

บทนำ

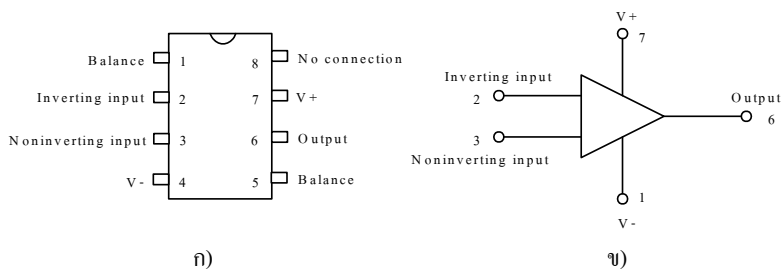
งานด้านวิศวกรรมเป็นการประยุกต์หลักการทางฟิสิกส์มาใช้เพื่อออกแบบอุปกรณ์สำหรับอำนวยความสะดวก (ความสะดวก) ให้กับมนุษย์ แต่หลักการทางฟิสิกส์ดังกล่าวจะไม่มีประโยชน์เลยถ้าไม่มีการวัด ในความเป็นจริงนักฟิสิกส์มักกล่าวเสมอว่า ฟิสิกส์เป็นวิทยาศาสตร์ที่วัดความเป็นจริง ดังนั้นการวัดจึงถือว่าเป็นเครื่องมือสำหรับทำความเข้าใจเกี่ยวกับฟิสิกส์ เครื่องมือวัด (Instruments) เป็นเครื่องมือสำหรับใช้ในการวัด สำหรับออปแอมป์เป็นบล็อกหนึ่งของเครื่องมือวัดไฟฟ้าสมัยใหม่ ดังนั้นการศึกษาหลักการพื้นฐานของออปแอมป์จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะสำหรับผู้ศึกษาทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า การมีทักษะในการปฏิบัติงานเกี่ยวกับเครื่องมือวัดดิจิทัลและอนาล็อกยิ่งมีความสำคัญมาก เช่น ในเครื่องมือวัดต่าง ๆ รวมถึงแอมมิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ โอห์มมิเตอร์ ออสซิลโลสโคป สเปกตรัม อนุไลเซอร์ และเครื่องกำเนิดสัญญาณ เป็นต้น

นอกจากนี้การมีทักษะในการปฏิบัติงานดังกล่าว ทำให้วิศวกรไฟฟ้าบางส่วนอาจมีความเชี่ยวชาญจนสามารถออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าได้เอง วิศวกรเหล่านี้จะมีความภาคภูมิใจที่สร้างเครื่องมือวัดดังกล่าวด้วยตัวเองได้ และบางคนยังได้ประดิษฐ์และได้มีการจดขอรับการคุ้มครองสิทธิบัตรในการประดิษฐ์คิดค้นนั้นด้วย เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์แบบพิเศษต่าง ๆ เราจะเห็นว่ามิใช่ให้เห็นในโรงเรียนทางการแพทย์ โรงพยาบาล ห้องทดลองวิจัย อุตสาหกรรมอากาศยาน และในงานอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกเป็นพัน ๆ ที่ต้องใช้เครื่องมือวัดดังกล่าวโดยเฉพาะในงานที่ทำประจำเป็นปกติทุกวัน

7.1 ออปแอมป์

ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจัดวางอุปกรณ์ภายในอย่างซับซ้อน อันประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐานต่าง ๆ หลายอย่าง เช่น ความต้านทาน ทรานซิสเตอร์ คาปาซิเตอร์ และไดโอด เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงออปแอมป์ในลักษณะของบล็อกของวงจร และการต่อขั้วภายนอกเพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นในการประยุกต์ใช้งานในการวิเคราะห์และใช้งานในทางปฏิบัติเท่านั้นจะไม่กล่าวถึงวงจรภายในอย่างละเอียด

ออปแอมป์เป็นวงจรรวม (IC) มีรูปแบบต่าง ๆ กัน ปัจจุบันที่พบเห็นบ่อยคือ แบบบรรจุในตัวถังพลาสติกที่เรียกว่าคู่ออนไลน์ (Dual in-line package หรือ DIP) มี 8 ขาหรือขั้ว (Terminal) ดังภาพร่างรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 ตัวอย่างสัญลักษณ์ออปแอมป์

ก) การจัดขา (Pin) ข) สัญลักษณ์

ขาหรือขั้วที่สำคัญที่ใช้บ่อยและใช้มากมีอยู่ 5 ขั้ว คือ

1. ขาด้านเข้ากลับขั้ว (-) 2 (Inverting Input)
2. ขาด้านเข้าไม่กลับขั้ว (+) 3 (Noninverting Input)
3. ขาด้านออก 6 (Output)
4. ขั้วแหล่งจ่ายไฟบวก 7
5. ขั้วแหล่งจ่ายไฟลบ 4

ตารางที่ 7.1 ตัวอย่างพารามิเตอร์ของออปแอมป์

พารามิเตอร์	พิสัย	ค่าอุดมคติ
อัตราขยายวงเปิด (A)	10^5 ถึง 10^8	∞
ความต้านทานด้านเข้า (R_i)	10^6 ถึง 10^{13}	∞ โอห์ม
ความต้านทานด้านออก (R_o)	10 ถึง 100 โอห์ม	0 โอห์ม
แรงดันแหล่งจ่าย (V_{CC})	5 ถึง 24 โวลต์	

เมื่อไม่มีการต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับขั้วต่าง ๆ ของออปแอมป์ เมื่อป้อนแรงดันเข้าที่ขาอินพุตกลับขั้ว และขาอินพุตไม่กลับขั้ว จะมีแรงดันแตกต่างกันเกิดขึ้นระหว่างขั้วด้านขาเข้าทั้งสอง V_d เมื่ออัตราขยายวงเปิด (A) มีค่ามาก 10^5 ถึง 10^8 เท่า จะทำให้ได้แรงดันขั้วด้านขาออกมีค่าเท่ากับผลคูณของ V_d กับอัตราขยายวงเปิดได้ค่าแรงดันขั้วด้านขาออกที่สูงมาก ซึ่งทางปฏิบัติจะสูงสุดได้ไม่เกินแรงดันแหล่งจ่าย โดยปกติจะมีค่าแรงดันแหล่งจ่ายสำหรับแหล่งจ่ายบวกลบประมาณ ± 15 โวลต์ ดังนั้นแรงดันด้านขั้วด้านขาออกจะมี

ค่าประมาณ ± 14 โวลต์ ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นบวกหรือลบขึ้นกับค่าแรงดันแตกต่าง V_d ว่ามีค่าเป็นบวกหรือลบ เช่น ถ้าแรงดันที่ขาไม่กลับขั้วมีค่าน้อยกว่าแรงดันที่ขากลับขั้ว จะได้แรงดันออกมาเป็น -14 โวลต์ และถ้ากลับกันก็จะได้เป็น $+14$ โวลต์ เป็นต้น เพื่อให้พิจารณาเข้าใจง่ายขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$V_d = V_2 - V_1 \quad (7.1)$$

V_d = แรงดันแตกต่างระหว่างขาเข้ากลับขั้ว (-) และขาเข้าไม่กลับขั้ว (+)

V_2 = แรงดันระหว่างขาเข้าไม่กลับขั้ว (+) กับกราวด์

V_1 = แรงดันระหว่างขาเข้ากลับขั้ว (-) กับกราวด์

และแรงดันด้านออก (Output) จะได้จากสมการ

$$V_O = AV_d = A(V_2 - V_1) \quad (7.2)$$

$$\text{และ} \quad -V_{CC} \leq V_O \leq +V_{CC} \quad (7.3)$$

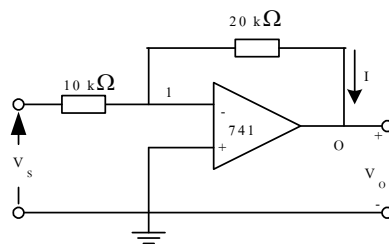
V_O = แรงดันด้านออก

A = อัตราขยายวงรอบเปิด (Open Loop Voltage Gain)

V_{CC} = แรงดันแหล่งจ่าย

ออปแอมป์อาจพิจารณาได้ว่าเป็นวงขยายแรงดันที่มีอัตราขยายสูงมาก ๆ หรือมองว่าเป็นหน่วยทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีพฤติกรรมเหมือนกับแหล่งจ่ายแรงดันแบบใช้แรงดันควบคุม (Voltage Controlled Voltage Source) และนอกจากสามารถใช้ทำเป็นแหล่งจ่ายแบบแรงดันควบคุมหรือกระแสควบคุมได้แล้ว ยังใช้รวมสัญญาณ ขยายสัญญาณ อินทิเกรต หรือหาค่าอนุพันธ์ของสัญญาณได้ด้วย ความสามารถในการดำเนินการทางคณิตดังกล่าวจึงทำให้ถูกเรียกว่า Operational Amplifier หรือสั้น ๆ ว่า ออปแอมป์

