หน่วยที่ 7
ออปแอมป์

บทนำ

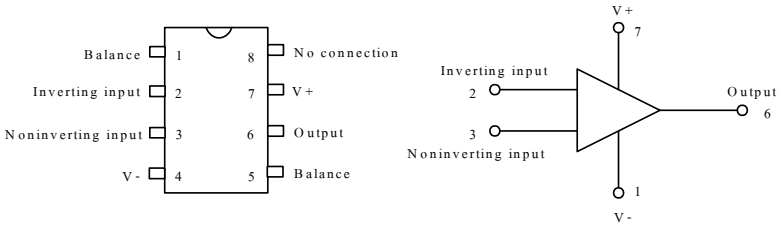
งานด้านวิศวกรรมเป็นการประยุกต์หลักการทางฟิสิกส์มาใช้เพื่อออกแบบอุปกรณ์สำหรับอำนวยประโยชน์ (ความสะดวก) ให้กับมนุษย์ แต่หลักการทางฟิสิกส์ดังกล่าวจะไม่มีประโยชน์เลยถ้าไม่มีการวัด ในความเป็นจริงนักฟิสิกส์มักกล่าวเสมอว่า ฟิสิกส์เป็นวิทยาศาสตร์ที่วัดความเป็นจริง ดังนั้นการวัดจึงถือว่าเป็นเครื่องมือสำหรับทำความเข้าใจเกี่ยวกับฟิสิกส์ เครื่องมือวัด (Instruments) เป็นเครื่องมือสำหรับใช้ในการวัด สำหรับออปแอมป์เป็นบล็อกหนึ่งของเครื่องมือวัดไฟฟ้าสมัยใหม่ ดังนั้นการศึกษาหลักการพื้นฐานของออปแอมป์จึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะสำหรับผู้ศึกษาทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า การมีทักษะในการปฏิบัติงานเกี่ยวกับเครื่องมือวัดดิจิตอลและอนาลอกยิ่งมีความสำคัญมาก เช่น ในเครื่องมือวัดต่าง ๆ รวมถึงแอมมิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ โอห์มมิเตอร์ ออสซิลโลสโคป สเปกตรัม อนาไลเซอร์ และเครื่องกำเนิดสัญญาณ เป็นต้น

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

7.1 ออปแอมป์

ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจัดวางอุปกรณ์ภายในอย่างซับซ้อน อันประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐานต่าง ๆ หลายอย่าง เช่น ความต้านทาน ทรานซิสเตอร์ คาปาซิเตอร์ และไดโอดเป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงออปแอมป์ในลักษณะของบล็อกของวงจร และการต่อขั้วภายนอกเพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นในการประยุกต์ใช้งานในการวิเคราะห์และใช้งานในทางปฏิบัติเท่านั้นจะไม่กล่าวถึงวงจรภายในอย่างละเอียด

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



ก) ข)

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 ตัวอย่างพิสัยพารามิเตอร์ของออปแอมป์

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 จะมีแรงดันแตกต่างเกิดขึ้นระหว่างขั้วด้านขาเข้าทั้งสอง V_d เมื่ออัตราขยายวงรอบเปิด (A) มีค่ามาก 10^5 ถึง 10^8 เท่า จะทำให้ได้แรงดันขั้วด้านขาออกมีค่าเท่ากับผลคูณของ V_d กับอัตราขยายวงรอบเปิดได้ค่าแรงดันขั้วด้านขาออกที่สูงมาก ซึ่งทางปฏิบัติจะสูงสุดได้ไม่เกินแรงดันแหล่งจ่าย โดยปกติจะมีค่าแรงดันแหล่งจ่ายสำหรับแหล่งจ่ายบวกลบประมาณ ± 15 โวลต์ ดังนั้นแรงดันด้านขั้วด้านขาออกจะมี

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

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

V_d = แรงดันแตกต่างระหว่างขาด้านเข้ากลับขั้ว (-) และขาด้านเข้าไม่กลับขั้ว (+)

