

หน่วยที่4. การวัดด้วยบริดจ์



จุดประสงค์ทั่วไป

รู้ชนิดและการนำไปใช้งานของวงจรบริดจ์แบบต่าง ๆ

จุดประสงค์การเรียนรู้

- อธิบายหลักการของวงจรบริดจ์ไฟฟ้ากระแสตรงได้
- คำนวณหาค่าความต้านทานในวงจรบริดจ์สมดุลได้
- คำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าในวงจรบริดจ์ไม่สมดุลได้
- อธิบายหลักการของวงจรบริดจ์ไฟฟ้ากระแสสลับได้
- คำนวณหาค่าความต้านทานและค่าความจุในวงจรบริดจ์มุมเหมือนได้
- คำนวณหาค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำ ในวงจรบริดจ์แมกซ์เวลล์บริดจ์ได้
- ตรงต่อเวลา
- แสดงความคิดเห็นอย่างมีเหตุผล

- ปฏิบัติงานด้วยความตั้งใจ
- คำนคว้าเพิ่มเติม

ใบความรู้ หน่วยที่ 4

เรื่อง การวัดด้วยบริดจ์

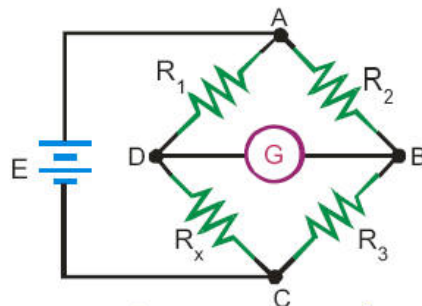
เนื้อหาสาระ

1. บริดจ์ไฟฟ้ากระแสตรง (d.c. bridge)

เป็นวงจรที่ใช้วัดความต้านทานในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมีค่าความถูกต้องสูง
บริดจ์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถจำแนกได้ 2 แบบ ดังนี้

1.1 บริดจ์สมดุล

เป็นวงจรวัดค่าความต้านทาน โดยการเปรียบเทียบความต้านทานที่ไม่ทราบค่า (R_x) กับความ
ต้านทานมาตรฐาน (R_3) วงจรพื้นฐานแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรบริดจ์สมดุลพื้นฐาน

จากรูปที่ 1 ถ้ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ (G) เป็นศูนย์ หมายความว่าความต่างศักย์ ระหว่างจุด B, D เป็นศูนย์ เรียกว่า บริดจ์อยู่ในสภาวะสมดุล ขณะนี้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_3 จะเท่ากับ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_x และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_1 จะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_2

$$ER_3 = \frac{R_3 \cdot E}{(R_2 + R_3)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$ER_x = \frac{R_x \cdot E}{(R_1 + R_x)} \quad \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อปัดเศษสมการ (1) = (2) จะได้

$$\begin{aligned}\frac{R_3}{(R_2 + R_3)} &= \frac{R_x}{(R_1 + R_x)} \\ R_3 \cdot (R_1 + R_x) &= R_x \cdot (R_2 + R_3) \\ R_3 \cdot R_1 + R_3 \cdot R_x &= R_x \cdot R_2 + R_x \cdot R_3 \\ \therefore R_3 \cdot R_1 &= R_x \cdot R_2 \\ R_x &= \frac{R_3 \cdot R_1}{R_2} \dots\dots\dots(3)\end{aligned}$$

ดังนั้นในสภาวะสมดุล (กระแสไฟฟ้าไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ เท่ากับศูนย์) ผลคูณของความต้านทานที่อยู่ด้านตรงข้ามจะเท่ากัน ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่ต้องการทราบ ค่ากับความต้านทานมาตรฐานได้ดังสมการที่ 3 การป้อนแรงดันไฟฟ้าค่าสูงให้แก่วงจรจะทำให้ความไวของปัดเศษสูงขึ้น