ตัวอย่างที่ 7.1 ออปแอมป์ เบอร์ 741 มีอัตราขยายวงเปิด $A = 2 \times 10^5$ มีความต้านทานด้านเข้า $R_i = 2$ เมกะโอห์ม ความต้านทานด้านออก $R_o = 50$ โอห์ม ต่ออุปกรณ์ภายนอกเป็นวงจรดังรูปที่ 7.2 จงหาค่าอัตราขยายวงปิด (Closed loop Gain : V_O/V_S) และหาค่ากระแส I เมื่อ $V_S = 2$ โวลต์



รูปที่ 7.2

วิธีคิด จากรูปที่ 7.2 พิจารณาที่จุด 1 ใช้กฎกระแส KCL จะได้

$$\frac{V_S - V_1}{10 \times 10^3} = \frac{V_1}{2 \times 10^6} + \frac{V_1 - V_O}{20 \times 10^3}$$

คูณตลอดด้วย 2×10^6 ทั้งสองด้านและจัดเทอมจะได้

$$200V_S = 301V_1 - 100V_O$$

$$2V_S = 3V_1 - V_O$$

$$V_1 = (2V_S + V_O)/3$$

จากรูปที่ 7.2 พิจารณาที่จุด O โดยใช้กฎกระแส KCL จะได้

$$\frac{V_1 - V_O}{20 \times 10^3} = \frac{V_O - AV_d}{50}$$

เนื่องจาก $V_d = -V_1$ และ $A = 200,000$ ดังนั้นจะได้

$$V_1 - V_O = 400(V_O + 200,000 V_1)$$

แทนค่า V_1 ด้วย $(2V_S + V_O)/3$ จะได้

$$0 = 26,667,067 V_O + 53,333,333 V_S$$

$$\frac{V_O}{V_S} = -1.9999699$$

ซึ่งเป็นอัตราขยายแบบวงปิดเนื่องจากมีความต้านทานป้อนกลับ (Feedback) ต่อระหว่างขั้วด้านขา

ออกและขั้วด้านขาเข้า เมื่อ $V_S = 2$ โวลต์ เราจะได้ V_1, V_O และกระแส I คือ

$$V_O = 2(-1.9999699) = -3.9999398 \quad \text{โวลต์}$$

$$\text{จาก} \quad V_1 = (2V_S + V_O)/3 = (4 - 3.9999398)/3$$

$$\text{และ} \quad I = \frac{V_1 - V_O}{20 \times 10^3} = 0.1999 \quad \text{มิลลิแอมป์}$$

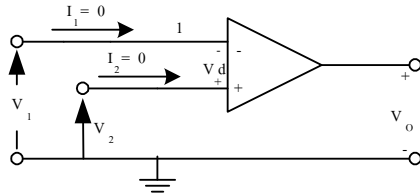
7.2 ออปแอมป์ในเชิงทฤษฎี¹ (Ideal Op-Amp)

เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจวงจรออปแอมป์ เราจะสมมติให้ออปแอมป์เป็นแบบเชิงทฤษฎี โดยมีลักษณะดังนี้

1. มีอัตราขยายวงเปิด $A = \infty$
2. มีความต้านทานด้านเข้า $R_i = \infty$
3. มีความต้านทานด้านออก $R_o = 0$

¹ เชิงทฤษฎี ในตำราหลายเล่มใช้คำว่า อุดมคติ ซึ่งมีความหมายเหมือนกัน

อย่างไรก็ตามเราจะสมมติว่า เป็นออปแอมป์เชิงทฤษฎีเพื่อการวิเคราะห์โดยประมาณเท่านั้น โดยที่ ปัจจุบันออปแอมป์จะมีอัตราขยายสูง (Large) มีอิมพีแดนซ์ด้านขาเข้าสูง ทำให้เราสามารถใช้ผลการประมาณในการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีดังกล่าวนี้ได้ผลไม่ต่างจากการวิเคราะห์โดยละเอียดตามจริงมากนัก ดังนั้นทุกหัวข้อต่อไปนี้จะเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ ออปแอมป์ในเชิงทฤษฎี ดังรูปที่ 7.3 แสดงออปแอมป์เชิงทฤษฎี



รูปที่ 7.3 ออปแอมป์เชิงทฤษฎี

จากรูปที่ 7.3 จะกำหนดให้ออปแอมป์มีลักษณะสมบัติสำคัญ 2 ข้อคือ

1. ไม่มีกระแสไหลเข้าหรือออกจากขั้วด้านขาเข้าทั้งสอง นั่นคือ

$$I_1 = 0 \quad \text{และ} \quad I_2 = 0 \quad (7.4)$$

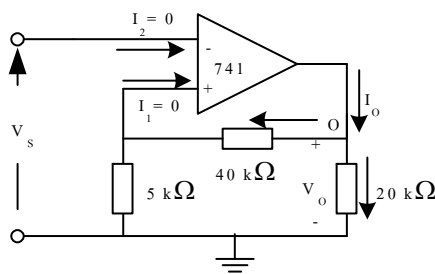
2. แรงดันแตกต่างระหว่างขั้วด้านขาเข้าทั้งสองมีค่าน้อยมากไม่น่ามาคิด นั่นคือ

$$V_d = V_2 - V_1 = 0 \quad (7.5)$$

หรือ
$$V_1 = V_2 \quad (7.6)$$

ซึ่งทั้งสองข้อดังกล่าวคือ 1 ไม่มีกระแสไหลเข้าขั้วด้านขาเข้าทั้งสอง เนื่องจากความต้านทานด้านขาเข้าเข้ามีค่าสูงมากและข้อ 2 แรงดันแตกต่างระหว่างขั้วด้านขาเข้าทั้งสองมีค่าน้อยมาก ใช้ถือเป็นหลักสำคัญในการวิเคราะห์ วงจร ออปแอมป์โดยใช้แบบจำลองอุดมคติของออปแอมป์

ตัวอย่างที่ 7.2 ออปแอมป์ เบอร์ 741 มีอัตราขยายวงเปิด $A = \infty$ มีความต้านทานขั้วด้านเข้า $R_i = \infty$ เมกกะโอห์ม ความต้านทานขั้วด้านขาออก $R_o = 0$ โอห์ม ต่ออุปกรณ์ภายนอกเป็นวงจรดังรูปที่ 7.4 จงหาค่า อัตราขยายวงปิด (Closed Loop Gain : V_o/V_s) และหาค่ากระแส I เมื่อ $V_s = 1$ โวลต์



รูปที่ 7.4

วิธีคิด เมื่อคิดเชิงทฤษฎีจะได้ว่า $V_1 = V_2$ ดังนั้น $V_2 = V_S$ ด้วย ดังนั้นกระแสไหลผ่านความต้านทาน 5 และ 40 กิโลโห์มจะเป็นค่าเดียวกันซึ่งหาได้จาก

$$I = I_{5k\Omega} = \frac{V_S}{5 \times 10^3} = 0.2 \text{ มิลลิแอมป์}$$

$$\text{แรงดัน } V_O = (1)(5k\Omega + 40k\Omega) = 9 \text{ โวลต์}$$

$$\text{จะได้ } I_O = I + \frac{V_O}{20 \times 10^3}$$

$$= 0.2 \text{ mA} + 0.45 \text{ mA}$$

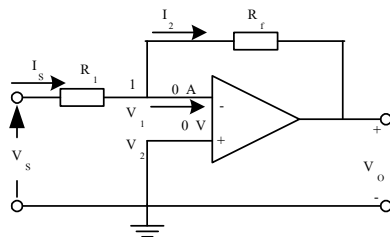
$$= 0.65 \text{ มิลลิแอมป์}$$

เมื่อคิดแบบทางปฏิบัติ จะได้แรงดัน V_O ประมาณ 8.99955796 โวลต์ และกระแส $I_O = 0.649$ มิลลิแอมป์ ซึ่งเมื่อเทียบกับการคิดเชิงทฤษฎีแล้วค่าใกล้เคียงกันมาก จนเราสามารถยอมรับได้ว่าการวิเคราะห์โดยใช้เชิงทฤษฎีจะได้ผลใกล้เคียงเป็นที่ยอมรับได้

7.3 การขยายกลับขั้ว (Inverting Amplifier)

ลักษณะสำคัญของวงจร คือ สัญญาณเข้าและความต้านทานป้อนกลับจะต่อเข้ากับขากลับขั้วของออปแอมป์ พิจารณาจากรูปที่ 7.5 จะต่อขาไม่กลับขั้ว (Non - inverting) เข้ากับกราวด์ ส่วนแรงดันแหล่งจ่ายสัญญาณ V_i จะต่อเข้ากับขา กลับขั้ว (Inverting) ผ่านความต้านทาน R_1 และต่อความต้านทานป้อนกลับ R_f ระหว่างขั้วด้านขาออกกับขากลับขั้ว