V_2 = แรงดันระหว่างขาด้านเข้าไม่กลับขั้ว (+) กับกราวน์

V_1 = แรงดันระหว่างขาด้านเข้ากลับขั้ว (-) กับกราวน์

และแรงดันด้านออก (Output) จะได้จากสมการ

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

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

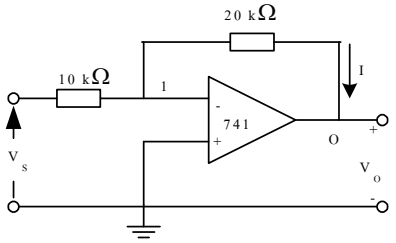
V_O = แรงดันด้านออก

A = อัตราขยายวงรอบเปิด (Open Loop Voltage Gain)

V_{CC} = แรงดันแหล่งจ่าย

ออปแอมป์อาจพิจารณาได้ว่าเป็นวงจรขยายแรงดันที่มีอัตราขยายสูงมาก 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 $R_I = 2$ เมกกะโอห์ม ความต้านทานด้านออก $R_O = 50$ โอห์ม ต่ออุปกรณ์ภายนอกเป็นวงจรดังรูปที่ 7.2 จงหาค่า อัตราขยายวงปิด (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

$$\frac{V_S - V_1}{10\times10^3} = \frac{V_1}{2\times10^6} + \frac{V_1 - V_O}{20\times10^3}$$

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

$$\frac{V_1 - V_O}{20\times10^3} = \frac{V_O - AV_d}{50}$$

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

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

จาก $V_1 = (2V_S + V_O)/3 = (4 - 3.9999398)/3$

และ $I = \frac{V_1 - V_O}{20\times10^3} = 0.1999$ มิลลิแอมป์

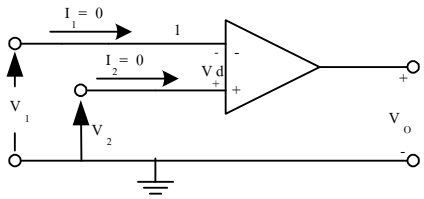
7.2 ออปแอมป์ในเชิงทฤษฎี[1] (Ideal Op-Amp)

เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจวงจรออปแอมป์ เราจะสมมติให้ออปแอมป์เป็นแบบเชิงทฤษฎี โดยมีลักษณะดังนี้

1. มีอัตราขยายวงเปิด $A = \infty$
2. มีความต้านทานด้านเข้า $R_I = \infty$
3. มีความต้านทานด้านออก $R_O = 0$

[1] เชิงทฤษฎี ในตำราหลายเล่มใช้คำว่า อุดมคติ ซึ่งมีความหมายเหมือนกัน

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



รูปที่ 7.3 ออปแอมป์เชิงทฤษฎี

จากรูปที่ 7.3 จะกำหนดให้ออปแอมป์มีลักษณะสมบัติสำคัญ 2 ข้อคือ

1. ไม่มีกระแสไหลเข้าหรือออกจากขั้วด้านขาเข้าทั้งสอง นั่นคือ

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

2. แรงดันแตกต่างระหว่างขั้วด้านขาเข้าทั้งสองมีค่าน้อยมากไม่นำมาคิด นั่นคือ

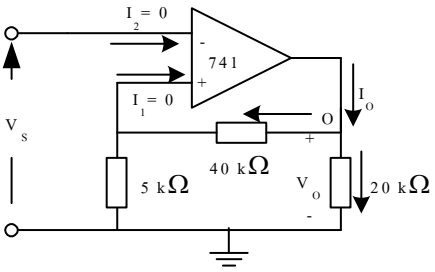
$$V_d = V_2 - V_1 = 0 \tag{7.5}$$

หรือ

$$V_1 = V_2 \tag{7.6}$$

ซึ่งทั้งสองข้อดังกล่าวคือ 1 ไม่มีกระแสไหลเข้าขั้วด้านขาเข้าทั้งสอง เนื่องจากความต้านทานด้านขั้วขาเข้ามีค่าสูงมากและข้อ 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 กิโลโอห์มจะเป็นค่าเดียวกันซึ่งหาได้จาก

$$I = I_{5k\Omega} = \frac{V_S}{5\times10^3} = 0.2 \text{ มิลลิแอมป์}$$

แรงดัน $V_O = (I)(5k\Omega + 40k\Omega) = 9$ โวลต์

จะได้ $I_O = I + \frac{V_O}{20\times10^3}$

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

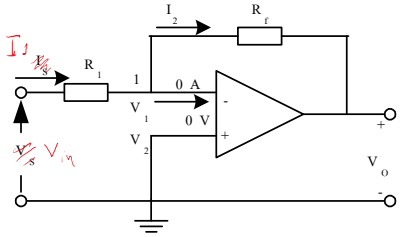
$= 0.65$ มิลลิแอมป์

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

7.3 การขยายกลับขั้ว (Inverting Ampliler)

