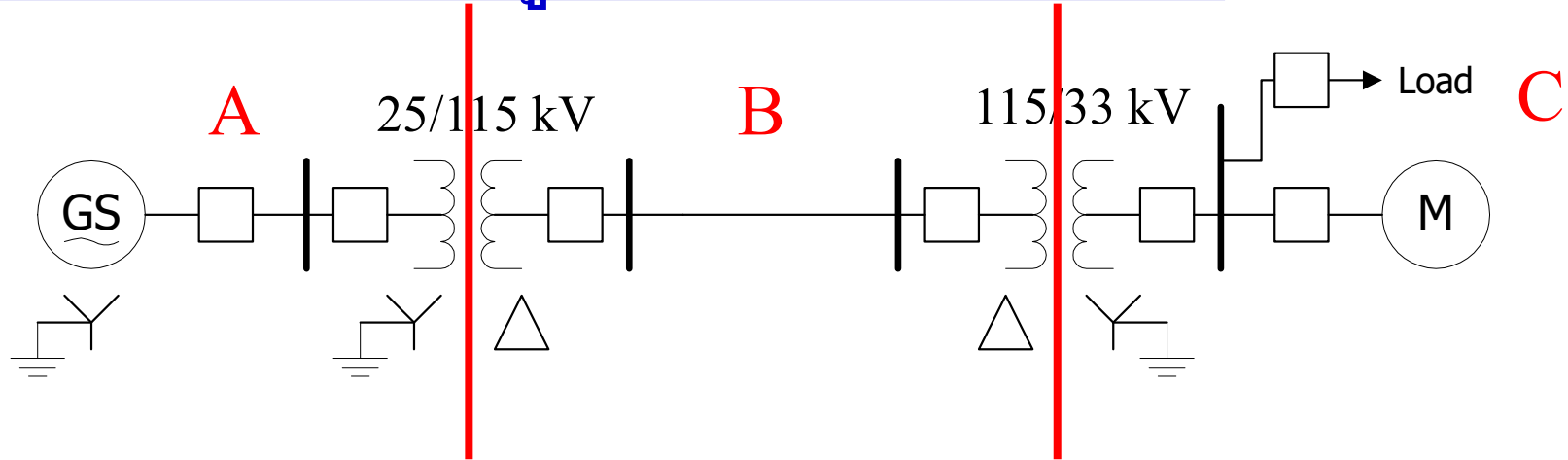
## การคำนวณระบบเปอร์ยูนิตในตัวอย่างที่ 2.2



**ขั้นตอนที่ 1** คือการแบ่งโซนและการเลือกปริมาณทางไฟฟ้าอ้างอิงในแต่ละโซน โดยทั่วไปจะเลือกเพียง 2 ปริมาณ ได้แก่

- กำลังไฟฟ้าปรากฏอ้างอิง(MVA)
- แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง(kV)

## การคำนวณระบบเปอร์ยูนิตในตัวอย่างที่ 2.2(ต่อ)



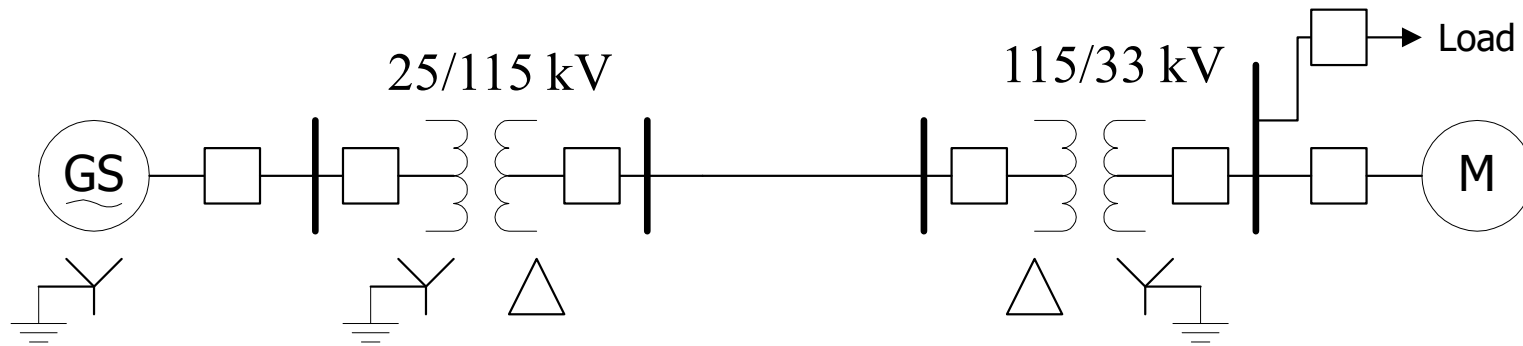
จากรูปสามารถแบ่งได้ 3 โซน คือ A B และ C (นิยมแบ่งโซนจากระดับแรงดันที่ต่างกัน)

และสามารถเลือกปริมาณไฟฟ้าอ้างอิงได้ดังนี้

- กำลังไฟฟ้าปรากฏอ้างอิง  $A = B = C = 50 \text{ MVA}$  (นิยมเลือกปริมาณที่มีขนาดมากที่สุด)
- แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง  $A = 25 \text{ kV}$  ,  $B = 115 \text{ kV}$  และ  $C = 33 \text{ kV}$  (นิยมเลือกให้เท่ากับพิกัดหม้อแปลง)



## การคำนวณระบบเปอร์ยูนิตในตัวอย่างที่ 2.2(ต่อ)

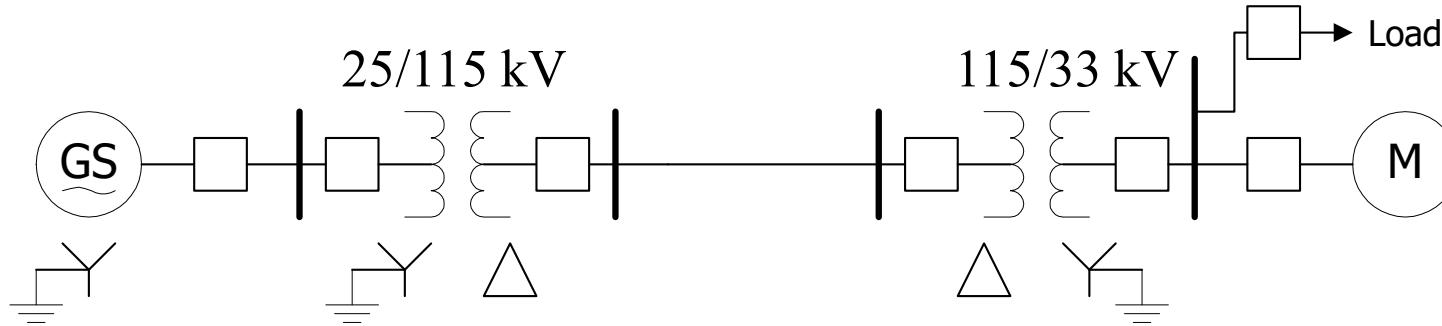


**ขั้นตอนที่ 2** คือคำนวณปริมาณทางไฟฟ้าอ้างอิงที่เหลือในแต่ละโซน

โดยทั่วไปจะคำนวณเพียง 2 ปริมาณ ได้แก่

- กระแสไฟฟ้าอ้างอิง(A, kA)
- อิมพีแดนซ์อ้างอิง (  $m\Omega$ ,  $\Omega$  )

## การคำนวณระบบเปอร์ยูนิตในตัวอย่างที่ 2.2(ต่อ)



กระแสไฟฟ้าอ้างอิง สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$I_B = \frac{S_{B1\phi}}{V_{BL-N}} = \frac{kVA_{B1\phi}}{kV_{B1\phi}}$$

อิมพีแดนซ์อ้างอิง สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Z_B = \frac{V_B^2}{VA_B} = \frac{(kV_B)^2 \times 1000}{kVA_B} = \frac{(kV_B)^2}{MVA_B}$$

## การคำนวณระบบเปอร์ยูนิตในตัวอย่างที่ 2.2(ต่อ)



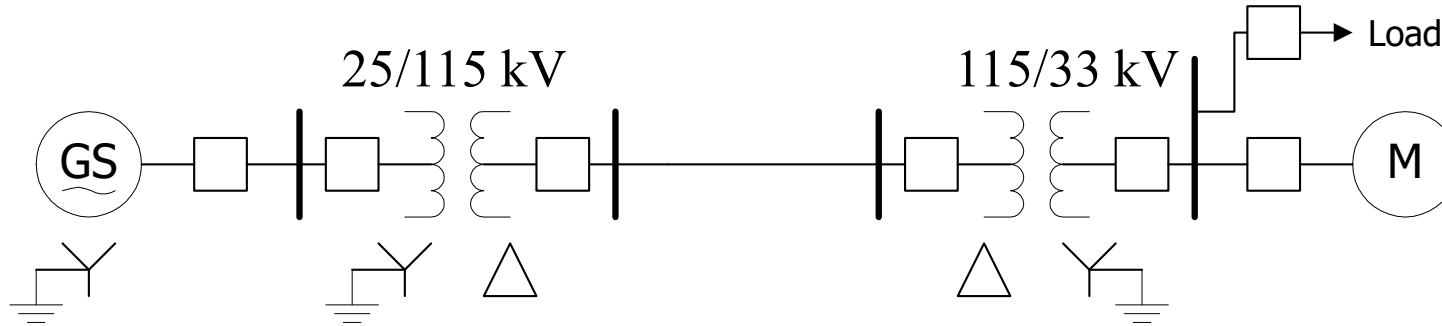
ดังนั้นตัวอย่างที่ 3.2 จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงในแต่ละโซนดังนี้