ดูฉบับ: Non - invertingNon - Ig



รูปที่ 7.5 การขยายแบบกลับขั้ว

พิจารณาจากรูป 7.5 โดยใช้กฎกระแส KCL ที่จุด 1 จะได้

$$I_1 = I_2$$

$$\frac{V_i - V_1}{R_1} = \frac{V_1 - V_O}{R_f} \tag{7.7}$$

แต่ออปแอมป์ในเชิงทฤษฎีถือว่าแรงดัน $V_1 = V_2 = 0$ ดังนั้นเมื่อต่อขาไม่กลับขั้วลงกราวด์จะได้

$$\frac{V_i}{R_1} = \frac{-V_O}{R_f} = -\frac{V_O}{R_f}$$

หรือ
$$V_O = -\frac{R_f}{R_1} V_i \quad (7.8)$$

อัตราขยายแรงดันคือ $A_V = \frac{V_O}{V_i} = -\frac{R_f}{R_1}$ การออกแบบวงจรดังรูปที่ 7.5 คล้ายกับคำว่า Inverter

ได้มาจากเครื่องหมายลบ (-) นั่นเอง นั่นคือ การขยายแบบกลับขั้วจะกลับขั้วสัญญาณด้านขาเข้านั่นเอง และจะเห็นว่าอัตราขยายได้จากความต้านทานป้อนกลับหารด้วยความต้านทานที่ต่อด้านขาเข้า นั่นคืออัตราขยายของวงจรจะขึ้นกับอุปกรณ์ภายนอกที่ต่อเข้ากับขั้วต่าง ๆ ของออปแอมป์เท่านั้น สำหรับตัวอย่างการใช้งานวงจรขยายแบบกลับขั้ว จะนิยมใช้เป็นวงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน และวงจรกลับเฟสแรงดัน เป็นต้น

ตัวอย่างที่ 7.3 จากรูปที่ 7.5 ถ้า $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ และ $R_f = 25 \text{ k}\Omega$ เมื่อแรงดัน $V_i = 0.5$ โวลต์ ให้คำนวณหา

ก) แรงดันด้านขั้วขาออก (V_O)

ข) กระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R_1 ($10 \text{ k}\Omega$)

วิธีคิด ก) จากสมการ (7.8)
$$V_O = -\frac{R_f}{R_1} V_i$$

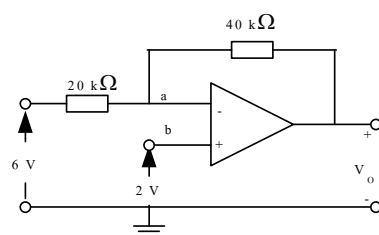
$$= -\frac{25 \times 10^3}{10 \times 10^3} (0.5 \text{ V}) = -1.25 \text{ โวลต์}$$

ข) กระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R_1 ($10 \text{ k}\Omega$)

$$I = \frac{V_i - 0}{R_1} = \frac{0.5 \text{ V} - 0}{10 \times 10^3}$$

$$= 50 \text{ ไมโครแอมป์}$$

ตัวอย่างที่ 7.4 จากวงจรออปแอมป์รูปที่ 7.6 แรงดันด้านออก (V_O) มีค่าเท่าไร



รูปที่ 7.6

วิธีคิด ใช้กฎกระแส KCL ที่จุด a จะได้

$$\begin{aligned} \frac{V_a - V_O}{40} &= \frac{6V - V_a}{20} \\ V_a - V_O &= 40 \left(\frac{6V - V_a}{20} \right) \\ &= 12V - 2V_a \\ V_O &= 3V_a - 12V \end{aligned}$$

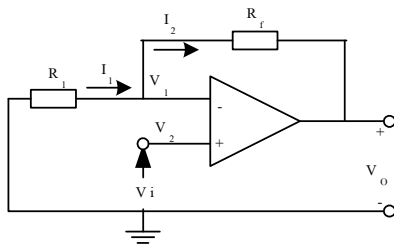
โดย $V_a = V_b = 2$ โวลต์ (ออปแอมป์อุดมคติ) ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} V_O &= 3(2V) - 12V \\ &= -6 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

ข้อสังเกต ถ้า $V_b = 0 = V_a$ แล้วจะได้ $V_O = -12$ โวลต์ สอดคล้องกับสมการ (7.8)

7.4 การขยายแบบไม่กลับขั้ว (Non-Inverting Amplifier)

การขยายแบบไม่กลับขั้วด้วยออปแอมป์เป็นการประยุกต์ใช้ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งมีลักษณะการต่อวงจรภายนอกดังรูปที่ 7.7



รูปที่ 7.7 การขยายแบบไม่กลับขั้วด้วยออปแอมป์

การขยายแบบนี้สัญญาณที่จะขยายจะต่อเข้าขาไม่กลับขั้วของออปแอมป์และความต้านทาน R_1 จะต่อเข้ากับขากลับขั้วเทียบกับกราวด์ ความต้านทานป้อนกลับก็ต่ออยู่ระหว่างขาขาด้านออกและขาขากลับขั้ว (พิจารณาดูรูปที่ 7.7) เช่นเดียวกับการขยายแบบอื่น เราต้องการทราบแรงดันด้านออกและอัตราขยายแรงดัน ดังนั้นประยุกต์ใช้กฎกระแส KCL ที่ขากลับขั้วจะได้

$$\begin{aligned} I_1 &= I_2 \\ \frac{0 - V_1}{R_1} &= \frac{V_1 - V_O}{R_f} \end{aligned} \tag{7.9}$$

แต่ $V_1 = V_2 = V_i$ เขียนสมการ (7.9) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{-V_1}{R_1} = \frac{V_i - V_O}{R_f} \quad (7.10)$$

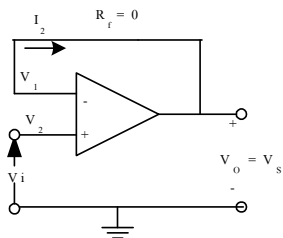
หรือ $V_O = (1 + \frac{R_f}{R_1}) V_i \quad (7.11)$

อัตราขยายแรงดันคือ $A_v = \frac{V_O}{V_i} = (1 + \frac{R_f}{R_1})$ ซึ่งไม่มีเครื่องหมายลบ (-) ดังนั้น แรงดันด้านขาออกจะมีขั้วเหมือนกับแรงดันด้านขาเข้า นั่นคือวงจรขยายแบบไม่กลับขั้วจะถูกออกแบบให้มีอัตราขยายเป็นบวกนั่นเอง และก็เหมือนกับวงจรขยายแบบกลับขั้วที่อัตราขยายของวงจรจะขึ้นกับอุปกรณ์ภายนอกที่นำมาต่อเท่านั้น

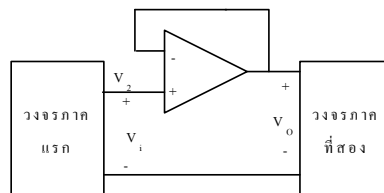
ถ้ากำหนดให้ความต้านทานป้อนกลับ $R_f = 0$ (ต่อลัดวงจร) หรือ $R_1 = \infty$ (หรือเปิดวงจร) อย่างไม่อย่างหนึ่ง หรือทั้งสองอย่างดังกล่าว จะทำให้อัตราขยายของวงจรนี้มีค่าเท่ากับ 1 กรณี $R_f = 0$ (ต่อลัดวงจร) และ $R_1 = \infty$ (หรือเปิดวงจร) รูปที่ 7.8 ก) จะเขียนได้เป็นวงจรดังรูปที่ 7.8 ข) ซึ่งเรียกว่า **วงจรตามแรงดัน (Voltage Follower)** เพราะแรงดันด้านขาออก จะมีค่าเดียวกับแรงดันด้านขาเข้า นั่นคือ

$$V_O = V_i \quad (7.12)$$

เนื่องจากออปแอมป์มีค่าความต้านทานหรืออิมพีแดนซ์ด้านขาเข้าสูงมาก จึงใช้ประโยชน์เป็นตัวคั่นระหว่างวงจรขยายซึ่งอาจเรียกว่า **บัฟเฟอร์ (Buffer)** ใช้สำหรับแยกวงจรโดยอธิบายได้ดังรูปที่ 7.8 โดยบัฟเฟอร์จะเป็นตัวกลางกันไม่ให้วงจรทั้งสองกวนซึ่งกันและกันและยังช่วยไม่ให้วงจรขึ้นถัดไปกินกำลัง (**Loading**) วงจรแรกอีกด้วย