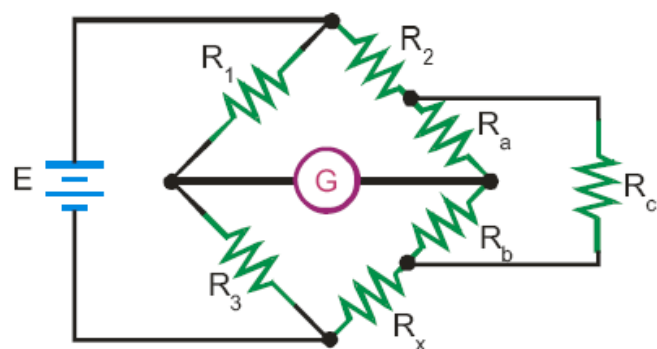
ลักษณะทั่วไปของวงจรสมดุล จะใช้วิธีการวัดแบบสมดุลหรือชี้ค่าศูนย์ โดยเมื่อทำการปรับแขนของปัดเศษได้อย่างเหมาะสม ที่ปลายทั้งสองของกัลวานอมิเตอร์จะมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน ปัดเศษไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นปัดเศษสมดุลสามารถแบ่งได้ ดังนี้

1.1.1 วิสโตมบริดจ์ (Wheatstone bridge) บริดจ์ชนิดนี้ใช้สำหรับวัดค่าความต้านทานจากค่า 0.1 Ω ถึง 10 MΩ โดยมีความถูกต้อง 0.01% - 1% หลักการของวิสโตมบริดจ์ ดังที่กล่าวมาแล้วในวงจรปัดเศษสมดุล ซึ่งเป็นบริดจ์พื้นฐาน แสดงดังรูปที่ 1

1.1.2 เคลวินบริดจ์ (Kelvin bridge) ในวงจรวิสโตมบริดจ์ สายและขั้วต่อสายจะมีความต้านทานอยู่จำนวนหนึ่ง ดังนั้นการนำวิสโตมบริดจ์มาวัดค่าความต้านทานที่มีค่าต่ำ (ในช่วง 0.1 μΩ ถึง 100 Ω) จะทำให้ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดคลาดเคลื่อนจากความต้านทานที่แท้จริง เนื่องจากอัตราส่วนของความต้านทานที่ทำให้วงจรสมดุล จะรวมค่าความต้านทานของสายและขั้วต่อสายเข้าไปด้วย

วิธีการลดผลกระทบจากความต้านทานของสายและขั้วต่อสายของวิสโตมบริดจ์ต่ออัตราส่วนของวงจรสมดุลทำได้โดยการนำอัตราส่วนความต้านทานอีกค่าหนึ่งต่อเพิ่มเข้าไปในวงจรวิสโตมบริดจ์ ซึ่งเรียกววงจรสมดุล

- 3 -



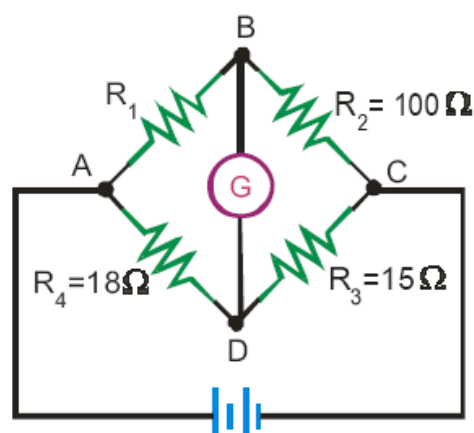
รูปที่ 2 วงจรเคลวินบริดจ์

เมื่อวงจรบริดจ์สมดุลจะได้

$$\frac{R_x}{R_2} = \frac{R_3}{R_1} = \frac{R_b}{R_a}$$

ตัวอย่างที่ 1 จากวงจรวีตสโตนบริดจ์ ถ้าเข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้ค่าที่ศูนย์ จงหาค่า

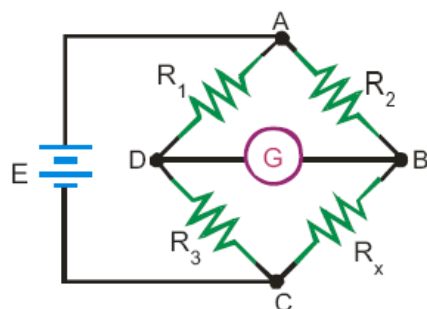
R_1



- 4-

$$\begin{aligned} \therefore R_1 &= \frac{R_2 \cdot R_4}{R_3} = \frac{(100 \, \Omega \cdot 18 \, \Omega)}{15 \, \Omega} \\ &= 120 \, \Omega \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 2 จากวงจรวีตสโตนบริดจ์ $R_1 = 400 \, \Omega$, $R_2 = 5 \, \text{k}\Omega$, $R_3 = 2 \, \text{k}\Omega$ ถ้าเข็มของกัลวานอมีเตอร์ชี้ค่าที่ศูนย์ จงหาค่า R_x



$$\begin{aligned} R_1 \cdot R_x &= R_2 \cdot R_3 \\ R_x &= \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} = \frac{5 \, \text{k}\Omega \cdot 2 \, \text{k}\Omega}{400 \, \Omega} \end{aligned}$$