$$I_{b,A} = \frac{50MVA}{25kV} = 2kA$$

$$I_{b,B} = \frac{50MVA}{115kV} = 434.78A$$

$$I_{b,C} = \frac{50MVA}{33kV} = 1.52kA$$

## การคำนวณระบบเปอร์ยูนิตในตัวอย่างที่ 2.2(ต่อ)



และจะได้ค่าอิมพีแดนซ์อ้างอิงในแต่ละโซนดังนี้

$$Z_{b,A} = \frac{(25kV)^2}{50MVA} = 12.5\Omega$$

$$Z_{b,B} = \frac{(115kV)^2}{50MVA} = 264.5\Omega$$

$$Z_{b,C} = \frac{(33kV)^2}{50MVA} = 21.78\Omega$$

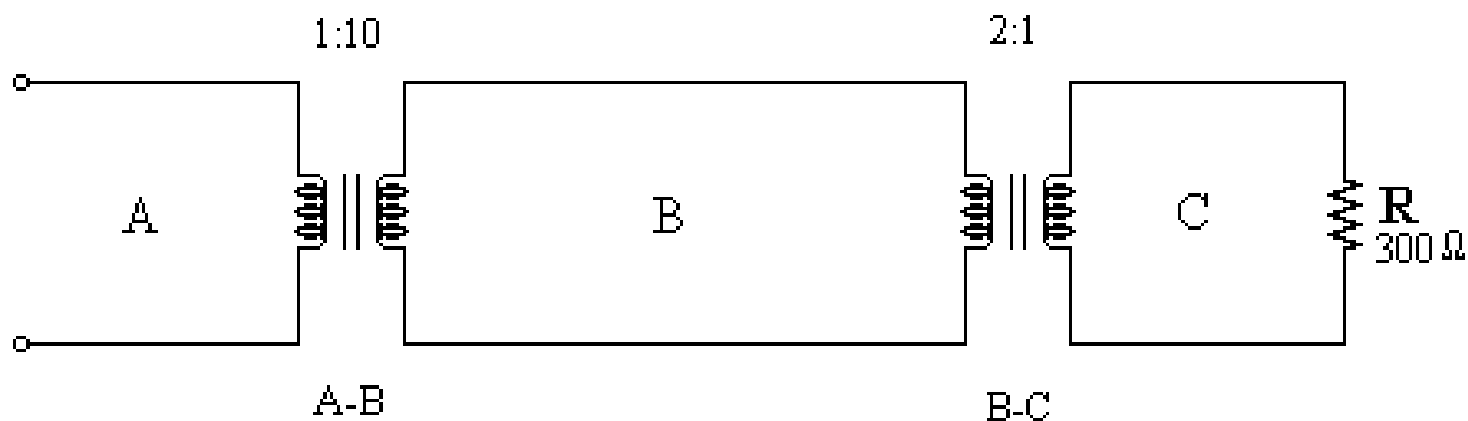
## การคำนวณระบบเปอร์ยูนิตสำหรับระบบไฟฟ้า 1 เฟส

ระบบไฟฟ้า 1 เฟส เป็นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาระบบการส่งจ่าย เป็น Line to Neutral เท่านั้น ดังนั้นในการคำนวณเปอร์ยูนิต ปริมาณไฟฟ้าอ้างอิงต่าง ๆ จะสามารถหาได้ดังต่อไปนี้

**กระแสไฟฟ้าอ้างอิง (Based Current)** 
$$I_B = \frac{S_{B1\phi}}{V_{BL-N}} = \frac{kVA_{B1\phi}}{kV_{B1\phi}}$$

**อิมพีแดนซ์อ้างอิง (Based Impedance)** 
$$Z_B = \frac{V_B^2}{VA_B} = \frac{(kV_B)^2}{MVA_B}$$

## ตัวอย่างที่ 2.3

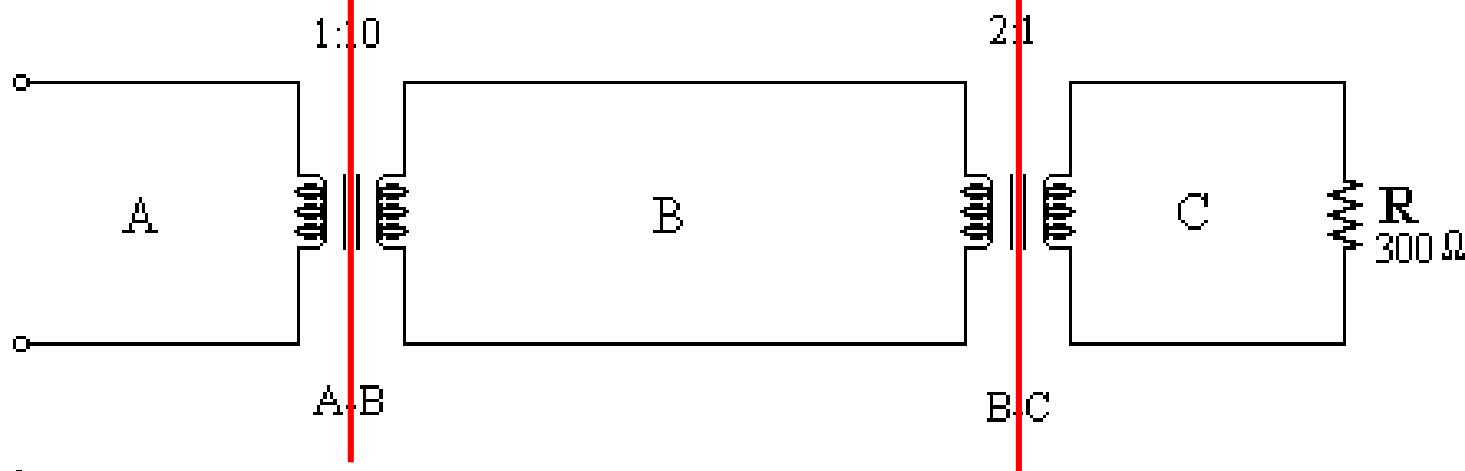


จากรูปกำหนดให้พิกัดอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นดังต่อไปนี้

- Transformer A-B : 9000 kVA, 13.8/138 kV, Leakage Reactance 10%
- Transformer B-C : 9000 kVA, 69/138 kV, Leakage Reactance 8%

จงคำนวณหา ค่าอิมพีแดนซ์ในระบบเปอรฺยูนิต และวาดแผนภาพอิมพีแดนซ์

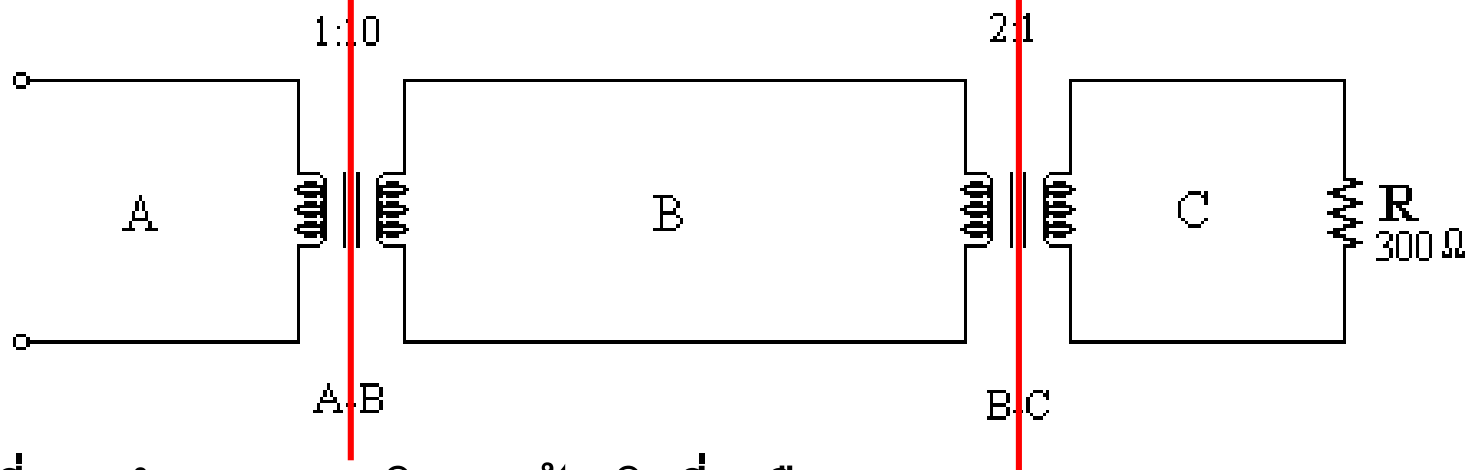
## ตัวอย่างที่ 2.3(ต่อ)



ขั้นตอนที่ 1 : แบ่งโซนและกำหนดปริมาณอ้างอิง

- แบ่งได้ 3 โซนคือ A B และ C
- กำลังไฟฟ้าอ้างอิงคือ 9000 kVA หรือ 9 MVA
- แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงคือ โซน A = 13.8 kV โซน B = 138 kV และ โซน C = 69 kV

## ตัวอย่างที่ 2.3(ต่อ)

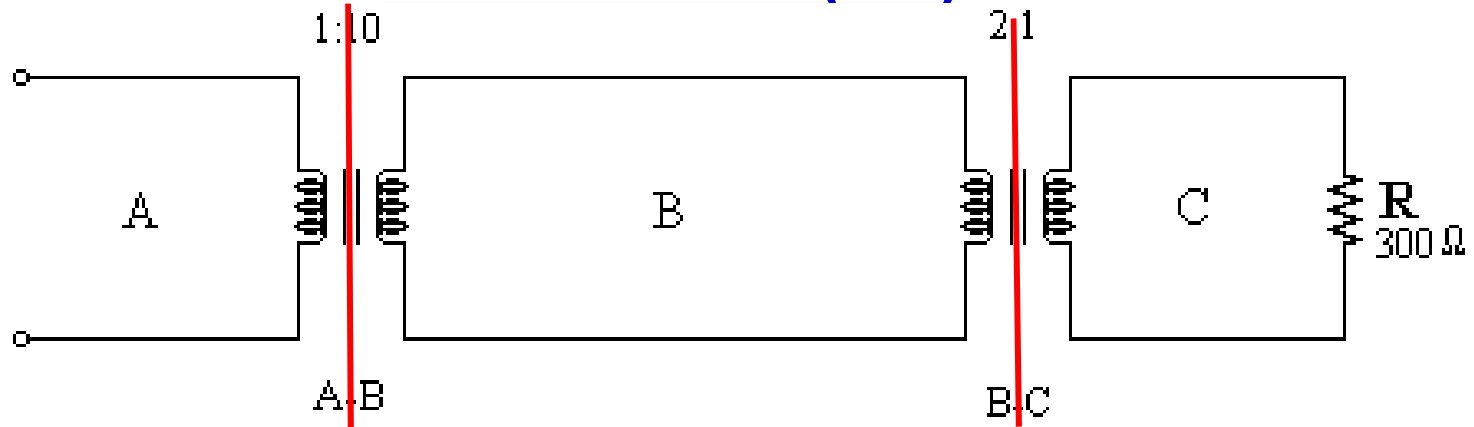


ขั้นตอนที่ 2 : คำนวณหาปริมาณอ้างอิงที่เหลือ

ปริมาณอ้างอิง	A	B	C
กระแสอ้างอิง	652.17 A	65.217 A	130.43 A
อิมพีแดนซ์อ้างอิง	21.16 Ohm	2116 Ohm	529 Ohm