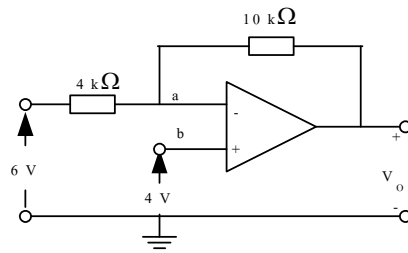
ก)



ข)

รูปที่ 7.8 วงจรตามแรงดันหรือบัฟเฟอร์ใช้แยกวงจรแต่ละขั้นออกจากกัน

ตัวอย่างที่ 7.5 จากรูปวงจรที่ 7.9 อยากทราบว่าแรงดันด้านขาออก V_O มีค่ากี่โวลต์



รูปที่ 7.9

วิธีคิด **วิธีที่ 1** ใช้วิธีซูเปอร์โพสิชัน (คิดผลของแหล่งจ่ายสัญญาณทีละตัว)
เนื่องจาก 6 V โดยให้แหล่งจ่าย 4 โวลต์ สัณวางจร (= 0 โวลต์)

$$V_{O6V} = - \frac{10k\Omega}{4k\Omega} (6V) = -15 \text{ โวลต์}$$

เนื่องจาก 4 V โดยให้แหล่งจ่าย 6 โวลต์ สัณวางจร (= 0 โวลต์)

$$V_{O4V} = \left(1 + \frac{10k\Omega}{4k\Omega}\right)(4V) = 14 \text{ โวลต์}$$

แรงดันด้านขาออกจะได้จากผลของแรงดันแหล่งจ่ายทั้งสองรวมกันคือ

$$\begin{aligned} V_O &= V_{O6V} + V_{O4V} \\ &= -15 + 14 = -1 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

วิธีที่ 2 ใช้กฎกระแสที่จุด a

$$\frac{6 - V_a}{4 \times 10^3} = \frac{V_a - V_O}{10 \times 10^3}$$

จากรูปที่ 7.9 พิจารณาได้ว่า $V_a = V_b = 4$ โวลต์ ดังนั้นจะได้

$$\frac{6V - 4V}{4 \times 10^3} = \frac{4V - V_O}{10 \times 10^3}$$

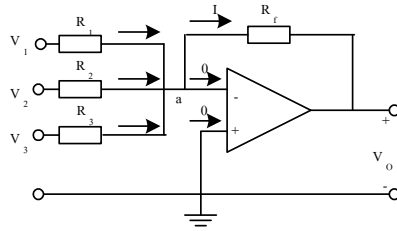
$$20 = 16 - 4V_O$$

$$4V_O = 16 - 20 = -4 \text{ โวลต์}$$

$$\therefore V_O = -4/4 = -1 \text{ โวลต์}$$

7.5 การขยายแบบรวมสัญญาณ (Summing Amplifier)

นอกจากขยายสัญญาณแล้วยังสามารถใช้ออปแอมป์ในการรวม (บวก) หรือการลบได้ด้วย สำหรับการรวมคือ การต่อวงจรออปแอมป์เพื่อรับสัญญาณด้านเข้าแล้วหลาย ๆ สัญญาณร่วมกันและสร้างเป็นค่าที่ได้ ออกมาที่ด้านออกเป็นผลรวมของค่าแรงดันของค่าด้านขาเข้า (ค่าประจำหลัก) มีลักษณะการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 7.10



รูปที่ 7.10 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ

จากรูปที่ 7.10 จะเห็นว่าวงจรขยายแบบรวมสัญญาณก็คือวงจรที่แปลงรูปมาจากวงจรขยายแบบกลับขั้ว โดยใช้ข้อดีที่รูปแบบของวงจรขยายแบบกลับขั้วสามารถใช้ได้กับจุดต่อด้านขาเข้าหลายจุดต่อในเวลาเดียวกัน เช่นที่ผ่านมาเรายังคงใช้หลักการเดิม คือถือว่าไม่มีกระแสไหลเข้าแต่ละขั้วที่ด้านเข้าของออปแอมป์ (เป็น 0) เมื่อใช้กฎกระแส KCL ที่จุด a จะได้

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (7.13)$$

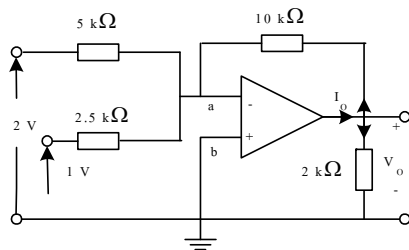
$$\text{แต่ } I = \frac{V_a - V_O}{R_f}, I_1 = \frac{V_1 - V_a}{R_1}, I_2 = \frac{V_2 - V_a}{R_2}, I_3 = \frac{V_3 - V_a}{R_3} \quad (7.14)$$

เราจะสังเกตได้ว่า $V_a = 0$ เมื่อแทนค่าในสมการ (7.14) แล้วนำไปแทนในสมการ (7.13) เราจะได้สมการแรงดันด้านขาออกดังนี้

$$V_O = - \left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3 \right) \quad (7.15)$$

สมการแสดงให้เห็นว่าแรงดันด้านขาออกเป็นผลรวมของแรงดันด้านขาเข้า เราจึงเรียกวงจรนี้ได้ว่าตัวรวม (Summer) โดยจำนวนจุดต่อรับสัญญาณด้านขาเข้าอาจมากกว่าที่กล่าวข้างต้นก็ได้

ตัวอย่างที่ 7.6 จงคำนวณหาค่าแรงดัน V_O และ กระแส I_O ของวงจรออปแอมป์ในรูปที่ 7.11



รูปที่ 7.11

วิธีคิด จากรูปที่ 7.11 พิจารณาได้ว่าเป็นวงจรขยายแบบรวมสัญญาณมีส่วนต่อเข้าสองจุด ใช้สมการที่ (7.15) เพียงสองเทอมได้

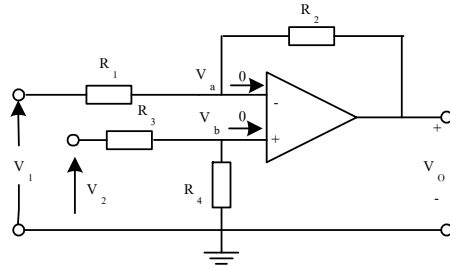
$$\begin{aligned}
 V_O &= -\left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2\right) \\
 &= -\left(\frac{10}{5}(2) + \frac{10}{2.5}(1)\right) \text{ เศษและส่วนมีหน่วย } k\Omega \text{ เหมือนกันจึงไม่เขียน} \\
 &= -(4 + 4) = -8 \text{ โวลต์}
 \end{aligned}$$

กระแส I_O เป็นผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน 10 และ 2 กิโลโอห์ม ซึ่งมีแรงดันคร่อมเท่ากับ $V_O = -8$ โวลต์ และ จะเห็นว่าแรงดัน $V_a = V_b = 0$ เนื่องจากแรงดันแตกต่างกัน้อยมากจนถือว่าไม่มีและจุด b ต่อลงกราวด์ ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned}
 I_O &= I_{10k} + I_{2k} \\
 &= \frac{V_O - 0}{10} + \frac{V_O - 0}{2} \\
 &= -0.8 - 0.4 = -1.2 \text{ มิลลิแอมป์}
 \end{aligned}$$

7.6 การขยายผลต่าง (Difference Amplifier)

การขยายผลต่าง คือวงจรที่ใช้ในการขยายความแตกต่างของสัญญาณระหว่างขาต้านเข้าทั้งสอง ซึ่งจะตรงข้ามกับหัวข้อการขยายแบบรวมสัญญาณที่กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ยังมีลักษณะคล้ายหรือเกี่ยวข้องกับการขยายสำหรับเครื่องมือวัด (Instrumentation Amplifier) อันเป็นวงจรถ่ายที่มีประโยชน์และนิยมใช้มาก



รูปที่ 7.12 การขยายผลต่าง

พิจารณาจากรูปที่ 7.12 และใช้ข้อกำหนดของออปแอมป์ที่กล่าวว่ามีกระแสไหลเข้า (ศูนย์:0) ขั้วต้านขาเข้าของออปแอมป์ เช่น เดิมเราประยุกต์ใช้กฎกระแส KCL ที่จุด a เขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{V_1 - V_a}{R_1} = \frac{V_a - V_O}{R_2}$$

หรือ
$$V_O = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) V_a - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (7.16)$$

ที่จุด b ใช้กฎกระแส KCL จะได้

$$\frac{V_2 - V_b}{R_3} = \frac{V_b - 0}{R_4}$$

หรือ
$$V_b = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 \quad (7.17)$$

เมื่อ $V_a = V_b$ แทนสมการ (7.17) ลงในสมการ (7.16) จะได้สมการ

$$V_O = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1$$

หรือ
$$V_O = \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{\frac{R_1}{R_2} + 1}{\frac{R_3}{R_4} + 1} \right) V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (7.18)$$