จากรูปที่ 3 เมื่อปลดกัลวานมิเตอร์ออกจากวงจร

$$E R_3 = \frac{R_3 \cdot E}{(R_2 + R_3)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$E R_4 = \frac{R_4 \cdot E}{(R_1 + R_4)} \quad \dots\dots\dots(2)$$

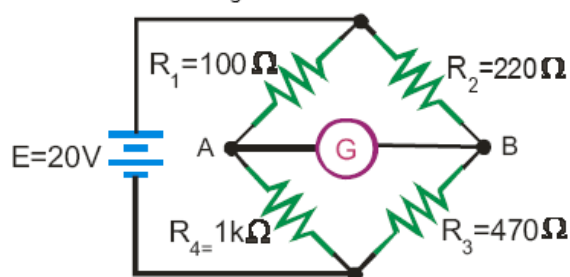
ผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว A และ B มีค่าเท่ากับ สมการ (1) - (2) จะได้

$$E_{AB} = \frac{R_3 \cdot E}{(R_2 + R_3)} - \frac{R_4 \cdot E}{(R_1 + R_4)} \quad \dots\dots\dots(3)$$

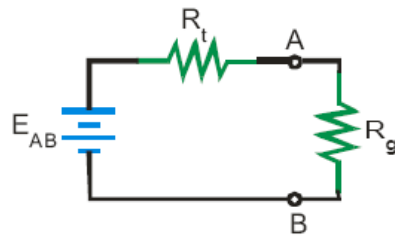
หาค่าความต้านทานรวมที่จุด A และ B จะได้ ดังรูปที่ 4



ตัวอย่างที่ 3 จากวงจรบริดจ์ไม่สมดุล จงหาค่าความต่างศักย์ระหว่างจุด AB และกระแสไฟฟ้าไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ เมื่อกัลวานอมิเตอร์มี $R_g = 100 \, \Omega$

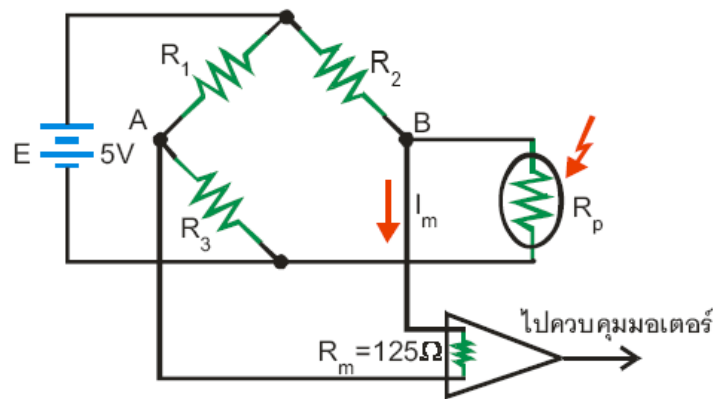


- 7 -

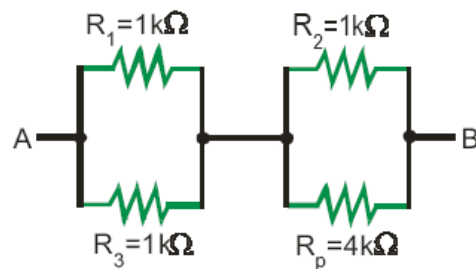


$$I_{AB} = \frac{E_{AB}}{R_t + R_g} = \frac{4.56 \text{ V}}{240.76 \Omega + 100 \Omega} = 13.38 \text{ mA}$$