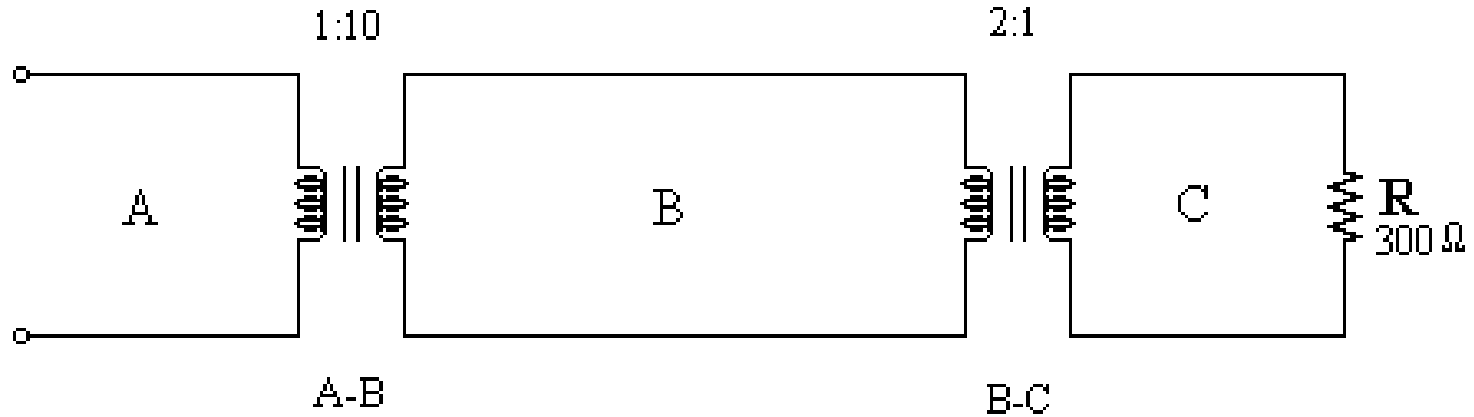
## ตัวอย่างที่ 2.3(ต่อ)



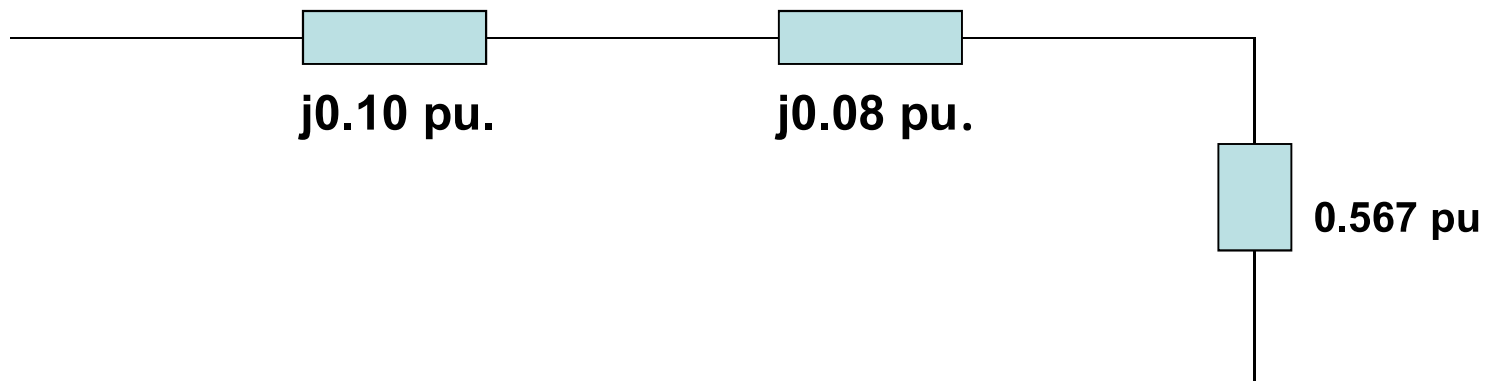
ขั้นตอนที่ 3 : เปลี่ยนค่าให้อยู่ในหน่วยเปอร์ยูนิต

โหลด R = 12 (โชน A)	โหลด R = 1200 (โชน B)	โหลด R = 300 (โชน C)
R <sub>pu</sub> = 0.567 pu	R <sub>pu</sub> = 0.567 pu	R <sub>pu</sub> = 0.567 pu
หม้อแปลง A-B		0.10 pu
หม้อแปลง B-C		0.08 pu

## ตัวอย่างที่ 2.3(ต่อ)



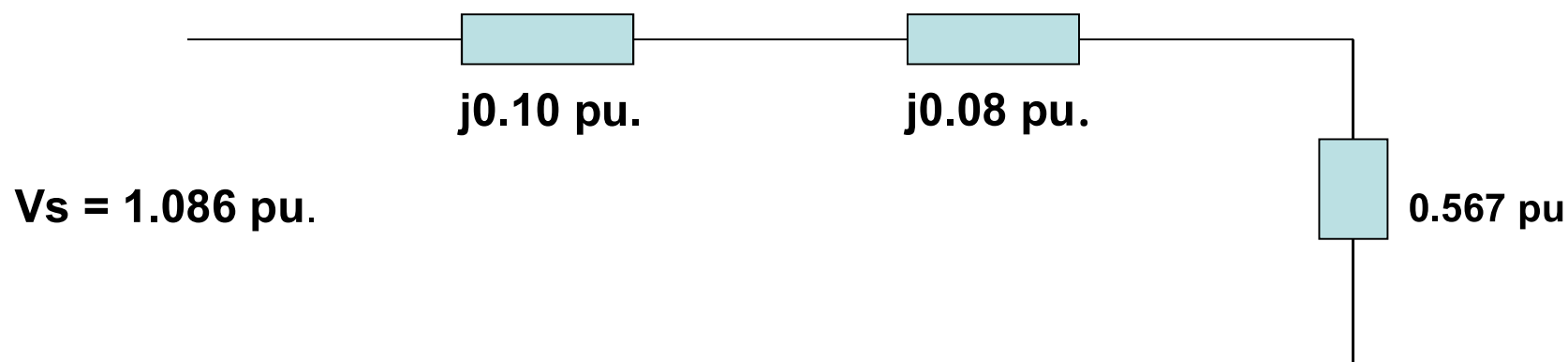
ขั้นตอนที่ 4 : เขียน Reactance Diagram เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป



## ตัวอย่างที่ 2.3(ต่อ)

ขั้นตอนที่ 5 : คำนวณค่าปริมาณต่าง ๆ

ถ้ากำหนดให้แรงดันที่จ่ายให้หม้อแปลง A-B ด้านแรงต่ำมีค่าเป็น 15 kV จงคำนวณหากระแสที่ไหลผ่านโหลด R จะได้ว่า



$$I = \frac{V_s}{j0.10 + j0.08 + 0.567} = \frac{1.086}{j0.10 + j0.08 + 0.567} = 1.826 \angle -17.61$$

## ตัวอย่างที่ 2.3(ต่อ)

ขั้นตอนที่ 6 : เปลี่ยนปริมาณต่าง ๆ เป็นหน่วย SI

เนื่องจากการระบุปริมาณทางไฟฟ้าจะนิยมบอกให้หน่วย SI ดังนั้นจะต้องทำการเปลี่ยนค่าในรูปเปอร์ยูนิตให้อยู่ในหน่วย SI โดยคำนวณได้ดังนี้

$$I_{act} = I_{pu} \times I_{based}$$

$$I_{act} = (1.826 \angle -17.62) \times (130.43)$$

$$I_{act} = 238.11 \angle -17.62 \text{ A}$$

ในระบบไฟฟ้านั้น พิกัดของปริมาณไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้กำหนดมาจากบริษัทผู้ผลิต ดังนั้นในการคำนวณระบบเปอร์ยูนิต ค่าที่อ้างอิงในระบบจะมีค่าที่ไม่เท่ากับค่าอ้างอิงของอุปกรณ์นั้น ๆ ทำให้การคำนวณระบบเปอร์ยูนิตจำเป็นต้องมีการคำนวณ Leakage Reactance ให้เท่ากับค่าอ้างอิงของระบบ เพื่อสามารถนำไปวิเคราะห์ทางไฟฟ้าต่อไปได้

## การเปลี่ยนค่าปริมาณอ้างอิง

อุปกรณ์ทางไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้า หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่า Leakage Reactance ที่บอกมาในรูปเปอร์เซ็นต์โดยเทียบจากค่าพิกัดของอุปกรณ์นั้นๆ นั่นคือ ค่าพิกัดของอุปกรณ์นั้นเป็นค่าอ้างอิงนั่นเอง

การเปลี่ยนค่าปริมาณอ้างอิงคือ การคำนวณ reactance ที่อยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์โดยอ้างอิงจากปริมาณอ้างอิงของระบบที่ไม่ใช่ค่าพิกัดอุปกรณ์นั้น ๆ นั่นเอง โดยมีหลักการเปลี่ยนค่าอ้างอิงดังนี้

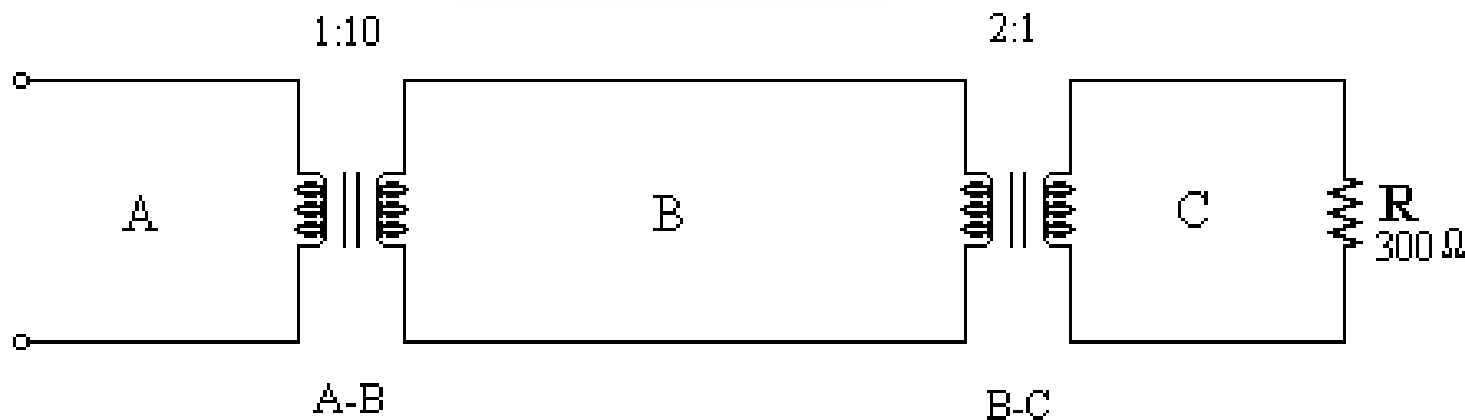
## การเปลี่ยนค่าปริมาณอ้างอิง(ต่อ)

- เปลี่ยนค่าเปอร์ยูนิตที่อ้างอิงจากพิกัดอุปกรณ์ให้อยู่ในหน่วย SI
- คำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์อ้างอิงของระบบ
- คำนวณค่าให้อยู่ในรูปเปอร์ยูนิตโดยอ้างอิงจากค่าอ้างอิงของระบบ