เมื่อแรงดัน $V_1 = V_2$ วงจรถ่ายต้องให้แรงดันด้านขาออก $V_O = 0$ ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติของวงจรที่ขจัดสัญญาณร่วม (Reject a Signal Common) ที่ขาต้านเข้าทั้งสอง ซึ่งจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวและ

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (7.19)$$

นั่นคือ เมื่อวงจรเป็นการขยายผลต่างสมการ (7.18) จะกลายเป็น

$$\begin{aligned} V_O &= \frac{R_2}{R_1} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \\ &= \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \end{aligned} \quad (7.20)$$

ถ้ากำหนดให้ $R_1 = R_2$ และ $R_3 = R_4$ วงจรการขยายความแตกต่างจะกลายเป็น ตัวลบ (Subtractor) สัญญาณ ซึ่งมีแรงดันด้านขาออกเป็น

$$V_O = (V_2 - V_1) \quad (7.21)$$

ตัวอย่างที่ 7.7 จงออกแบบวงจรออปแอมป์เมื่อมีแรงดันด้านขาเข้าเป็น V_1 และ V_2 แล้วให้แรงดันด้านขาออกเป็น

$$V_O = -5V_1 + 3V_2$$

วิธีคิด **วิธีที่ 1** ใช้วงจรออปแอมป์ตัวเดียวเหมือนกันรูปที่ 7.12 เปรียบเทียบสมการของโหนดกับสมการ (7.18)

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad \frac{R_2}{R_1} &= 5 \\ R_2 &= 5 R_1 \end{aligned}$$

ทำนองเดียวกัน

$$\frac{R_2}{R_1} \left(\frac{\frac{R_1}{R_2} + 1}{\frac{R_3}{R_4} + 1} \right) = 3$$

$$5 \left(\frac{\frac{R_1}{R_2} + 1}{\frac{R_3}{R_4} + 1} \right) = 3$$

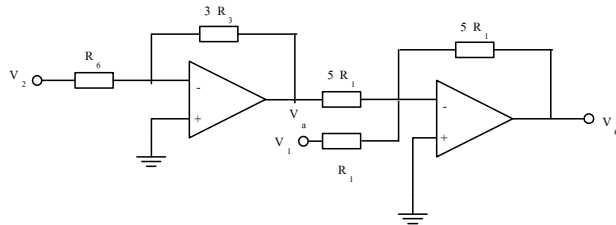
$$\frac{\frac{6}{5}}{\frac{R_3}{R_4} + 1} = \frac{3}{5}$$

$$\frac{R_3}{R_4} + 1 = \frac{6}{3} = \frac{5}{5}$$

$$\frac{R_3}{R_4} = 1$$

นั่นคือ $R_3 = R_4$ ดังนั้น ถ้าเลือก $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ และ $R_3 = 20 \text{ k}\Omega$ จะได้ $R_2 = 50 \text{ k}\Omega$ และ $R_4 = 20 \text{ k}\Omega$ ตรงตามสมการที่โจทย์ต้องการคือ $V_O = -5V_1 + 3V_2$

วิธีที่ 2 ถ้าใช้ออปแอมป์มากกว่า 1 ตัว อาจได้จากการใช้การขยายกลับขั้วร่วมกับการขยายแบบรวมสัญญาณที่มีสองอินพุตดังรูปที่ 7.13



รูปที่ 7.13

พิจารณาที่ตัวรวมสัญญาณ

$$V_O = -V_a - 5V_1$$

พิจารณาที่ตัวขยายแบบกลับขั้ว

$$V_a = -3V_2$$

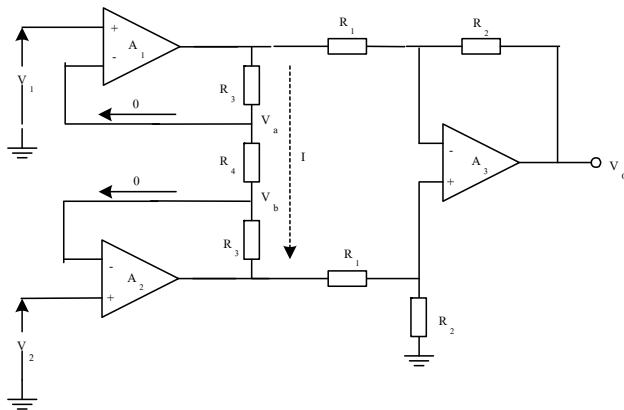
รวมทั้งสองสมการด้วยกันจะได้

$$V_O = 3V_2 - 5V_1$$

ซึ่งเป็นไปตามที่ต้องการ ถ้าเลือก $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ และ $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ หรือ $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$

ตัวอย่างที่ 7.8 Instrumentation Amplifier แสดงดังรูปที่ 7.14 เป็นวงจรรขยายสำหรับสัญญาณค่าต่ำ ๆ ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ หรือการประยุกต์ใช้ด้านการวัด และในทางการค้าเราสามารถหาใช้ได้โดยจะทำการเป็นอุปกรณ์ชุดเดียวกัน (รวมเป็นอุปกรณ์ 1 ตัว) จากรูปที่ 7.14 จงแสดงให้เห็นว่า

$$V_O = \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{2R_3}{R_4} + 1 \right) (V_2 - V_1)$$



รูปที่ 7.14

วิธีคิด จากรูป A_3 คือวงจรรขยายความแตกต่างหรือวงจรรขยายผลต่าง ดังนั้นเขียนสมการแรงดันค่านำออก V_O ได้

$$V_O = \frac{R_2}{R_1} (V_{O2} - V_{O1})$$

เมื่อพิจารณาว่าไม่มีกระแสไหลเข้าออปแอมป์ A_1 และ A_2 กระแส I จะไหลผ่านความต้านทาน 3 ตัวที่อนุกรมกันอยู่ ดังนั้น

$$\begin{aligned} V_{O2} - V_{O1} &= I(R_3 + R_4 + R_3) \\ &= I(2R_3 + R_4) \end{aligned}$$

แต่ $I = \frac{V_a - V_b}{R_4}$

และ $V_a = V_1, V_b = V_2$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R_4}$$

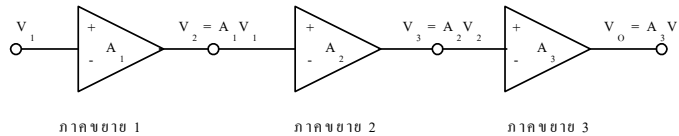
แทนค่า $V_{O1} - V_{O2}$ ด้วย $I(R_3 + R_4 + R_3)$ และแทน I ด้วย $\frac{V_1 - V_2}{R_4}$ ลงในสมการ

$$V_O = \frac{R_2}{R_1} (V_{O2} - V_{O1})$$

จะได้สมการตามโจทย์ที่ต้องการคือ

$$V_O = \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{2R_3}{R_4} + 1 \right) (V_2 - V_1)$$

วงจรแคสเคดออปแอมป์ (Cascaded Op-Amp Circuits)



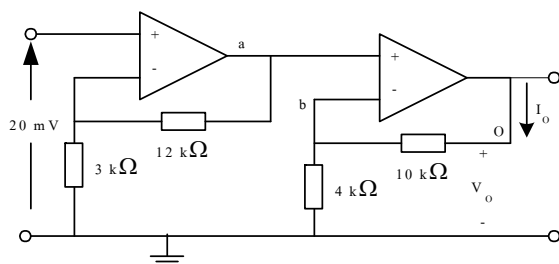
รูปที่ 7.15 บล็อกไดอะแกรมการต่อแบบแคสเคด 3 ภาค

การต่อแบบแคสเคดคือการนำเอาอุปกรณ์มาต่อเรียงลำดับกัน เช่น วงจรขยายหลายภาคจะเริ่มจากภาคที่ 1 โดยต่อขั้วด้านขาออกของภาคที่ 1 เข้ากับอินพุตของภาคที่ 2 เป็นต้น วงจรออปแอมป์ก็เช่นกัน สามารถนำมาต่อเรียงกันเป็นภาค ๆ ได้เหมือนกันเรียกว่าวงจรแคสเคดออปแอมป์ ซึ่งในทางปฏิบัติมีความจำเป็นต้องต่อวงจรแบบแคสเคดเพื่อให้ได้อัตราขยายรวมมีค่าใหญ่ขึ้น โดยอัตราขยายรวมของการต่อจะได้จากผลคูณของอัตราขยายของแต่ละภาค เขียนเป็นสมการได้คือ

$$A = A_1 A_2 A_3 \tag{7.22}$$

ออปแอมป์แต่ละตัวที่ต่อกันแบบแคสเคดจะเรียกว่า ภาค (Stage) สัญญาณด้านเข้าจะถูกขยายด้วยอัตราขยายของแต่ละภาค เนื่องจากออปแอมป์มีข้อดี คือ มีอินพุตอิมพีแดนซ์สูงถึงอนันต์ขั้วด้านขาออกอิมพีแดนซ์ต่ำถึงศูนย์ (อุดมคติ) ทำให้สามารถต่อแคสเคดกันได้โดยไม่ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและขั้วด้านขาออกของแต่ละส่วนเปลี่ยนไป แต่อย่างไรก็ตามต้องระวังในการออกแบบของออปแอมป์ในทางปฏิบัติ โดยต้องระวังการโหลดของภาคถัดไปที่จะทำให้ออปแอมป์อิ่มตัว

