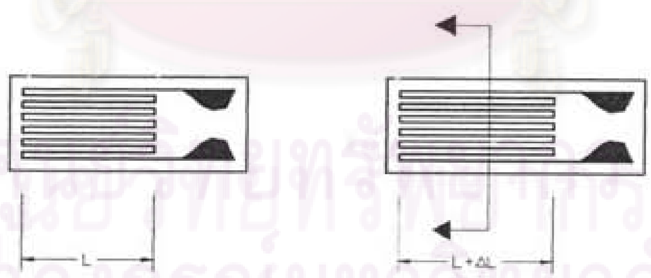
บทที่ 3

การวัดการเปลี่ยนแปลงความเครียดโดยใช้สเตรนเกจ

ในการวัดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของอุปกรณ์วัดแรงเมื่อมีแรงมากระทำสามารถทำการวัดได้ 2 วิธีขึ้นอยู่กับการออกแบบโครงสร้างและตรวจตัววัดที่ใช้ คือการวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเมื่อมีแรงกระทำโดยใช้ ตัวตรวจวัดการเคลื่อนที่ (displacement sensor) เช่น LVDT (linear variable displacement transducer) eddy current proximity detectors และ ตัวตรวจวัดทางแสง เป็นต้น อุปกรณ์วัดแรงประเภทนี้ได้แก่ IRCC (instrument remote center compliance) ส่วนอีกประเภทหนึ่งจะเป็นการวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างในรูปของความเครียดโดยใช้ตัวตรวจวัดความเครียดที่เรียกว่า สเตนเกจ (strain gage) วิธีการนี้จะเป็นวิธีการที่สะดวกไม่ต้องการอุปกรณ์ที่ยุ่งยากซับซ้อนมากนัก และยังมีราคาที่ไม่แพงเมื่อเทียบกับตัวตรวจวัดประเภทอื่นๆ ทำให้เป็นตัวตรวจวัดแบบนี้เป็นที่นิยมใช้ในการทำอุปกรณ์วัดแรง

ในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องอุปกรณ์วัดแรงเราจะใช้สเตรนเกจเป็นตัวตรวจวัดการยืดหรือหดตัวของโครงสร้างของอุปกรณ์วัดแรงที่เราได้สร้างขึ้นมา โดยตัวสเตรนเกจนั้นจะทำการติดตั้งที่ตัวโครงสร้างบริเวณที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงด้านความเครียดมากที่สุดเพื่อให้การวัดการเปลี่ยนแปลงทำได้ถูกต้องแน่นอนที่สุด สำหรับความเครียดที่เกิดขึ้นที่สเตรนเกจนั้นโดยพื้นฐานแล้วเมื่อเกิดความเครียดจะทำให้ความต้านทานของสเตรนเกจมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสมการดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 สเตรนเกจ

จากความสัมพันธ์

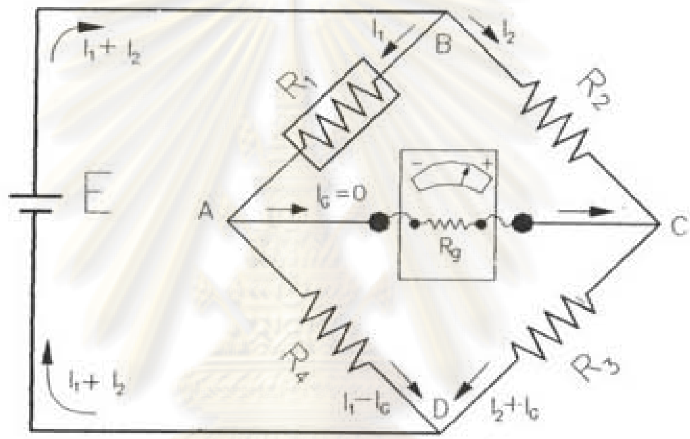
$$\frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} = GF$$ (gauge factor คุณสมบัติที่แสดงค่าความไวของสเตรนเกจ)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R}{R.GF}$$ (ε คือ ค่าความเครียด)

$$\Delta R = GF.R.\frac{\Delta L}{L}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = GF.\varepsilon \qquad (3\text{-}1)$$

สำหรับค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) นั้นจะมีค่าน้อย ทำให้ไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรง วิธีการที่นิยมใช้และทำให้เราสามารถวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานนี้ได้เราจะต้องทำการติดตั้งสเตรนเกจเป็นส่วนหนึ่งของวงจรไฟฟ้าที่เรียกว่าวงจรวีทสโตนบริดจ์ (wheatstone bridge circuit) ซึ่งจะช่วยในการแปลงค่าการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานที่มีค่าน้อยมากนี้ให้สามารถวัดได้ในรูปของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 3.2 วงจร วีทสโตนบริดจ์