หรือสามารถคำนวณค่าเปอร์ยูนิตจากค่าอ้างอิงของระบบได้จาก

$$Z_{pu (new)} = Z_{pu (given)} \times \left( \frac{kV_{B (given)}}{kV_{B (new)}} \right)^2 \times \left( \frac{kVA_{B (new)}}{kVA_{B (given)}} \right)$$

## ตัวอย่างที่ 2.4



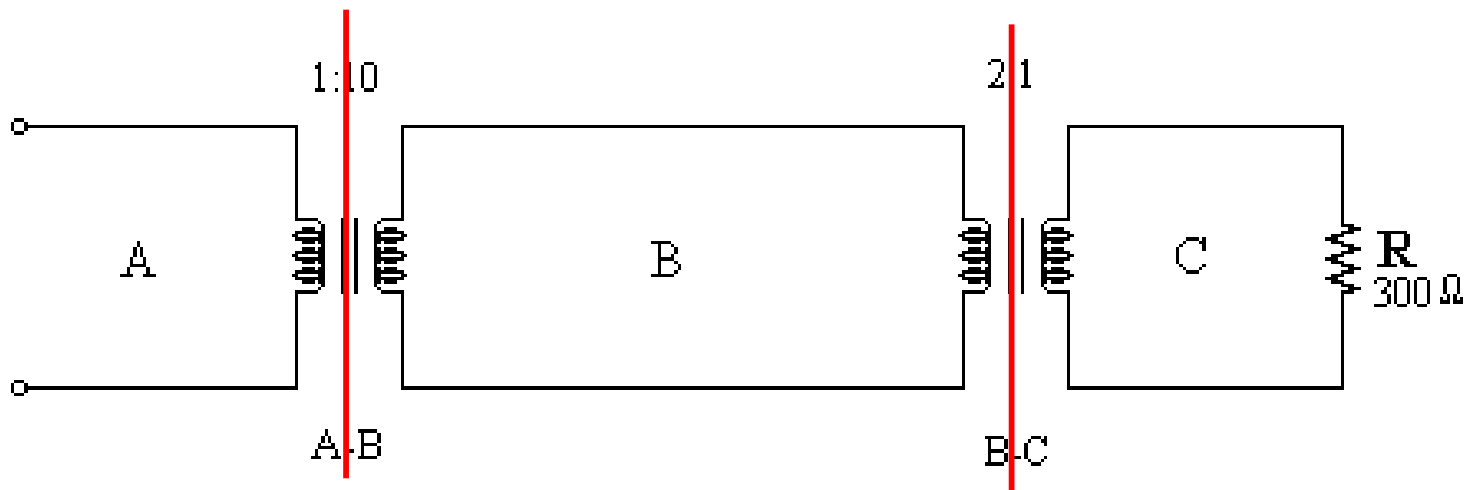
จากรูปกำหนดให้พิกัดอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นดังต่อไปนี้

- Transformer A-B : 9000 kVA, 13.8/138 kV, Leakage Reactance 10%
- Transformer B-C : 9000 kVA, 69/138 kV, Leakage Reactance 8%

จงคำนวณหา ค่าอิมพีแดนซ์ในระบบเปอร์ยูนิต และวาดแผนภาพอิมพีแดนซ์ โดยกำหนดให้ค่าปริมาณอ้างอิงเป็น 10 MVA, 12 kV ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



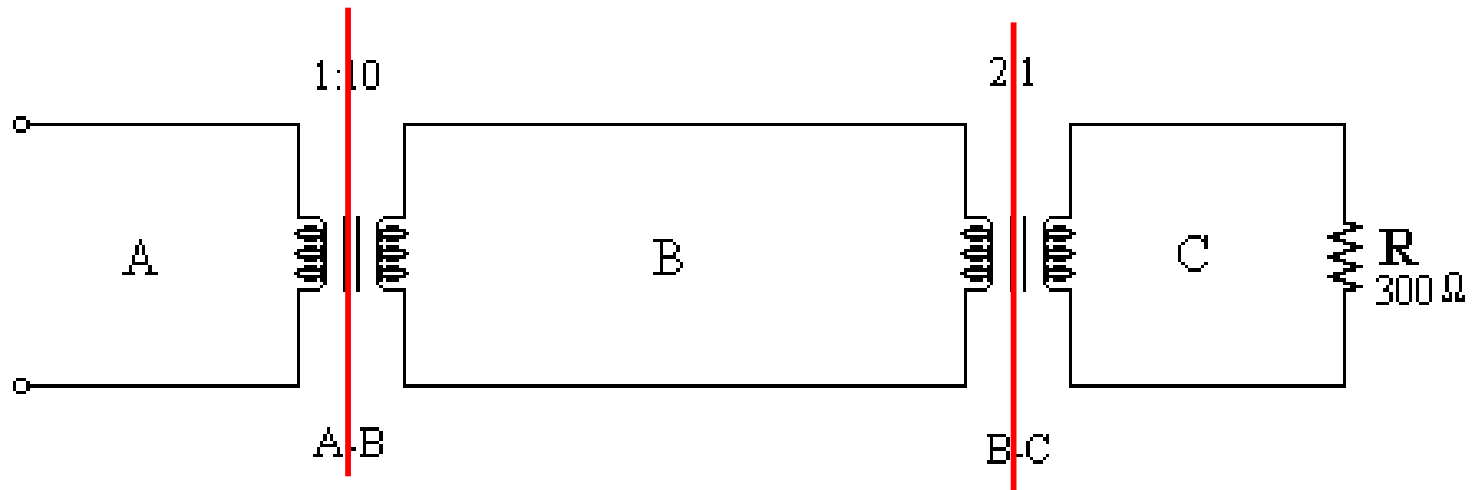
## ตัวอย่างที่ 2.4(ต่อ)



ขั้นตอนที่ 1 : แบ่งโซนและกำหนดปริมาณอ้างอิงของแต่ละโซน

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
กำลังไฟฟ้าอ้างอิง	10 MVA	10 MVA	10 MVA
แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง	12 kV	120 kV	60 kV

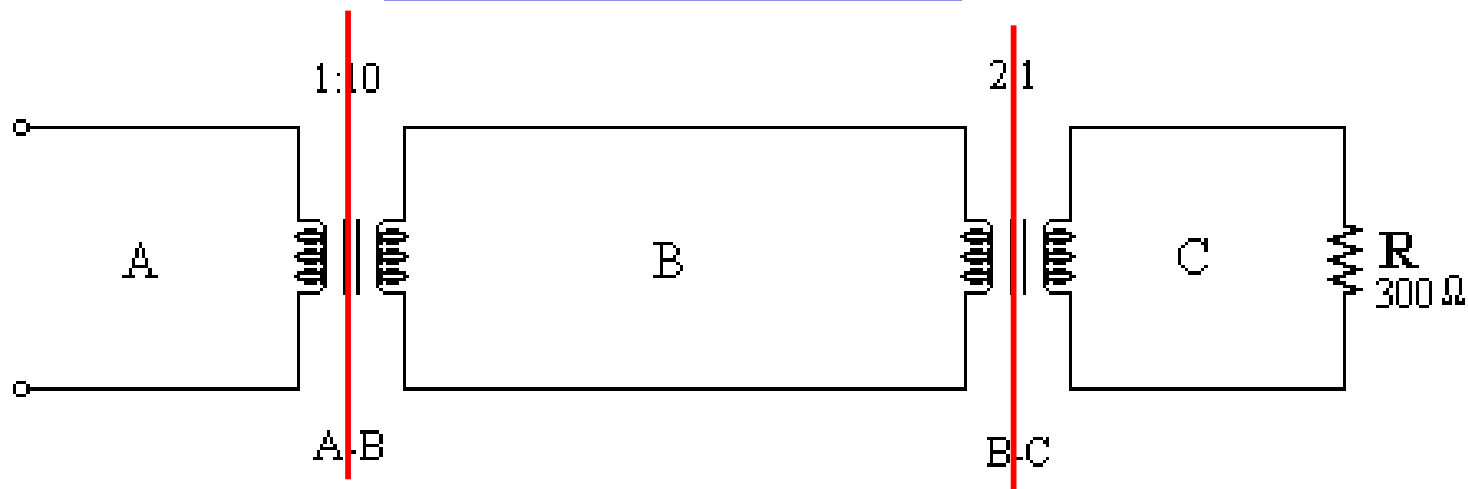
## ตัวอย่างที่ 2.4(ต่อ)



ขั้นตอนที่ 2 : คำนวณปริมาณอ้างอิงที่เหลือ

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
กระแสไฟฟ้าอ้างอิง	833.33 A	83.33 A	166.67 A
อิมพีแดนซ์อ้างอิง	14.4 Ohm	1440 Ohm	360 Ohm

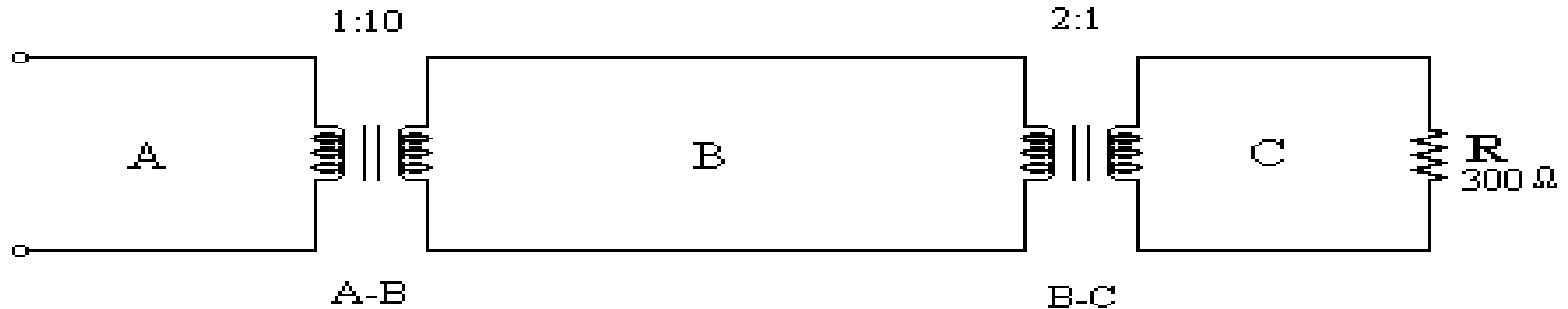
## ตัวอย่างที่ 2.4(ต่อ)