ตัวอย่างที่ 7.9 จากรูปวงจร รูปที่ 7.16 จงหาแรงดันและกระแสต้านขาออก V_O, I_O



รูปที่ 7.16

วิธีคิด จากรูปพิจารณาได้ว่าเป็นวงจรขยายแบบไม่กลับขั้วสองชุดต่อแคสเคดกัน ที่ด้านขาออกของชุดแรกคือ

$$V_a = \left(\frac{12}{3} + 1 \right) (20) = 100 \text{ มิลลิโวลต์}$$

ที่ด้านขาออกของออปแอมป์ชุดที่ 2 คือ

$$\begin{aligned} V_O &= \left(\frac{10}{4} + 1 \right) (V_a) \\ &= \left(\frac{10}{4} + 1 \right) (100) = 350 \text{ มิลลิโวลต์} \end{aligned}$$

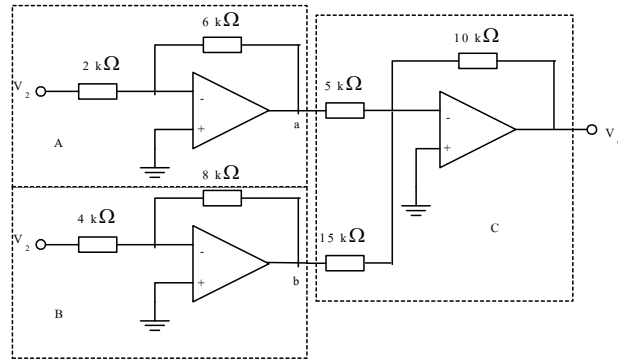
กระแสต้านขาออก I_O คือกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน $10 \text{ k}\Omega$ นั่นคือ

$$I_O = \frac{V_O - V_b}{10 \times 10^3} \text{ แอมแปร์}$$

แต่ $V_b = V_a = 100$ มิลลิโวลต์ ดังนั้นจะได้

$$I_O = \frac{(350 - 100) \times 10^{-3}}{10 \times 10^3} = 25 \text{ ไมโครแอมป์}$$

ตัวอย่างที่ 7.10 จากรูปที่ 7.17 จงหาค่า V_O เมื่อ $V_1=1$ โวลต์ และ $V_2=2$ โวลต์



รูปที่ 7.17

วิธีคิด วงจรประกอบด้วยวงจรขยายกลับขั้วสองชุดคือ A และ B และ ตัวรวมสัญญาณ C อันดับแรกเราจะหาแรงดันด้านขาออกของวงจรขยายกลับขั้วก่อนคือ

$$V_a = -\frac{6}{2}(V_1) = -3(1) = -3 \text{ โวลต์}$$

$$V_b = -\frac{8}{4}(V_2) = -2(2) = -4 \text{ โวลต์}$$

ทั้งแรงดัน V_a และ V_b เป็นแรงดันด้านขาเข้าของวงจรรวมสัญญาณ ดังนั้นแรงดันด้านขาออกจะเป็น

$$\begin{aligned} V_O &= -\left(\frac{10}{5}V_a + \frac{10}{15}V_b\right) \\ &= -\left[2(-3) + \frac{2}{3}(-4)\right] = 8.333 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

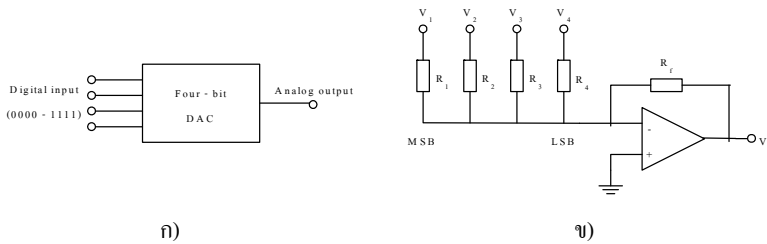
7.7 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้

7.7.1 ตัวเปลี่ยนดิจิตอลเป็นอนาลอก (Digital-to-Analog Converter)

ตัวแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอกหรือเขียนย่อ DAC คือตัวเปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลให้อยู่ในรูปของสัญญาณอนาลอก ในที่นี้จะยกตัวอย่างเป็น DAC ขนาด 4 บิต ดังแสดงในรูปที่ 7.18 โดยที่ DAC 4 บิต สามารถทำได้หลายวิธี ง่ายคือแบบ Binary Weighted Ladder รูปที่ 7.18 ข) แต่ละบิตจะมีค่าน้ำหนัก (คล้ายค่าในระบบเลขที่เราคุ้นเคย คือ หลักหน่วย สิบ ร้อย เป็นต้น) เรียงตามค่าของ R_i/R_n ซึ่งบิตที่ต่ำกว่าจะมีขนาดน้ำหนักลดเป็นครึ่งหนึ่งของบิตที่มีลำดับติดกันที่สูงกว่า ในที่นี้จะสังเกตได้ว่าเป็นวงจรขยายแบบรวมสัญญาณกลับขั้ว ค่าแรงดันด้านขาออกจะสัมพันธ์กับค่าแรงดันด้านขาเข้าดังนี้

$$-V_O = \left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3 + \frac{R_f}{R_4} V_4 \right) \quad (7.23)$$

เราเรียกแรงดันด้านขาเข้า V_1 เป็นบิตที่มีนัยสำคัญสูงสุด (Most Significant Bit : MSB) และ V_4 เป็นบิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุด (Least Significant Bit : LSB) แต่ละบิตของทั้งสี่บิตด้านขาเข้าจะสมมติให้ระดับแรงดันซึ่งจะมีค่าเท่าใดนั้น ขึ้นกับค่าที่ใช้ในทางปฏิบัติจะมีระดับแรงดันเป็น 0 ถึง ± 5 โวลต์ แต่จะกำหนดให้เป็นระดับลอจิก 0 และ 1 (On และ Off) และหากเลือกค่าความต้านทานป้อนกลับได้เหมาะสม DAC จะให้แรงดันด้านขาออกแปรเป็นสัดส่วนกับสัญญาณด้านขาเข้า



รูปที่ 7.18 DAC 4 บิต ก) แผนภาพกล่อง ข) วงจรไบพolariแลตเตอร์

ตัวอย่างที่ 7.11 จากรูปที่ 7.18 กำหนดให้ $R_f = 10$, $R_1 = 10$, $R_2 = 20$, $R_3 = 40$ และ $R_4 = 80$ k Ω ตามลำดับ ให้หาขนาดแรงดันด้านขาออกเมื่อระดับลอจิกด้านขาเข้าเป็น [0000], [0001], [0010], ..., [1111]

วิธีคิด แทนค่าด้านขาเข้าที่กำหนดให้และค่าความต้านทานป้อนกลับลงในสมการ (7.23) จะได้

$$\begin{aligned} -V_O &= \left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3 + \frac{R_f}{R_4} V_4 \right) \\ &= V_1 + 0.5 V_2 + 0.25 V_3 + 0.125 V_4 \end{aligned}$$

แทนค่าแรงดันด้านขาเข้าด้วยระดับลอจิก 1 หรือ 0 ตามที่กำหนด เช่น [0000] คือ $[V_1 V_2 V_3 V_4]$ มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อแทนลงในสมการจะได้แรงดันด้านขาออกเป็นศูนย์ (0) ทำไปจนครบที่โจทย์กำหนดจะได้ค่าดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 ค่าด้านขาเข้าและค่าด้านขาออกของ DAC ขนาด 4 บิต

Binary	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111
- V_O	0	0.125	0.25	0.375	0.5	0.625	0.75	0.875
Binary	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1111	
- V_O	1.0	1.125	1.25	1.375	1.5	1.625	1.875	