<u>ทฤษฎีของการสมดุลย์ของวงจรบริดจ์</u>

ในสภาวะสมดุลย์ ความต้านทาน $R_1=R_2=R_3=R_4$

$$E_{B\text{-}A} = E_{B\text{-}C}$$

หรือ $$I_1R_1 = I_2R_2 \qquad (3\text{-}2)$$

และ $$E_{A\text{-}D} = E_{C\text{-}D}$$

หรือ $$I_1R_4 = I_2R_3 \qquad (3\text{-}3)$$

จากสมการข้างบนค่ากระแส I_1 และ I_2 สามารถตัดทิ้งได้โดยการหาร สมการที่ 3-2 ด้วยสมการ (3-3) จะได้

$$\frac{I_1R_2}{I_1R_4} = \frac{I_2R_2}{I_2R_3}$$

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \qquad (3\text{-}4)$$

<u>ทฤษฎีของการไม่สมดุลย์ของวงจรบริดจ์</u>

เมื่อสเตรนเกจที่ยึดติดกับชิ้นงานเกิดการยืดหรือหดตัวเนื่องจากแรงกระทำค่าความต้านทานของสเตรนเกจก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วยขนาด ΔR ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความต่างศักย์เอาท์พุทจากวงจรบริดจ์ ตามสมการดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 3..2 และจากกฎข้อที่ 2 ของ เคอร์ชอฟ คิดในลูปที่ผ่านแบตเตอรี่ E และความต้านทาน R_1และ R_2

$$R_1I_1 + R_4(I_1 - I_G) = E$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$I_1(R_1 + R_4) - I_GR_4 = E \qquad (3\text{-}5)$$

สำหรับกระแสในลูปที่ผ่านความต้านทาน R_1 R_2 และ R_G

$$R_1I_1 + R_GI_G - R_2I_2 = 0 \qquad (3\text{-}6)$$

สำหรับกระแสในลูปที่ผ่านความต้านทาน R_G R_3 และ R_4

$$R_GI_G + R_3(I_2 + I_G) - R_4(I_1 - I_G) = 0$$

$$-R_4I_1 + R_3I_2 + I_G(R_G + R_3 + R_4) = 0 \qquad (3\text{-}7)$$

จากสมการทั้งสามสามารถแก้สมการหาค่าของกระแสที่ผ่านกัลวาโนมิเตอร์ (I_G) ได้ดังนี้

$$I_G = \frac{E(R_2R_4 - R_1R_3)}{R_2(R_1 + R_4)(R_G + R_3R_4) + R_1R_3R_4 - R_2R_4^2 + R_GR_3(R_1 + R_4)} \qquad (3\text{-}8)$$

จากสมการ(3-8)จะพบว่าในสภาวะสมดุลย์ $R_1/R_4 = R_2/R_3$ จะทำให้กระแสเอาท์-พุท I_G มีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อเกิดความเครียดขึ้นความต้านทานของสเตรนเกจ R_1ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ด้วยขนาด ΔR_1 จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าของวงจรบริดจ์ จากสมการ (3-8) เมื่อตัดเทอมที่มีกำลังสูงๆออกไป และความต้านทาน R_1=R_2=R_3=R_4=R เราสามารถลดรูปของสมการให้อยู่ในรูปของสมการดังต่อไปนี้

$$I_G = \frac{E\Delta R}{4R(R + R_G)}$$

เมื่อ $\Delta R/R = GF\varepsilon$

$$I_G = \frac{EGF\varepsilon}{4(R + R_G)}$$

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด R_G จะเท่ากับ

$$E_0 = I_G R_G = \frac{EGF\varepsilon}{4(R + R_G)}$$

ความต่างศักย์ไฟฟ้าของวงจรเปิด ($R_G \rightarrow \infty$) สามารถหาได้โดยการหาค่าลิมิตของ E_0 เมื่อ R_G เข้าใกล้อนันต์