ขั้นตอนที่ 3 : เปลี่ยนค่าให้อยู่ในหน่วยเปอร์ยูนิต

	A (12)	B (1200)	C (300)
โหลด R	0.833 pu	0.833 pu	0.833 pu

## ตัวอย่างที่ 2.4(ต่อ)



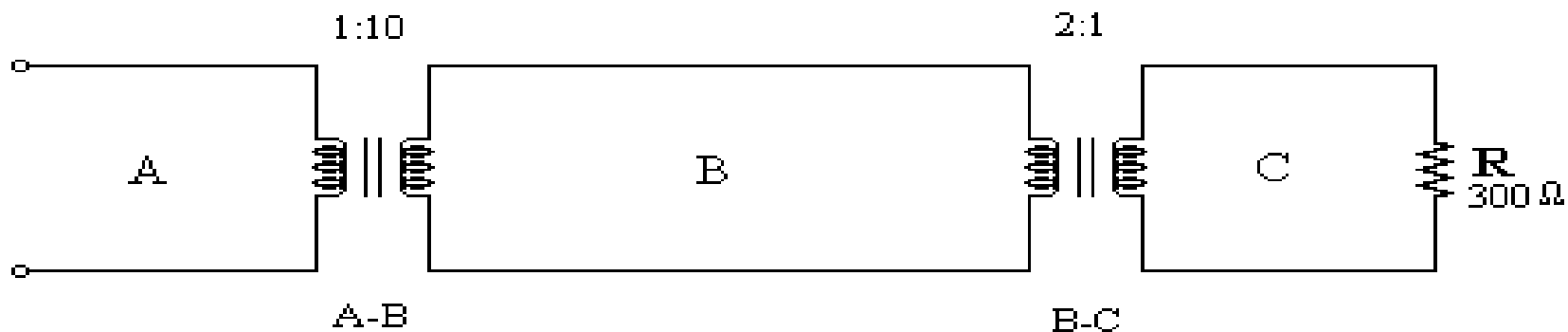
พิจารณาที่หม้อแปลง **A-B** จะได้ว่า

- Transformer A-B : 9000 kVA, 13.8/138 kV, Leakage Reactance 10%

คำนวณค่าอิมพีแดนซ์อ้างอิงจากพิกัดหม้อแปลงจะได้ 21.16 Ohm

$$Z_B = \frac{(13.8)^2}{9} = 21.16 \ \Omega$$

## ตัวอย่างที่ 2.4(ต่อ)



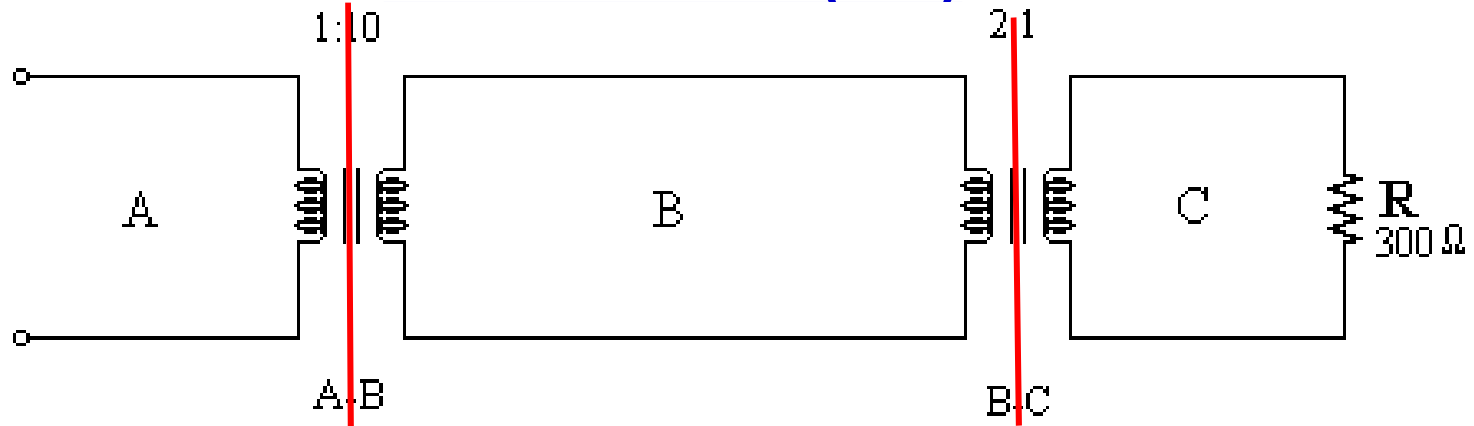
พิจารณาที่หม้อแปลง B-C จะได้ว่า

- Transformer B-C : 9000 kVA, 69/138 kV, Leakage Reactance 8%

คำนวณค่าอิมพีแดนซ์อ้างอิงจากพิกัดหม้อแปลงจะได้ 2116 Ohm

$$Z_B = \frac{(138)^2}{9} = 2116 \ \Omega$$

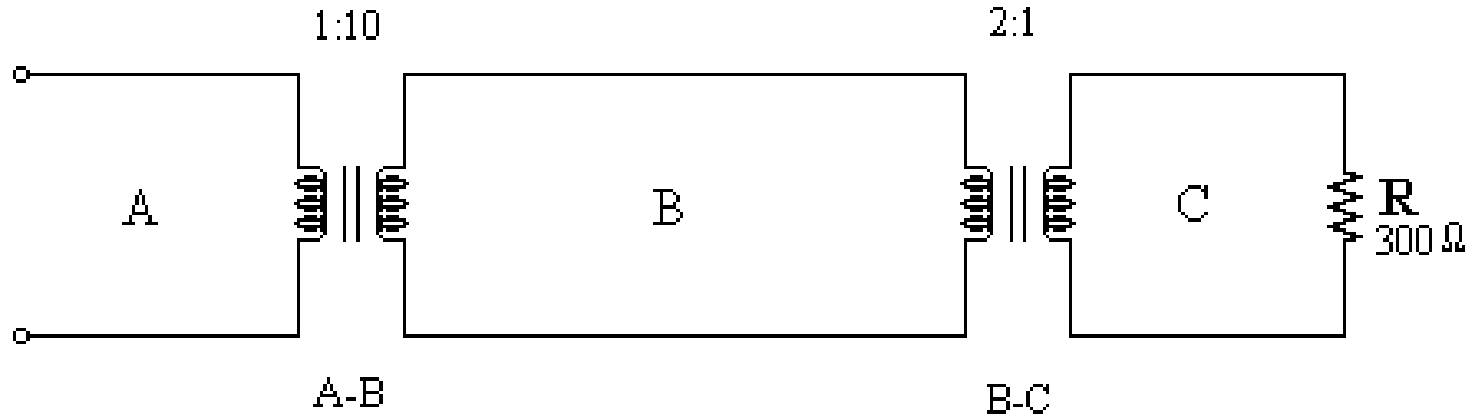
## ตัวอย่างที่ 2.4(ต่อ)



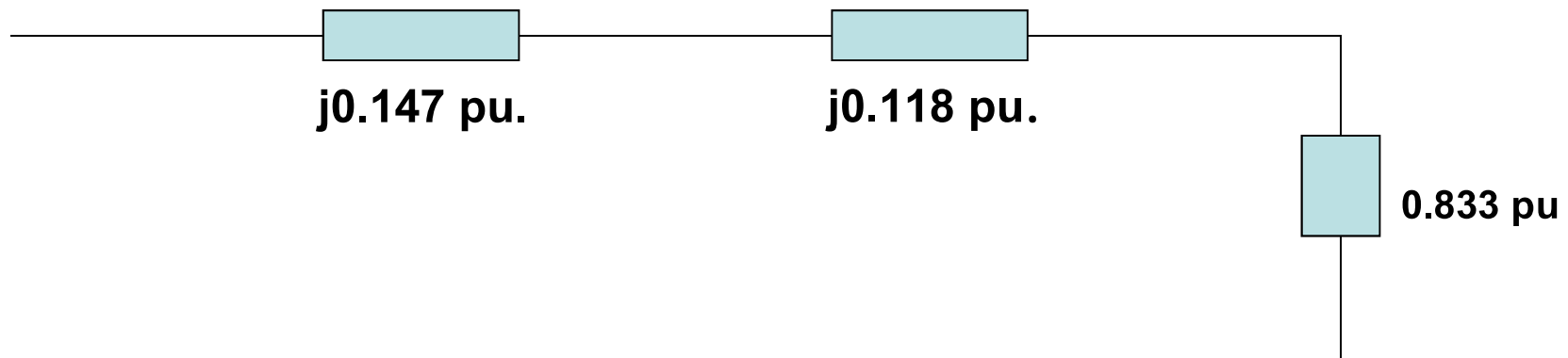
สามารถเปลี่ยนค่าให้อยู่ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ได้ดังนี้

โหลด $R = 12$ (โซน A)	โหลด $R = 1200$ (โซน B)	โหลด $R = 300$ (โซน C)
0.833 pu	0.833 pu	0.833 pu
หม้อแปลง A-B		0.147 pu
หม้อแปลง B-C		0.118 pu

## ตัวอย่างที่ 2.4(ต่อ)



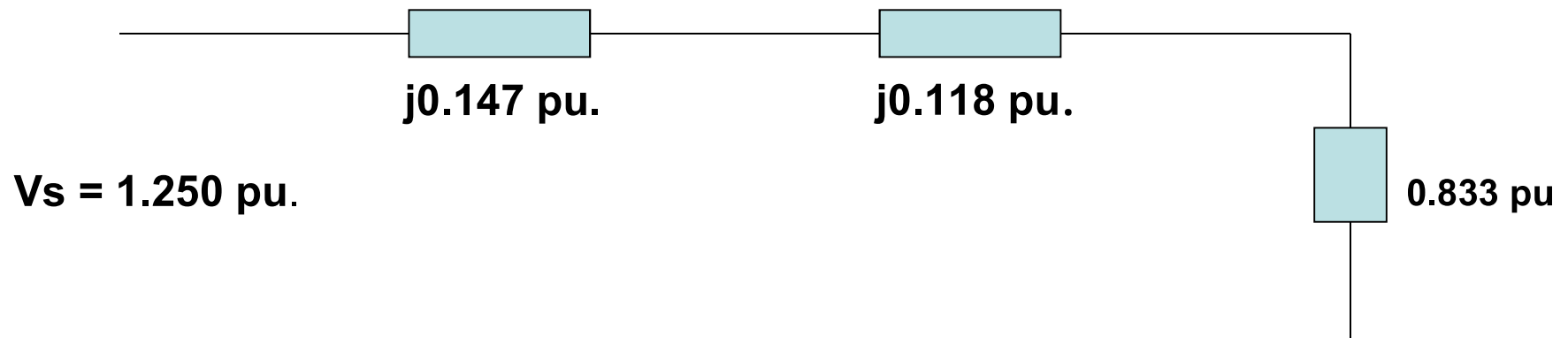
ขั้นตอนที่ 4 : เขียน Reactance Diagram เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป



## ตัวอย่างที่ 2.4(ต่อ)

ขั้นตอนที่ 5 : คำนวณค่าปริมาณต่าง ๆ

ถ้ากำหนดให้แรงดันที่จ่ายให้หม้อแปลง A-B ด้านแรงต่ำมีค่าเป็น 15 kV จงคำนวณหากระแสที่ไหลผ่านโหลด R จะได้ว่า



$$I = \frac{V_s}{j0.147 + j0.118 + 0.833} = \frac{1.25}{j0.147 + j0.118 + 0.833} = 1.430 \angle -17.65$$



## ตัวอย่างที่ 2.4(ต่อ)

ขั้นตอนที่ 6 : เปลี่ยนปริมาณต่าง ๆ เป็นหน่วย SI

เนื่องจากการระบุปริมาณทางไฟฟ้าจะนิยมบอกให้หน่วย SI ดังนั้นจะต้องทำการเปลี่ยนค่าในรูปเปอร์เซ็นต์ให้อยู่ในหน่วย SI โดยคำนวณได้ดังนี้

$$I_{act} = I_{pu} \times I_{based}$$

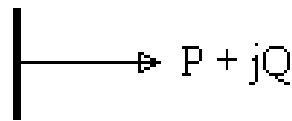
$$I_{act} = (1.430 \angle -17.65) \times (166.67)$$

$$I_{act} = 238.34 \angle -17.65 \text{ A}$$

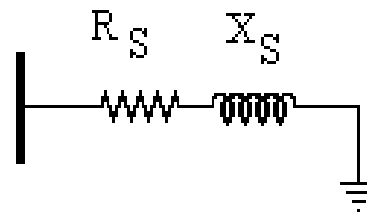
## การคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด

สำหรับโหลดในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถเขียนแทนได้หลายรูปแบบ เช่น

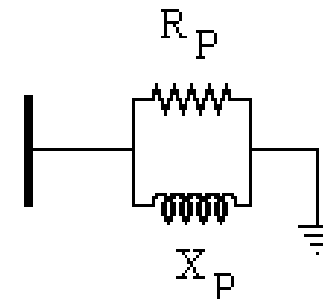
- แทนด้วยรูปของขนาดกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ
- แทนด้วยอิมพีแดนซ์อนุกรม
- แทนด้วยอิมพีแดนซ์ขนาน



(ก)



(ข)

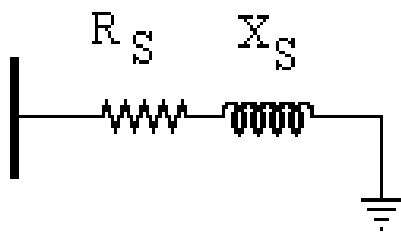


(ค)

## การคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด(ต่อ)

การคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดทำได้โดยการคำนวณจากค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือน

### อิมพีแดนซ์อนุกรม

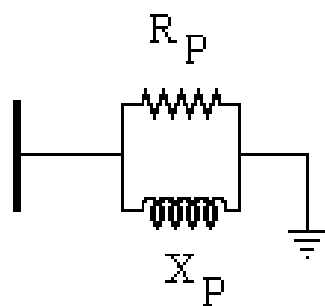


$$R_S = \frac{|V|^2 \times P}{P^2 + Q^2} \quad X_S = \frac{|V|^2 \times Q}{P^2 + Q^2}$$

$$Z_S = R_S + jX_S$$

## การคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด(ต่อ)

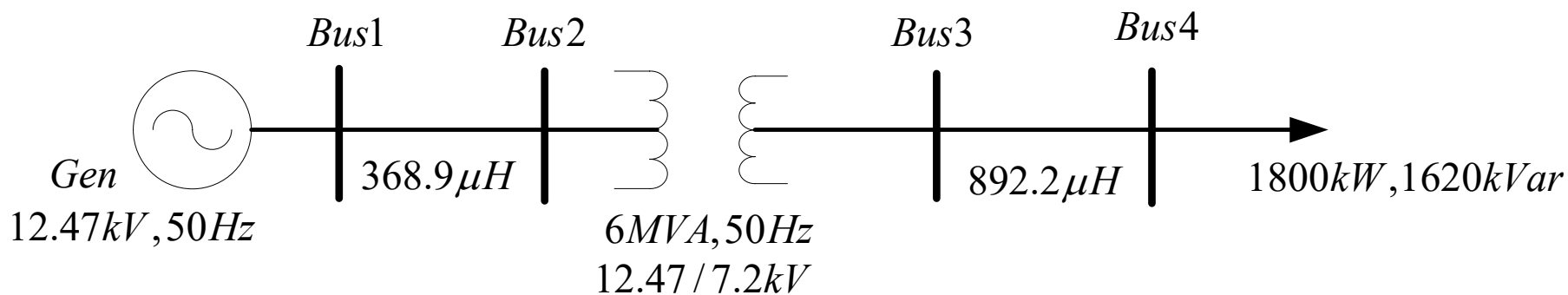
### อิมพีแดนซ์ขนาน



$$R_p = \frac{V^2}{P} \quad X_p = \frac{V^2}{Q}$$

$$Z_p = \frac{R_p \times jX_p}{R_p + jX_p}$$

## ตัวอย่างที่ 2.5

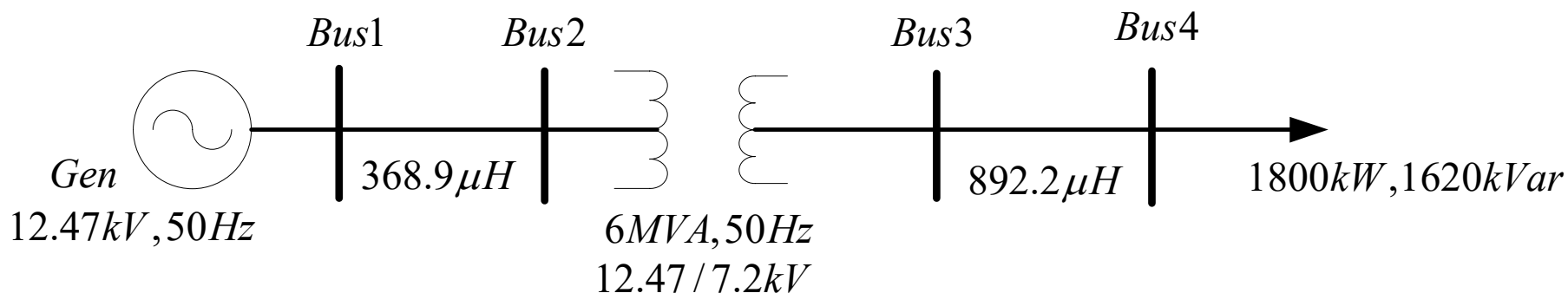


จากข้อมูลดังรูปจงเปลี่ยนโพลดให้อยู่ในรูปอิมพีแดนซ์อนุกรมและอิมพีแดนซ์ขนาน

- อิมพีแดนซ์อนุกรม

$$R_s = \frac{|V|^2 \times P}{P^2 + Q^2} = \frac{|7.2kV|^2 \times 1800kW}{(1800kW)^2 + (1620kVar)^2} = 15.912\Omega$$

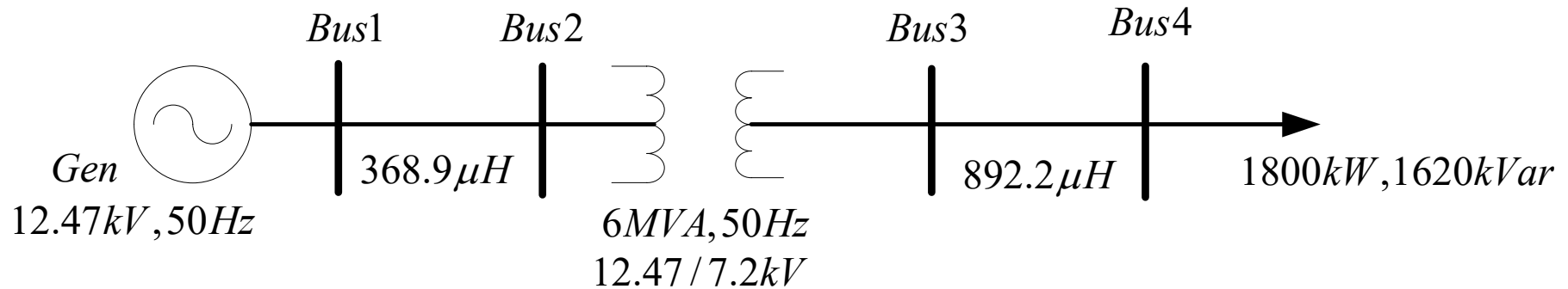
## ตัวอย่างที่ 2.5(ต่อ)



$$X_S = \frac{|V|^2 \times Q}{P^2 + Q^2} = \frac{|7.2kV|^2 \times 1620kVar}{(1800kW)^2 + (1620kVar)^2} = 14.320\Omega$$

$$Z_S = R_S + jX_S = 15.912 + j14.320\Omega$$

## ตัวอย่างที่ 2.5(ต่อ)



### - อิมพีแดนซ์ชานาน

$$R_p = \frac{|V|^2}{P} = \frac{|7.2kV|^2}{1800kW} = 28.80\Omega \quad X_p = \frac{|V|^2}{Q} = \frac{|7.2kV|^2}{1620kV} = 32.00\Omega$$

$$Z_p = \frac{R_p \times jX_p}{R_p + jX_p} = \frac{28.8 \times j32.0}{28.8 + j32.0} = 15.91 + j14.32\Omega$$

## การคำนวณระบบเปอร์ยูนิตสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส

การคำนวณระบบไฟฟ้าสามเฟสต้องมีความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย(Line to Line Voltage) และแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส (Phase Voltage) และความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในสาย (Line Current) และกระแสต่อเฟส (Phase Current) ของระบบไฟฟ้าแบบสามเฟสที่มีการต่อสตาร์ (Star Connection) และการต่อเดลต้า (Delta Connection) การคำนวณต่าง ๆ สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลนั้น ทั้งการคำนวณต่อเฟสและการคำนวณทั้งสามเฟสรวมกัน จะให้ผลการคำนวณที่เหมือนกัน



## การคิดต่อเฟส

การคิดต่อเฟส เป็นการคำนวณเปอร์ยูนิตโดยการคิดจากปริมาณอ้างอิงต่อเฟสทั้งหมด เช่นในระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏสามเฟสคือ ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของแต่ละเฟสรวมกันนั่นเอง

$$S_B = VA_{B(1\phi)} = \frac{VA_{B(3\phi)}}{3} = \frac{S_{B(3\phi)}}{3}$$

## การเชื่อมต่อแบบสตาร์และเดลต้า

ในระบบไฟฟ้าสามเฟสอุปกรณ์ต่าง ๆ จะมีการเชื่อมต่อกันแบบสตาร์หรือแบบเดลต้า ทั้งนี้ขึ้นกับการนำไปใช้งาน เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า รวมถึงการต่อโหลดต่าง ๆ ด้วย ความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงในการต่อแบบสตาร์และแบบเดลต้าเป็นดังนี้