จากตารางสรุปผลการคำนวณค่าการแปลงจากดิจิตอลเป็นค่าอนาลอก จะเห็นว่าแต่ละบิตจะมีค่าเทียบเท่าแรงดัน 0.123 โวลต์ ดังนั้นเราจะไม่สามารถแสดงค่าที่อยู่ระหว่างค่าที่ติดกัน เช่น 1.0000 และ 1.125 โวลต์ได้ เพราะความละเอียดของ 4 บิตจำกัดเพียงขั้นละ 0.125 เท่านั้น ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่สำคัญของการแปลงจากดิจิตอลเป็นอนาลอก หากต้องการความละเอียดเพิ่มขึ้นจะต้องเพิ่มจำนวนบิต (ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ในหัวข้อการแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอกแล้ว) แต่อย่างไรก็ยังคงไม่ได้ค่าอนาลอกที่แท้จริง แต่แม้กระนั้นก็ได้มีการใช้ดิจิตอลประสบความสำเร็จในงานต่าง ๆ ได้อย่างน่าทึ่ง เช่น ซีดีเพลง และรูปภาพดิจิตอล เป็นต้น

7.7.2 การขยายสำหรับเครื่องมือวัด (Instrumentation Amplifier)

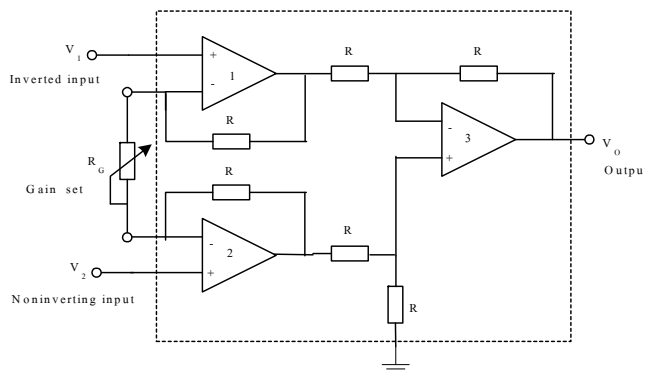
Instrumentation Amplifier (IA) เป็นวงจรรวมออปแอมป์สำหรับการวัดและกระบวนการควบคุมที่มีความถูกต้องสูง ที่เรียกชื่อแบบนี้เพราะว่ามีการใช้ในระบบการวัดอย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น ประยุกต์ใช้ IA ทั้งเป็นวงขยายเดี่ยว ๆ ขยายค่าแรงดันของเทอร์โมคัปเปิล และระบบการบันทึกข้อมูลต่าง (Data Acquisition System) เป็นต้น

Instrumentation Amplifier เป็นส่วนขยายของการขยายความแตกต่าง โดยที่ IA ก็ขยายความแตกต่างของสัญญาณระหว่างขั้วด้านขาเข้า ดังแสดงวงจรในรูปที่ 7.14 (ตัวอย่างที่ 7.8) ดันแบบจะประกอบด้วยออปแอมป์ 3 ตัว และความต้านทานอีก 7 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 7.19 ก) โดยใช้ความต้านทาน R_G ต่อภายนอกระหว่างขั้วสำหรับตั้งค่าอัตราขยาย ส่วนรูปที่ 7.19 ข) แสดงสัญลักษณ์ และในตัวอย่างที่ 7.8 ได้แสดงให้เห็นว่า

$$V_O = A_V(V_2 - V_1) \tag{7.24}$$

เมื่ออัตราขยายแรงดันคือ

$$A_V = 1 + \frac{2R}{R_G} \tag{7.25}$$



รูปที่ 7.19

ตัวอย่างที่ 7.13 จากรูปที่ 7.19 กำหนดให้ $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $V_1 = 2.011$ โวลต์ และ $V_2 = 2.017$ โวลต์ ถ้า R_G ปรับไว้ที่ 500Ω จงหา

ก) อัตราขยายแรงดัน

ข) แรงดันด้านขาออก V_O

วิธีคิด ก) อัตราขยายแรงดัน

$$\begin{aligned} A_V &= 1 + \frac{2R}{R_G} \\ &= 1 + \frac{2 \times 10,000}{500} = 41 \end{aligned}$$

ข) แรงดันด้านขาออก V_O

$$\begin{aligned} V_O &= A_V(V_2 - V_1) \\ &= 41(2.017 - 2.011) = 246 \text{ มิลลิโวลต์} \end{aligned}$$

Instrumentation Amplifier ขยายสัญญาณแรงดันรบกวนค่าต่ำที่มีแรงดัน โหมคร่วมขนาดใหญ่ เมื่อแรงดัน โหมคร่วมมีค่าเท่ากันจะหักล้างกันหมดไป (Cancel) IA มีลักษณะสมบัติหลัก ๆ 3 ประการคือ

1. อัตราขยายสามารถปรับได้ด้วยความต้านทานภายนอก R_G
2. อิมพีแดนซ์ด้านขาเข้ามีค่าสูง ไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราขยายที่ปรับ
3. แรงดันด้านออก V_O ขึ้นกับความแตกต่างระหว่าง V_1 และ V_2 ด้านขาเข้า ซึ่งจะไม่นับกับแรงดัน

โหมคร่วม

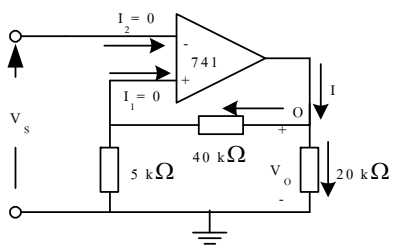
เนื่องจากมีการใช้งาน IA อย่างกว้างขวาง ผู้ผลิตจึงทำการรวมวงจรให้เป็นแพคเกจกันทำให้ง่ายต่อการใช้งานมากขึ้น ตัวอย่างเช่น IA แบบ LH0036 ซึ่งพัฒนาโดยบริษัทเนชั่นแนลเซมิคอนดักเตอร์ สามารถใช้การปรับอัตราขยายด้วยความต้านทานภายนอกซึ่งอาจมีค่าตั้งแต่ 100 ถึง 10 กิโลโอห์มเพียงตัวเดียวต่อเพื่อปรับอัตราขยายโดยสามารถปรับได้ตั้งแต่ 1 ถึง 1,000 เป็นต้น ซึ่งจะเห็นว่าสะดวกต่อการใช้งานมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ผู้ใช้ก็ยังคงต้องศึกษาหลักการพื้นฐานเพื่อใช้ทำความเข้าใจหรือแก้ปัญหาอันอาจเกิดขึ้นได้ให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

สรุป

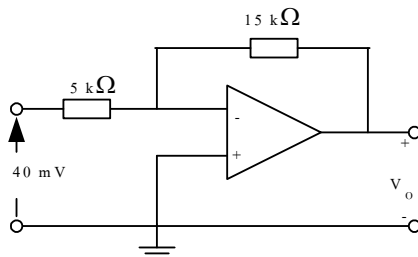
ออปแอมป์มีอัตราขยายสูง มีความต้านทานอินพุตสูงและความต้านทานด้านขั้วด้านขาออกต่ำ ออปแอมป์ในอุดมคติ (เชิงทฤษฎี) มีความต้านทานอินพุตเป็นอนันต์ ส่วนด้านขั้วด้านขาออกมีความต้านทานเป็นศูนย์และมีอัตราขยายเป็นอนันต์ด้วย ในกรณีอุดมคติจะไม่มีกระแสไหลเข้าที่ขาอินพุตทั้งสองขา และแรงดันแตกต่างกันระหว่างขาอินพุตทั้งสองมีค่าน้อยมากจนละทิ้งไม่นำมาคิดได้ เมื่อต่อเป็นวงจรขยายกลับขั้ว แรงดันด้านขั้วด้านขาออกจะมีขนาดหลายเท่าของอินพุตและเป็นบวก ในวงจรตามแรงดันแรงดันด้านขั้วด้านขาออกจะมีค่าเท่ากับด้านอินพุต สำหรับวงจรรวมสัญญาณจะได้ขั้วด้านขาออกที่เป็นผลรวมของค่าน้ำหนักของแต่ละอินพุต วงจรขยายความต่างจะได้ขั้วด้านขาออกที่เป็นสัดส่วนกับแรงดันผลต่างของอินพุตทั้งสอง วงจรออปแอมป์อาจต่อแยกกัน (Cascaded) โดยที่ความสัมพันธ์ของอินพุตและขั้วด้านขาออกไม่เปลี่ยนแปลง และสุดท้ายของหน่วยนี้ได้ยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้ ได้กล่าวถึงตัวแปลงดิจิทัลเป็นอนาลอกและวงจรขยายเครื่องมือวัด (Instrumentation Amplifier) เพื่อให้มองเห็นแนวทางในการใช้งานออปแอมป์ต่อไป