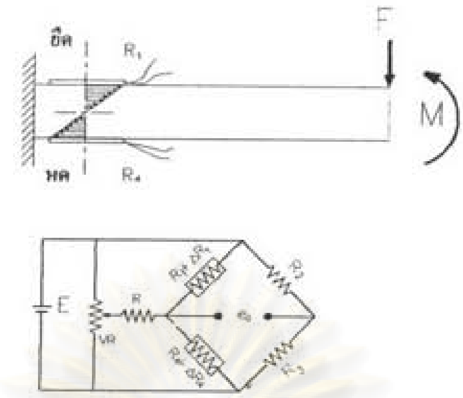
$$E'_0 = \lim_{(R_G \rightarrow \infty)} E_0 = \frac{EGF\varepsilon}{4} \qquad (3\text{-}9)$$

จากสมการที่ 3-9 จะเห็นว่าความต่างศักย์ไฟฟ้า E_0 ที่ได้จะมีค่าความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเครียดที่เกิดขึ้น และถ้าในสภาวะเริ่มต้นความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานวงจรก็จะไม่สมดุลย์และมีความต่างศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้น เมื่อเราทำการใส่แรงกระทำที่รู้ค่าต่อระบบ เราจะสามารถทำการปรับเทียบ (calibrated) เพื่อหาคุณสมบัติของระบบที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความต่างศักย์ไฟฟ้าเอาท์พุท E_0 ได้

โดยวิธีการเดียวกัน และถ้าความต้านทานทั้ง 4 ตัวของวงจรบริดจ์สามารถเปลี่ยนแปลงความต้านทานได้ เราจะได้ค่าสัญญาณความต่างศักย์เอาท์พุทที่สัมพันธ์กับค่าความต้านทานทั้งหมดที่เปลี่ยนแปลงไปดังนี้

$$E_0 = \frac{ER_G}{4(R + R_G)}\left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4}\right] \qquad (3\text{-}10)$$

จากสมการจะเห็นว่าเราสามารถเพิ่มค่าของเอาท์พุท E_0 (อัตราขยายของวงจรบริดจ์)ได้ โดยให้การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน(ความเครียด) ของ R_1 และ R_3 อยู่ในทิศทางตรงข้ามกันกับการเกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน R_2 และ R_4 ตัวอย่างของการเพิ่มอัตราขยายของวงจรบริดจ์ เช่นการติดตั้งสเตรนเกจที่มีความต้านทาน R เพื่อวัดการคัดตัวของคาน เราสามารถติดตั้งให้สเตรน-เกจเกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานในทิศทางที่ตรงข้ามกัน ตามรูปที่ 3.3 สเตรนเกจ R_1 จะเกิดการยืดตัวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน $+\Delta R_1$ ขณะที่ด้านล่างของคานจะเกิดการหดตัวทำให้สเตรนเกจ R_4 มีความต้านทานลดลง $-\Delta R_4$ ถ้าความต้านทานในขณะปกติมีค่าเท่ากันหมด ความต้านทาน R_2 และ R_3 เป็นความต้านทานที่มีค่าคงที่จะได้ $\Delta R_1 = \Delta R_4 = \Delta R$ และ $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 3-10 จะได้ความต่างศักย์เอาท์พุท



รูปที่ 3.3 การติดตั้งสเตรนเกจแบบเพิ่มอัตราขยายสองเท่า

$$E_0 = \frac{ER_G}{4(R+R_G)}\left[\frac{\Delta R}{R} - \frac{-\Delta R}{R}\right]$$

$$E_0 = \frac{ER_G}{4(R+R_G)}\left[\frac{2\Delta R}{R}\right]$$

$R_G \to \infty$ จะได้

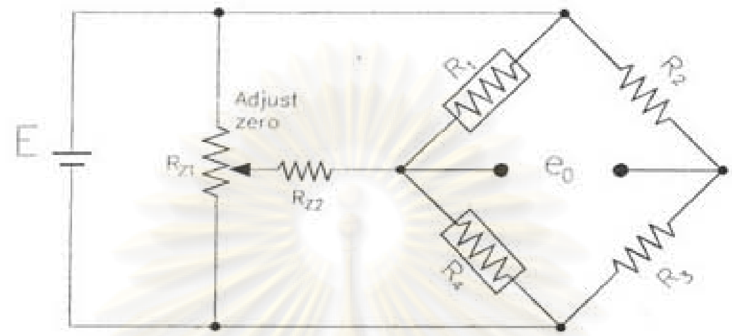
$$E_o = \frac{E\Delta R}{2R} = \frac{EGF\varepsilon}{2}$$

$$E_o = \frac{EGF\varepsilon}{2} \qquad (3\text{-}11)$$

จะเห็นว่าการติดตั้งแบบนี้จะทำให้ค่าสัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นจากเดิมสองเท่าเมื่อเทียบกับการใช้สเตรนเกจตัวเดียวและประโยชน์นอกจากนี้ก็คือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความต้านทาน R_1 และความต้านาน R_4 จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกันและจะหักล้างกันไปตามสมการที่ 3-10 ซึ่งจะเป็นการชดเชยการเปลี่ยนแปลงด้านอุณหภูมิไปในตัวด้วย

ในทางปฏิบัติอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวงจรบริดจ์จะมีค่าความต้านทานที่ไม่เท่ากันอย่างแท้จริงทำให้ในสภาวะที่ไม่มีแรงมากระทำให้เกิดความเครียดที่สเตรนเกจ วงจรบริดจ์ก็จะมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้น ทำให้เกิดความผิดพลาดผลในการวัดค่าได้ ดังนั้นในการทำการวิจัยเราจะใช้วงจรในการปรับสมดุลย์ของวงจรบริดจ์ตามรูปที่ 3.4 โดยใช้ความต้านทานที่ปรับค่าได้ R_{Z1}

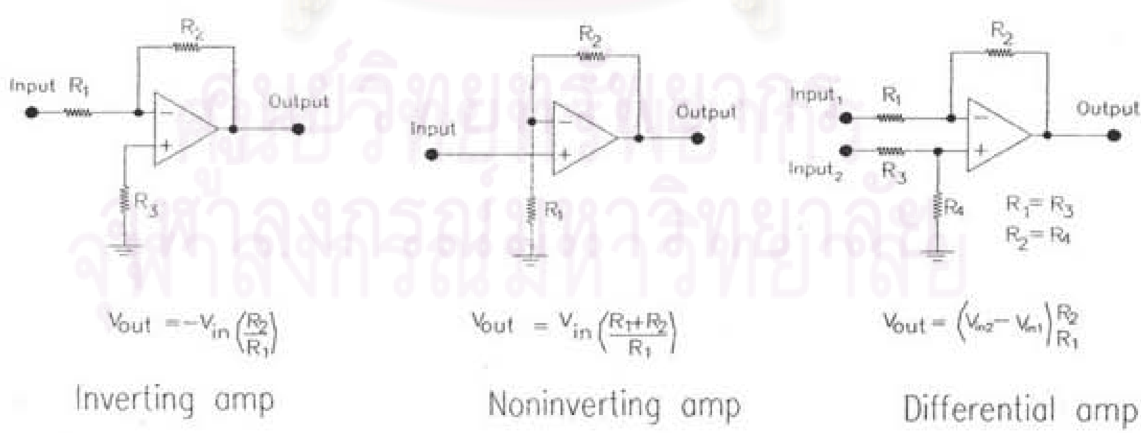
และความต้านทานคงที่ R_{z2} ต่อเพิ่มเติมจากวงจรปกติ วิธีการนี้เป็นการปรับให้อัตราส่วนของความต้านทาน R_1/R_4 มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของความต้านทาน R_2/R_3 (จากสมการ 3-2) ซึ่งจะทำให้วงจรบริดจ์สมดุลย์นั่นเอง