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

ดูคลบ: Non - invertingNon – Ig



รูปที่ 7.5 การขยายแบบกลับขั้ว

พิจารณาจากรูป 7.5 โดยใช้กฎกระแส KCL ที่จุด 1 จะได้

$$I_1 = I_2$$

$$\frac{V_i - V_1}{R_1} = \frac{V_1 - V_O}{R_f} \qquad (7.7)$$

แต่ออปแอมป์ในเชิงทฤษฎีถือว่าแรงดัน $V_1 = V_2 = 0$ ดังนั้นเมื่อต่อขาไม่กลับขั้วลงกราวน์จะได้

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

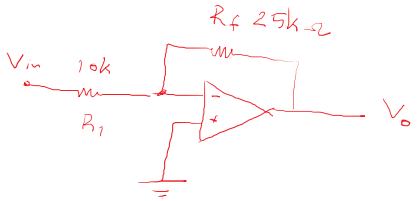
หรือ $$V_O = -\frac{R_f}{R_1} V_i \qquad (7.8)$$

อัตราขยายแรงดันคือ $A_V = \frac{V_O}{V_i} = -\frac{R_f}{R_i}$ การออกแบบวงจรดังรูปที่ 7.5 คล้ายกับคำว่า Inverter ได้มาจากเครื่องหมายลบ (-) นั่นเอง นั่นคือ การขยายแบบกลับขั้วจะกลับขั้วสัญญาณด้านขาเข้านั่นเอง และจะเห็นว่าอัตราขยายได้จากความต้านทานป้อนกลับหารด้วยความต้านทานที่ต่อด้านขาเข้า นั่นคืออัตราขยายของวงจรจะขึ้นกับอุปกรณ์ภายนอกที่ต่อเข้ากับขั้วต่าง ๆ ของออปแอมป์เท่านั้น สำหรับตัวอย่างการใช้งานวงจรขยายแบบกลับขั้ว จะนิยมใช้เป็นวงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน และวงจรกลับเฟสแรงดัน เป็นต้น

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

ก) แรงดันด้านขั้วขาออก (V_O)

ข) กระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R_1 ($10\ k\Omega$)



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

$$= -\frac{25\times10^3}{10\times10^3}(0.5\ V) = -1.25 \text{ โวลต์}$$

A = -2.5

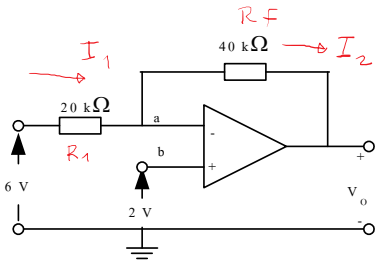
ข) กระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R_1 ($10\ k\Omega$)

$$I = \frac{V_i - 0}{R_1} = \frac{0.5V - 0}{10\times10^3}$$

$$= 50 \text{ ไมโครแอมป์}$$

$\frac{1.25}{25k} = 0.05\ mA$

ตัวอย่างที่ 7.4 จากวงจรออปแอมป์รูปที่ 7.6 แรงดันด้านออก (V_O) มีค่าเท่าไร



$I_1 = \frac{V_i - V_a}{R_1}$

$I_2 = \frac{V_a - V_o}{R_f}$

รูปที่ 7.6

$$\frac{V_i - V_a}{R_1} = \frac{V_a - V_o}{R_f}$$

$$\frac{6-2}{20k} = \frac{2-V_o}{40k}$$

$$4 = \frac{2-V_o}{2}$$

$$8 = 2 - V_o$$

$$V_o = -6\ V$$

วิธีคิด ใช้กฎกระแส KCL ที่จุด a จะได้

$$\frac{V_a - V_O}{40} = \frac{6V - V_a}{20}$$

$$V_a - V_O = 40\left(\frac{6V - V_a}{20}\right)$$

$$= 12\,V - 2\,V_a$$

$$V_O = 3V_a - 12V$$

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

$$V_O = 3(2\,V) - 12V$$

$$= -6 \quad \text{โวลต์}$$

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