ตัวอย่างที่ 4 จากรูปถ้าแสงพุ่งไปยังโฟโตเซลล์ ทำให้ความต้านทานของโฟโตเซลล์เพิ่มขึ้นจาก $1 \text{ k}\Omega$ เป็น $4 \text{ k}\Omega$ เมื่อค่า $R_1 = R_2 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ จงหากระแสไฟฟ้า I_m

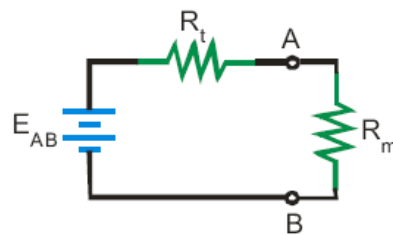


$$\begin{aligned} E_{AB} &= E_A - E_B \\ &= \frac{E \cdot R_3}{(R_1 + R_3)} - \frac{E \cdot R_p}{(R_2 + R_p)} \\ &= \frac{5 \text{ V} \cdot 1000 \Omega}{(1000 \Omega + 1000 \Omega)} - \frac{5 \text{ V} \cdot 4000 \Omega}{(1000 \Omega + 4000 \Omega)} \\ &= 2.5 \text{ V} - 4 \text{ V} \\ &= 1.5 \text{ V} \end{aligned}$$



- 8 -

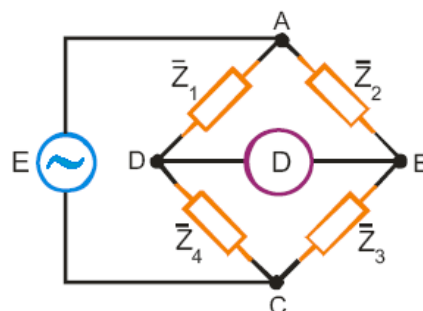
$$\begin{aligned}
 R_t &= R_{t1} + R_{t2} \\
 &= \frac{R_1 \cdot R_3}{(R_1 + R_3)} + \frac{R_2 \cdot R_p}{(R_2 + R_p)} \\
 &= \frac{1 \text{ k}\Omega \cdot 1 \text{ k}\Omega}{(1 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega)} + \frac{1 \text{ k}\Omega \cdot 4 \text{ k}\Omega}{(1 \text{ k}\Omega + 4 \text{ k}\Omega)} \\
 &= 500 \Omega + 800 \Omega \\
 &= 1300 \Omega
 \end{aligned}$$



$$I_m = \frac{E_{AB}}{R_t + R_m} = \frac{1.5 \text{ V}}{1300 \Omega + 125 \Omega} = 1.05 \text{ mA}$$

2. บริดจ์ไฟฟ้ากระแสสลับ (a.c. bridge)

บริดจ์ไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นวงจรที่มีบริดจ์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นวงจรพื้นฐาน ซึ่งแบบของบริดจ์ไฟฟ้ากระแสสลับ ประกอบด้วยแขนของบริดจ์ 4 แขน แหล่งจ่ายสำหรับวงจรและตัวชี้แสดง เช่น เทเลโฟนดีเทกเตอร์, ออสซิลโลสโคป เป็นวงจรที่ใช้วัดค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ แขนของวีตสโตนบริดจ์จะประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ (Z) 4 ตัว ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 วงจรบริดจ์ไฟฟ้ากระแสสลับ

จากรูปที่ 5 สมการของบริดจ์เมื่อสมดุลจะได้ความต่างศักย์ระหว่างจุด B กับ D จะเป็นศูนย์และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมจาก D ถึง A เท่ากับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมจาก B ถึง A รวมทั้งมีเฟสเหมือนกันด้วย ซึ่งจะเปรียบเทียบได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E_{DA} &= E_{BA} \\ \text{หรือ } I_1 Z_1 &= I_2 Z_2 \quad \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

สำหรับกรณีสมดุลกระแสไฟฟ้าผ่านตัวชี้แสดงเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะได้

$$I_1 = \frac{E}{(Z_1 + Z_4)} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{และ } I_2 = \frac{E}{(Z_2 + Z_3)} \quad \dots\dots\dots(3)$$

แทนสมการ (2) และ (3) ในสมการที่ (1) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{E \cdot Z_1}{(Z_1 + Z_4)} &= \frac{E \cdot Z_2}{(Z_2 + Z_3)} \\ Z_1 \cdot (Z_2 + Z_3) &= Z_2 \cdot (Z_1 + Z_4) \\ Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_3 &= Z_2 \cdot Z_1 + Z_2 \cdot Z_4 \\ \bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_3 &= \bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_4 \quad \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