- **ต่อแบบสตาร์ (Y Connection)**
- **ต่อแบบเดลต้า (Delta Connection)**

$$V_B = V_{LN} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}}$$

$$V_B = V_{LN} = V_{LL}$$

## ตัวอย่างที่ 2.6

นาย A วัดแรงดันระหว่างสายของระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อแบบสตาร์ได้ 108 kV ถ้านาย A นำค่าที่วัดได้มาเทียบกับมาตรฐานของแรงดันระหว่างสายของอุปกรณ์ชนิดหนึ่งซึ่งได้กำหนดเป็นค่าอ้างอิงคือ 120 kV จงคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันระหว่างสายที่นาย A วัด

$$V_{act} = \frac{108kV}{\sqrt{3}}$$

$$V_{based} = \frac{120kV}{\sqrt{3}}$$

$$V_{pu} = \frac{V_{act}}{V_{based}} = \frac{\frac{108kV}{\sqrt{3}}}{\frac{120kV}{\sqrt{3}}} = \frac{62.35}{69.28} = 0.9 pu$$

- ระบบสามเฟส แรงดันอ้างอิงจะกำหนดเป็นแรงดัน Line to Line
- ระบบสามเฟส กำลังไฟฟ้าอ้างอิงจะกำหนดเป็นค่ากำลังไฟฟ้าสามเฟส

## กระแสไฟฟ้าอ้างอิงในระบบสามเฟส

การคำนวณกระแสอ้างอิงในระบบสามเฟสจะกระทำคล้ายกับในระบบหนึ่งเฟสโดยพิจารณาดังต่อไปนี้

- กระแสอ้างอิงในระบบหนึ่งเฟส

$$I_B = \frac{S_{B1\phi}}{V_{B,L-N}} = \frac{kVA_{B1\phi}}{kV_{B,L-N}}$$

- กระแสอ้างอิงในระบบสามเฟสพิจารณาจากความสัมพันธ์ดังนี้

$$S_{B3\phi} = 3S_{B1\phi}$$

$$V_{B,L-L} = \sqrt{3}V_{B,L-N}$$

$$I_{B,Line} = \frac{S_{B1\phi}}{V_{B,L-N}} = \frac{\sqrt{3}S_{B3\phi}}{3V_{B,L-L}} = \frac{S_{B3\phi}}{\sqrt{3}V_{B,L-L}}$$

## อิมพีแดนซ์อ้างอิงในระบบสามเฟส

สำหรับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสามเฟสนั้น ค่าอ้างอิงจะขึ้นอยู่กับ การต่อวงจรว่าเป็นแบบสตาร์หรือแบบเดลต้า โดยจะสรุปได้ดังนี้

- ต่อแบบสตาร์

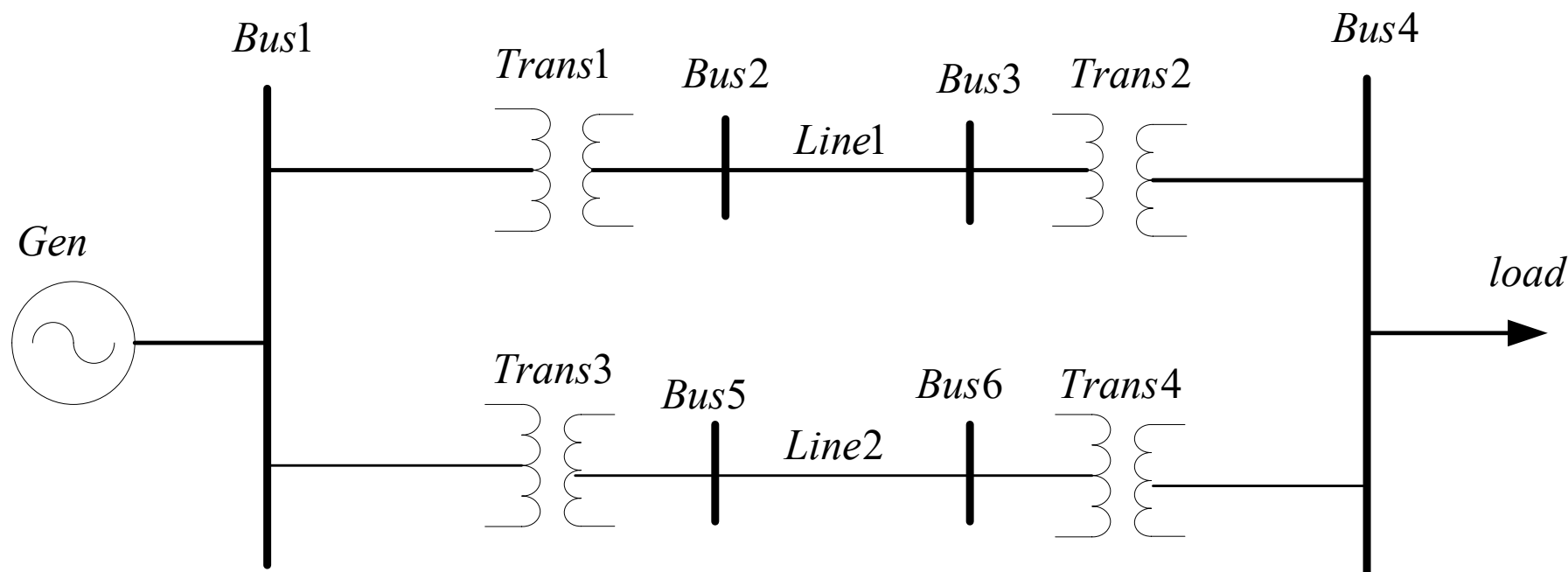
$$Z_{B(Y)} = \frac{|V_{B,L-N}|^2}{S_{B(1\phi)}} = \frac{|V_{B,L-L} / \sqrt{3}|^2}{S_{B(3\phi)} / 3} = \frac{|V_{B,L-L}|^2}{S_{B(3\phi)}}$$

- ต่อแบบเดลต้า

$$Z_{B(\Delta)} = 3Z_{B(Y)} \quad Z_{pu(\Delta)} = 3Z_{pu(Y)}$$

## ตัวอย่างที่ 2.7

The One line diagram of a three phase power system. Select a common based of 100 MVA and 22 kV on the Generator side

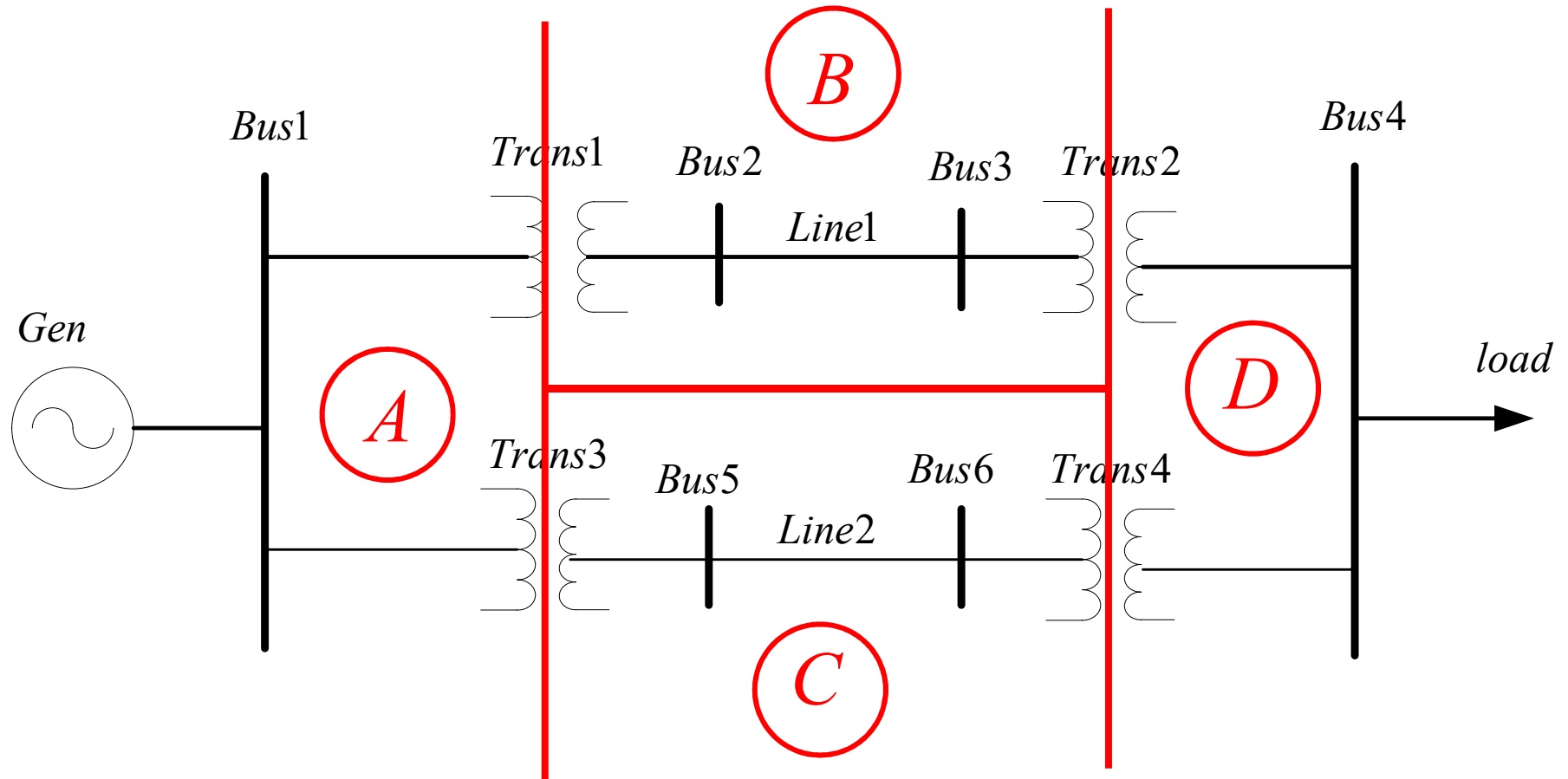


## ตัวอย่างที่ 2.7(ต่อ)

- Generator: 90 MVA, 22kV, Leakage Reactance = 18%
- Transformer1: 50 MVA, 22/220kV, Leakage Reactance = 10%
- Transformer2: 40 MVA, 11/220kV, Leakage Reactance = 6%
- Transformer3: 40 MVA, 22/110kV, Leakage Reactance = 6.4%
- Transformer4: 40 MVA, 11/110kV, Leakage Reactance = 8%
- Reactance per Phase line 1 = 48.4  $\Omega$
- Reactance per Phase line 2 = 65.4  $\Omega$
- Load bus 4 absorbs 57MVA, 0.6 power factor lagging at 10.45kV