แบบฝึกหัดหน่วยที่ 7

1. ถ้าออปแอมป์ 741 มีอัตราขยายแรงดันเปิด 2×10^5 มีความต้านทานขั้วด้านขาเข้า 2 เมกะโอห์ม ความต้านทานขั้วด้านขาออก 50 โอห์ม ต่อวงจรดังรูปที่ บฝ._7.1 จงคำนวณหาอัตราขยายวงรอบปิด V_o/V_s และหาค่า I_o เมื่อ $V_s = 1 \text{ V}$ (ตอบ 9.0041 และ -362 มิลลิแอมป์)



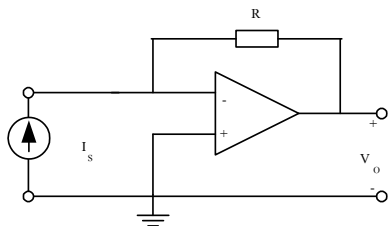
รูปที่ บฝ._7.1



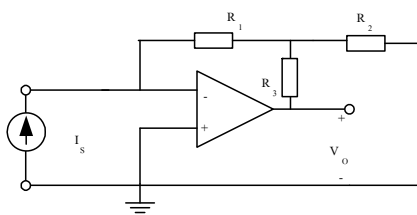
รูปที่ บฝ._7.2

2. หาขั้วด้านขาออกของออปแอมป์รูปที่ บฝ._7.2 และคำนวณหากระแสผ่านความต้านทานป้อนกลับ (ตอบ -120 มิลลิโวลต์ และ 8 ไมโครแอมป์)

3. จากรูปการเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันรูปที่ บฝ._7.3 จงแสดงให้เห็นว่า $\frac{V_o}{I_s} = -R$



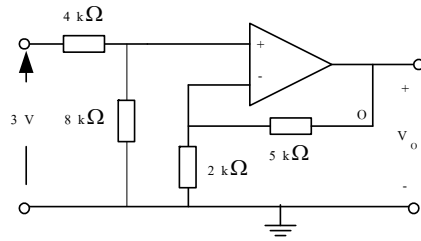
รูปที่ บฝ._7.3



รูปที่ บฝ._7.4

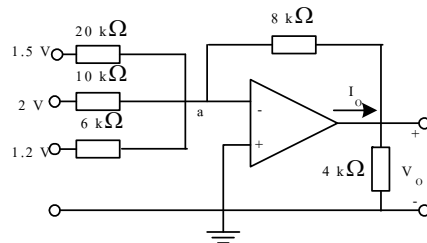
4. จากรูปตัวแปลงกระแสเป็นแรงดันรูปที่ บฝ._7.4 จงพิสูจน์ว่า $\frac{V_o}{I_s} = -R_1 \left(1 + \frac{R_3}{R_1} + \frac{R_3}{R_2} \right)$

5. จากรูปที่ บฝ._7.5 จงคำนวณหา V_o (ตอบ 7 โวลต์)



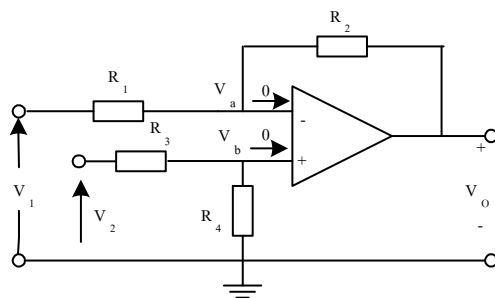
รูปที่ บฝ._7.5

6. จากรูปที่ บฝ._7.6 ให้หาค่า V_o และ I_o (ตอบ -3.8 โวลต์ และ -1.425 มิลลิแอมป์)



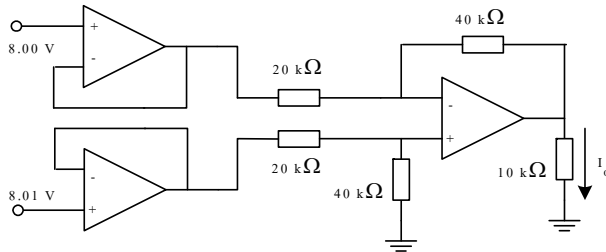
รูปที่ บฝ._7.6

7. ออกแบบการขยายแบบผลต่าง เพื่อให้ได้ค่าอัตราขยายเป็น 4 เท่า
(ตอบ $R_1 = R_3 = 10$ กิโลโอห์ม และ $R_2 = R_4 = 40$ กิโลโอห์ม)



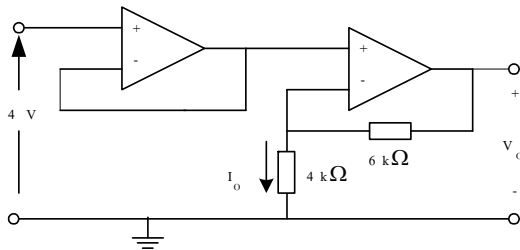
รูปที่ บฝ._7.7

8. จากรูปที่ บฝ._7.8 จงหาค่ากระแสต้านขั้วด้านขาออก I_o (ตอบ 2 ไมโครแอมป์)



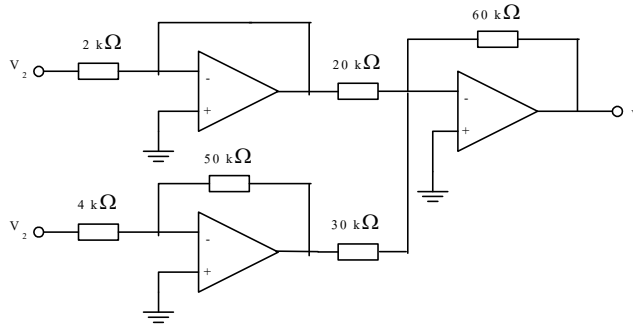
รูปที่ บฝ._7.8

9. จากรูปที่ บฝ._7.9 จงหาค่าแรงดันคั่นด้านขาออก V_o และกระแสคั่นด้านขาออก I_o (ตอบ 10 โวลต์ และ 1 มิลลิแอมป์)



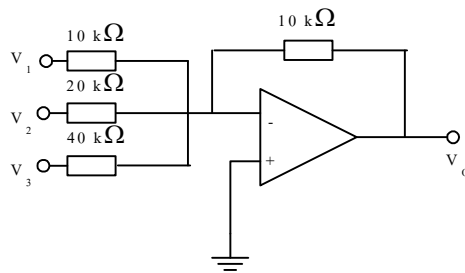
รูปที่ บฝ._7.9

10. จากรูปที่ บฝ._7.10 ถ้าแรงดัน $V_1 = 2$ โวลต์ และ $V_2 = 1.5$ โวลต์ จงหาแรงดันขั้วด้านขาออก V_o (ตอบ 9 โวลต์)



รูปที่ บฝ._7.10

11. วงจรแปลง DAC ขนาด 3 บิตดังรูปที่ บฝ._7.11



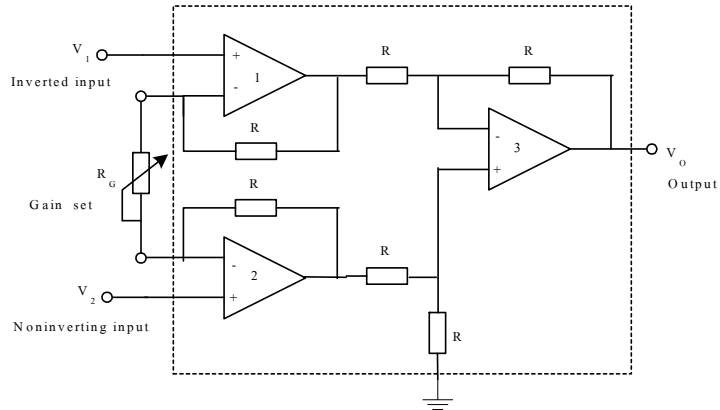
รูปที่ บฝ._7.11

จงหา

- ก) ขนาดแรงดันด้านขาออก $|V_o|$ เมื่อ $[V_1 V_2 V_3] = [0 1 0]$
 ข) แรงดัน $|V_o|$ ถ้า $[V_1 V_2 V_3] = [1 1 0]$
 ค) ถ้าต้องการ $|V_o| = 1.25$ โวลต์ จะใช้แรงดัน $[V_1 V_2 V_3]$ เท่าไร
 ง) เพื่อให้ได้ $|V_o| = 1.75$ โวลต์ จะใช้แรงดัน $[V_1 V_2 V_3]$ เท่าไร

ตอบ ก) 0.5 โวลต์ ข) 1.5 โวลต์ ค) [1 0 1] ง) [1 1 1]

12. จงหาค่าของความต้านทานภายนอก R_G ที่ใช้สำหรับตั้งอัตราขยายของ IA ในรูปที่ บฝ._7.12 เพื่อให้ได้ อัตราขยายเป็น 142 เมื่อ R มีค่าเท่ากับ 25 กิโลโอห์ม (ตอบ 354.6 โอห์ม)



รูปที่ บฝ._7.12