และมุมเฟสของอิมพีแดนซ์ที่เท่ากัน $\angle \theta_1 + \theta_3 = \angle \theta_2 + \theta_4$

ถ้าใช้แอดมิตแตนซ์ แทน อิมพีแดนซ์ จะได้

$$Y_1 \cdot Y_3 = Y_2 \cdot Y_4 \quad \dots\dots\dots(5)$$

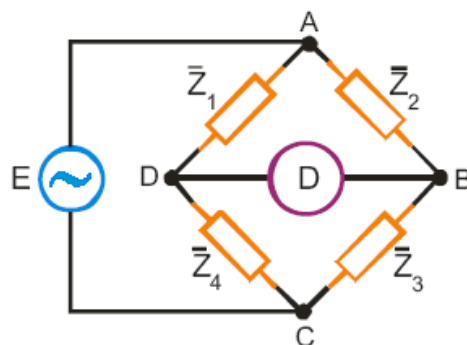
สมการที่ 4 จะใช้อิมพีแดนซ์ เมื่อวงจรบริดจ์มีแขนของบริดจ์ต่อแบบอนุกรม

สมการที่ 5 จะใช้แอดมิตแตนซ์ เมื่อวงจรบริดจ์มีแขนของบริดจ์ต่อแบบขนาน

จากสมการที่ 4 สามารถเขียนในรูปของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ได้ดังนี้

ขนาดของอิมพีแดนซ์ ต้องมีความสัมพันธ์ $Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4$
มุมเฟสของอิมพีแดนซ์ ต้องมีความสัมพันธ์ $\angle \theta_1 + \theta_3 = \angle \theta_2 + \theta_4$

ตัวอย่างที่ 5 จากรูปให้พิสูจน์ว่าวงจรบริดจ์สมดุลหรือไม่



เมื่อ $Z_1 = 200 \angle 60^\circ \Omega$, $Z_2 = 400 \angle -90^\circ \Omega$

$Z_3 = 600 \angle 30^\circ \Omega$, $Z_4 = 300 \angle 0^\circ \Omega$

เมื่อวงจรบริดจ์สมดุล จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไข

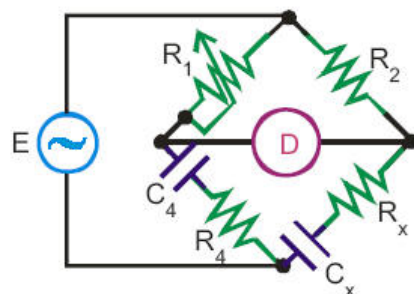
$$\begin{aligned} \text{ขนาดของอิมพีแดนซ์} \quad Z_1 \cdot Z_3 &= Z_2 \cdot Z_4 \\ 200 \Omega \cdot 600 \Omega &= 400 \Omega \cdot 300 \Omega \\ 120,000 \Omega &= 120,000 \Omega \end{aligned}$$

$$\text{มุมเฟสของอิมพีแดนซ์} \quad \angle \theta_1 + \theta_3 = \angle \theta_2 + \theta_4$$

บริดจ์ไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถแบ่งได้ ดังนี้

2.1 บริดจ์มุมเหมือน เป็นวงจรบริดจ์ที่ใช้ตัวอิมพีแดนซ์เชิงประจุ (Capacitive impedance) โดยให้

ตัวเก็บประจุมาตรฐาน (C_4) เป็นองค์ประกอบในการเปรียบเทียบค่า แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 วงจรบริดจ์มุมเหมือน

$$Z_1 = R_1$$

$$Z_2 = R_2$$

$$Z_3 = R_x - jXC_x$$

$$Z_4 = R_4 - jXC_4$$

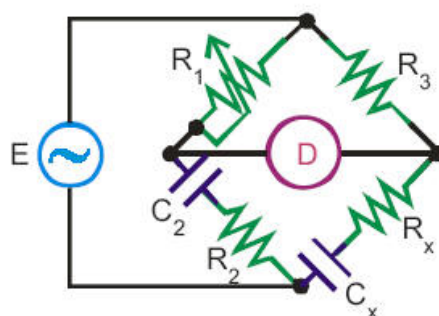
เมื่อวงจรบริดจ์สมดุล จะได้

$$Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4$$

$$R_1 \cdot (R_x - jXC_x) = R_2 \cdot (R_4 - jXC_4)$$

ตัวอย่างที่ 6 จากวงจรบริดจ์สมดุล $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ $C_2 = 100 \text{ }\mu\text{F}$ $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$