Find the Load current

ตัวอย่างที่ 2.7(ต่อ)





## ตัวอย่างที่ 2.7(ต่อ)

### ขั้นตอนที่ 1 : แบ่งโซน และกำหนดปริมาณอ้างอิง

	โซน A	โซน B	โซน C	โซน D
กำลังไฟฟ้าอ้างอิง (MVA)	100	100	100	100
แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง(kV)	22	220	110	11

### ขั้นตอนที่ 2 : คำนวณปริมาณอ้างอิงที่เหลือ

	โซน A	โซน B	โซน C	โซน D
กระแสไฟฟ้าอ้างอิง (A)	2624.320	262.432	524.864	5248.640
อิมพีแดนซ์อ้างอิง( $\Omega$ )	4.84	484	121	1.21

## ตัวอย่างที่ 2.7(ต่อ)

ขั้นตอนที่ 3 : เปลี่ยนค่าให้อยู่ในหน่วยเปอร์ยูนิต

	โซน A	โซน B	โซน C	โซน D
<b>Generator</b>	0.2 pu	-	-	-
<b>Transformer 1</b>	0.2 pu	0.2 pu	-	-
<b>Transformer 2</b>	-	0.15 pu	-	0.15 pu
<b>Transformer 3</b>	0.16 pu	-	0.16 pu	-
<b>Transformer 4</b>	-	-	0.2 pu	0.2 pu
<b>Line 1</b>	-	0.1 pu	-	-
<b>Line 2</b>	-	-	0.541 pu	-

## ตัวอย่างที่ 2.7(ต่อ)

พิจารณาที่โหลด : 57 MVA, 0.6 power factor lagging, 10.45 kV

กำหนดให้โหลดเป็นค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมจะได้ว่า

$$S = 57 \angle \cos^{-1} 0.6 \text{ MVA} = 34.2 + j45.6 \text{ MVA}$$

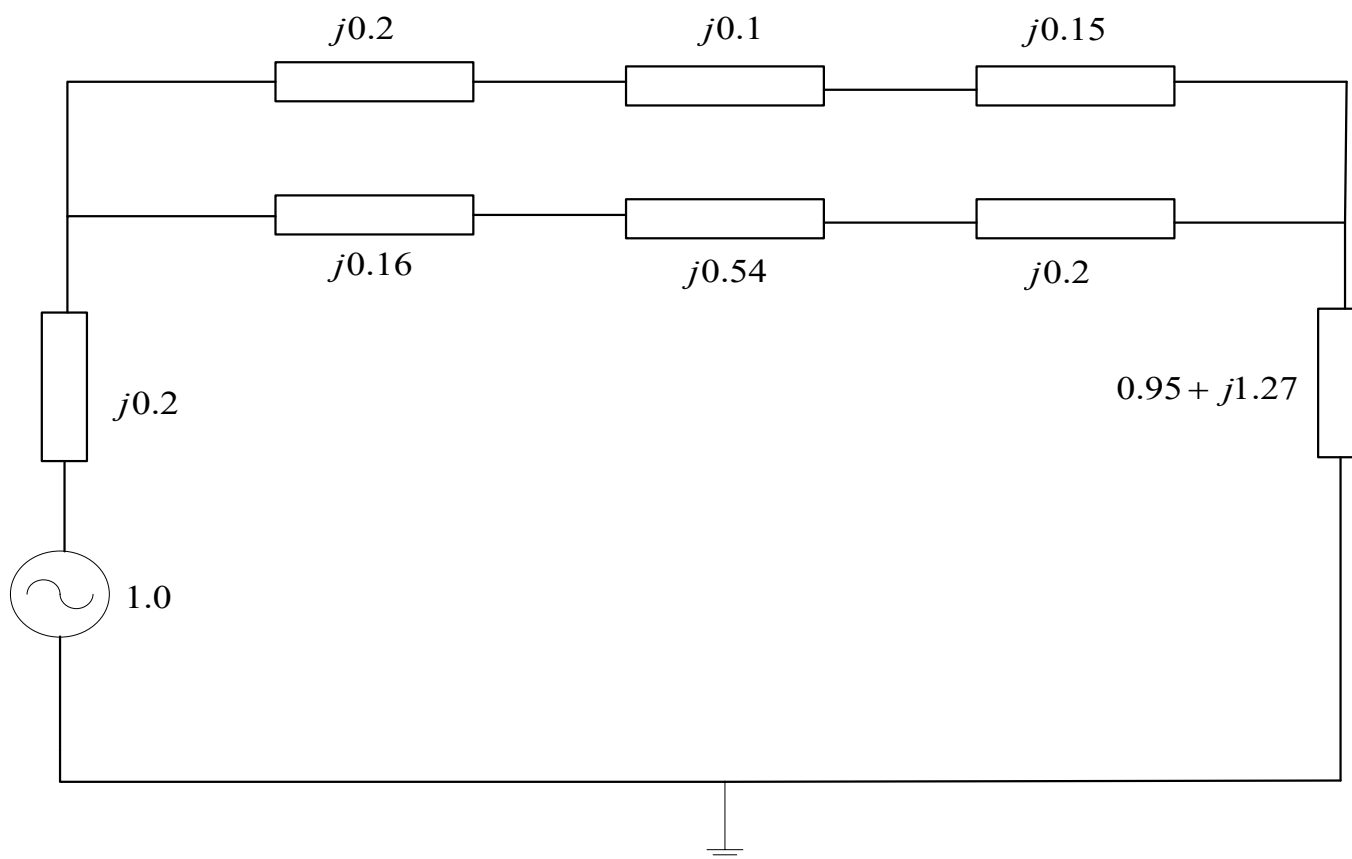
$$R_s = \frac{|V|^2 \times P}{P^2 + Q^2} = \frac{|10.45 \text{ kV}|^2 \times 34.2 \text{ MW}}{(34.2 \text{ MW})^2 + (45.6 \text{ MVar})^2} = 1.150 \Omega$$

$$X_s = \frac{|V|^2 \times Q}{P^2 + Q^2} = \frac{|10.45 \text{ kV}|^2 \times 45.6 \text{ MVar}}{(34.2 \text{ MW})^2 + (45.6 \text{ MVar})^2} = 1.533 \Omega$$

$$Z_{load, pu} = \frac{1.150 + j1.533}{1.21} = 0.95 + j1.27 \text{ pu}$$

## ตัวอย่างที่ 2.7(ต่อ)

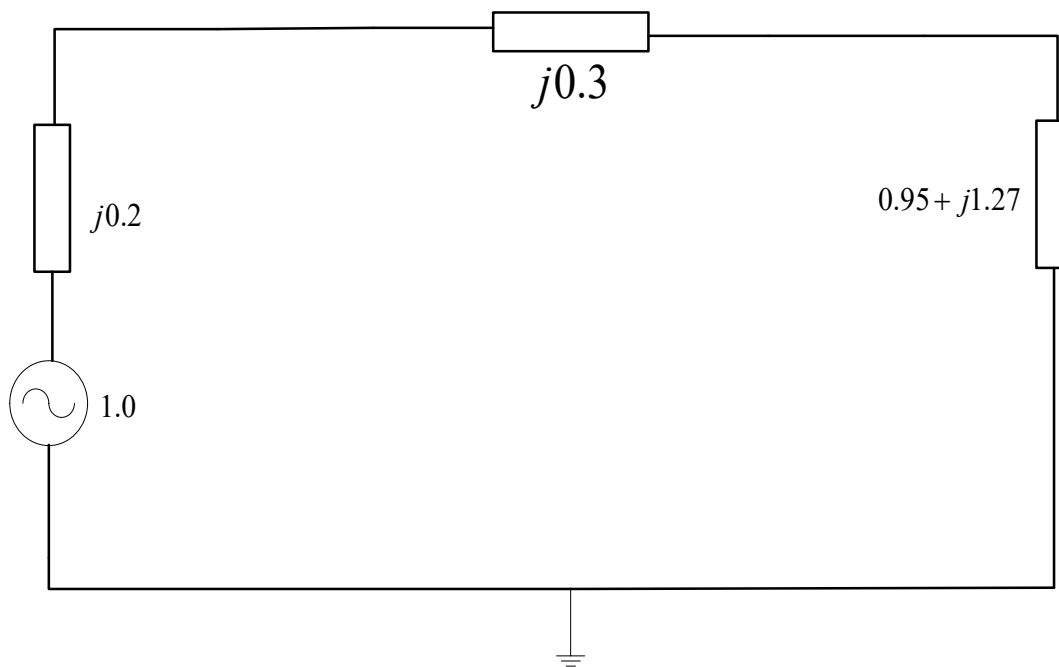
ขั้นตอนที่ 4 : เขียนอิมพีแดนซ์ไดอะแกรม (Impedance Diagram)



## ตัวอย่างที่ 2.7(ต่อ)

ขั้นตอนที่ 5 : คำนวณค่าปริมาณต่าง ๆ ที่ต้องการ

คำนวณหากระแสที่ไหลผ่านโหลด จะได้ว่า



$$I_{load} = \frac{V}{0.95 + j1.27 + j0.2 + j0.3}$$

$$I_{load} = \frac{1}{0.95 + j1.77}$$

$$I_{load} = 0.235 - j0.4386 \text{ pu}$$

$$I_{load} = 0.4978 \angle -61.7765 \text{ pu}$$

## ตัวอย่างที่ 2.7(ต่อ)

ขั้นตอนที่ 6 : เปลี่ยนปริมาณที่กำหนดให้เป็นปริมาณในหน่วย SI

ดังนั้นค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดในหน่วย SI สามารถหาได้ดังนี้

$$I_{load,act} = I_{load,pu} \times I_{load,based}$$

$$I_{load,act} = (0.4978 \angle -61.7765) \times 5248.640$$

$$I_{load,act} = 2612.773 \angle -61.7765 \quad A$$

## ข้อสังเกตสำหรับการคำนวณระบบเปอร์ยูนิต

ค่าเบส หรือค่าอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณที่ได้กล่าวมา จะพิจารณาเพียงขนาดเท่านั้น โดยมุมจะมีค่าเป็นศูนย์ทำให้เมื่อแปลงค่าต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปเปอร์ยูนิตนั้น **ค่ามุมของปริมาณจริงจะไม่มี การเปลี่ยนแปลง**

การเลือกปริมาณอ้างอิงสามารถเลือกค่าเท่าใดก็ได้ โดยผลการคำนวณสุดท้ายจะได้ค่าเท่ากันแต่ขั้นตอนการคำนวณเข้าสู่ระบบเปอร์ยูนิตอาจมีความยากง่ายต่างกัน

# จบการคำนวณระบบเปอรฺยูนิต