รูปที่ 3.4 วงจรปรับสมดุลย์วงจรบริดจ์

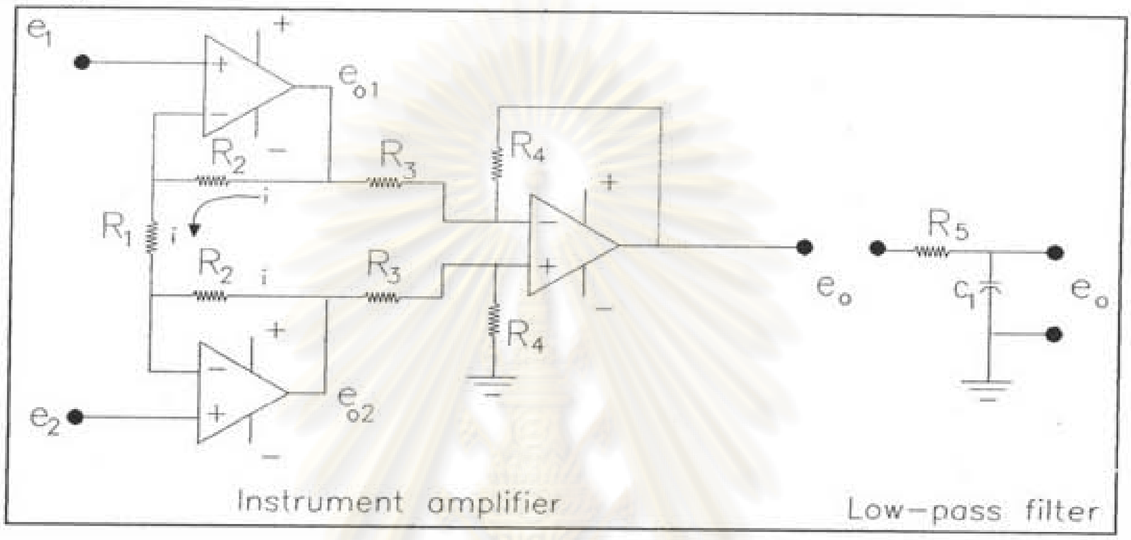
<u>การขยายสัญญาณ</u>

สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ส่งออกมาจากวงจรบริดจ์นั้นจะมีค่าต่ำและมีกำลังไม่เพียงพอในการส่งไปให้อุปกรณ์ตรวจวัดอื่น จำเป็นต้องมีการขยายขนาดและกำลังของสัญญาณให้มีค่าที่เหมาะสม อุปกรณ์ที่ใช้ในการขยายขนาดของสัญญาณที่ใช้โดยทั่วไปคือออปแอมป์ (operational amplifier) ซึ่งสามารถนำมาต่อร่วมกับความต้านทานเป็นวงจรขยายแบบต่างๆ ได้หลายชนิด เช่น วงจรขยายแบบกลับขั้ว (Inverting amplifer) วงจรขยายแบบไม่กลับขั้ว (non-inverting amplifer) และวงจรขยายผลต่าง (differential amplifer) เป็นต้น



รูปที่ 3.5 วงจรขยายพื้นฐานออปแอมป์

สำหรับในการทำการขยายสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กจากวงจรบริดจ์เราจะใช้การขยายสัญญาณโดยวงจรอินสตรูเมนต์แอมปลิไฟเออร์(Instrument amplifer) ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้ขยายสัญญาณผลต่างและมีคุณสมบัติที่ดีคือ มีค่าความต้านทานขาเข้าสูง ค่าคอมมอนโหมด-รีเจกชันเรโชสูง มีค่าสัญญาณรบกวนและค่าออฟเซตดริฟท์ต่ำ วงจรขยายแบบอินสตรูเมต์แสดงตามรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรอินสตรูเมนต์แอมปลิไฟเออร์

กระแสขาเข้าของออปแอมป์ i=0

ให้กระแสไหลผ่านความต้านทาน R_2 R_1 R_2 เท่ากับ i

$$i = \frac{e_{o1} - e_1}{R_2} = \frac{e_1 - e_2}{R_1} = \frac{e_2 - e_{o2}}{R_2}$$

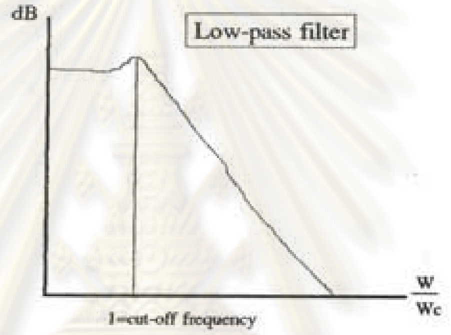
$$e_{o1} - e_{o2} = (e_1 - e_2)\left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)$$

จะได้

$$e_o = (e_2 - e_1)\left(\frac{R_4}{R_3}\right)\left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) \tag{3.12}$$

<u>การกรองสัญญาณความถี่สูง</u>

สัญญาณที่ได้จากวงจรขยายสัญญาณจะมีสัญญาณรบกวน(noise) ที่มีความถี่สูงแทรกเข้ามากับสัญญาณที่เราต้องการวัด การกำจัดสัญญาณรบกวนความถี่สูงโดยวิธีการที่ง่ายที่สุดเราจะใช้วงจร R-C filter ซึ่งเป็นวงจรขจัดสัญญาณรบกวนแบบพาสซีพที่ประกอบด้วยความต้านทานและตัวเก็บประจุตามรูปที่ 3.6 วงจรกำจัดสัญญาณรบกวนแบบนี้ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกทำให้สะดวกในการใช้งาน และสามารถเลือกค่าความถี่สูงสุด (cut off frequency) ที่ยอมให้ผ่านได้โดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานและค่าความจุของตัวเก็บประจุเท่านั้น



รูปที่ 3.7 แสดงคุณสมบัติของวงจรกรองสัญญาณความถี่สูง