$R_3 = 50 \text{ k}\Omega$ จงหาค่า C_x, R_x



$$Z_1 = R_1$$

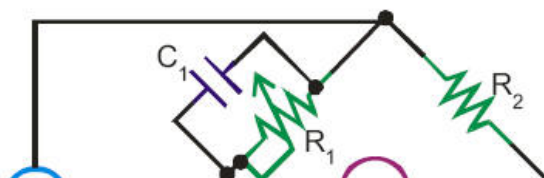
$$Z_2 = R_2 - jXC_2$$

$$Z_3 = R_3$$

$$Z_x = R_x - jXC_x$$

2.2 แมกซ์เวลล์บริดจ์ เป็นวงจรบริดจ์ที่ใช้ตัวดิมพีแดนซ์เชิงเหนี่ยวนำ(Inductive impedance)

โดยใช้ตัวเก็บประจุมาตรฐาน (C_1) เป็นองค์ประกอบในการเปรียบเทียบค่า แสดงดังรูปที่ 7

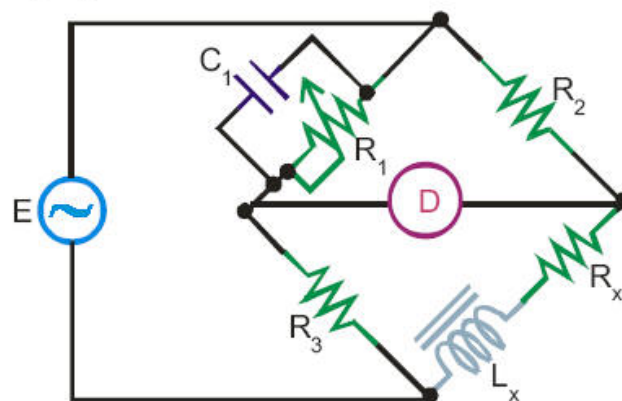


$$\text{จำนวนจริง} \quad R_x = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_1}$$

$$\text{จำนวนจินตภาพ} \quad +j\omega L_x = +j\omega C_1 R_2 R_4$$

$$L_x = C_1 R_2 R_4$$

ตัวอย่างที่ 7 จากวงจรบริดจ์สมดุล $R_1 = 470 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 0.01 \text{ }\mu\text{F}$, $R_2 = 5.1 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 100 \text{ k}\Omega$ จงหาค่า L_x , R_x



$$Y_1 = \frac{1}{R_1 - jXC_1} = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{-jXC_1} = \frac{1}{R_1} + j \frac{1}{(1/\omega C_1)} = \frac{1}{R_1} + j\omega C_1$$

$$\therefore Z_1 = \frac{1}{Y_1} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + j\omega C_1}$$

$$Z_2 = R_2, \quad Z_3 = R_3, \quad Z_4 = R_x + jXL_x$$

เมื่อวงจรบริดจ์สมดุล จะได้

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3$$

$$\frac{1}{\frac{1}{R_1} + j\omega C_1} \cdot (R_x + jXL_x) = R_2 \cdot R_3$$

- 15-

$$(R_x + j\omega L_x) = \frac{R_2 \cdot R_3 (1 + j\omega C_1)}{R_1}$$

$$R_x + j\omega L_x = \frac{R_2 \cdot R_3 + j\omega C_1 R_2 R_3}{R_1}$$

$$\therefore R_x = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} = \frac{5.1 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ k}\Omega}{470 \text{ k}\Omega} = 1.09 \text{ k}\Omega$$

$$+ j\omega L_x = + j\omega C_1 R_2 R_3$$

$$\therefore L_x = C_1 R_2 R_3 = 0.01 \text{ }\mu\text{F} \cdot 5.1 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ k}\Omega$$

$$= 5.1 \text{ H}$$

