



**Department of Computer Engineering  
Faculty of Engineering  
Prince of Songkla University**

# **Advanced Analog and Digital Systems**



241-309: Advanced Analog and Digital Systems

1

## **Chapter 3**

**ออปแอมป์ II**

**Operation Amplifier II**



**Computer Engineering**

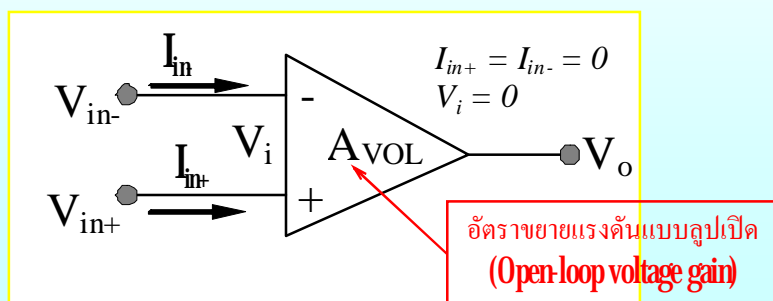
## เนื้อหา

1. วงจรขยายชนิดต่าง ๆ
2. การวิเคราะห์ท่วงจรขยาย



## สิ่งที่ต้องเข้าใจเมื่อวิเคราะห์ท่วงจรออปแอมป์

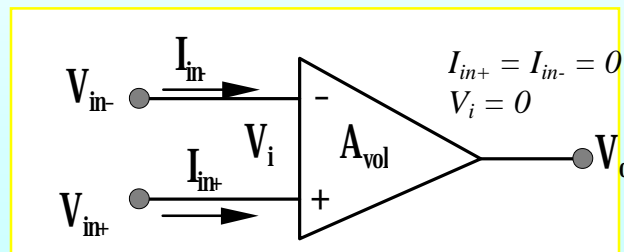
1.  $V_o = A_{VOL} \times V_i$
  2.  $V_{in+} @ V_{in-}$
  3.  $I_{in+} = I_{in-} @ 0$
- } เป็นจริงสำหรับ **Ideal Op-amp**



## คุณสมบัติของออปแอมป์ที่ใช้วิเคราะห์วงจร

ใช้คุณสมบัติ 2 ข้อหลัก ๆ คือ

1. Op-amp มี Input Resistance สูงมาก จึงทำให้กระแสที่ไหลเข้าสู่อินพุตของ Op-amp มีค่าน้อยมาก
2. ในการทำงานเป็นวงจร Linear  $V_i = (V_{in+} - V_{in-})$  มีค่าน้อยมาก



## วงจรขยายชนิดต่างๆ

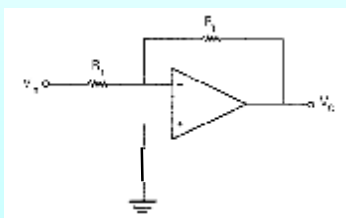
- วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)
- วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier)
- วงจรขยายตามแรงดัน (Voltage Follower Amplifier)
- วงจรขยายรวมสัญญาณ (Summing Amplifier)
  - วงจรขยายรวมสัญญาณแบบกลับเฟส
  - วงจรขยายรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟส
- วงจรขยายผลต่าง (Differential Amplifier)



## วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

- สัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณอินพุตมีเฟสต่างกัน  $180^\circ$
- อัตราขยายแรงดันลูปปิด (closed-loop gain:  $A_{CL}$ )  
คำนวณจาก

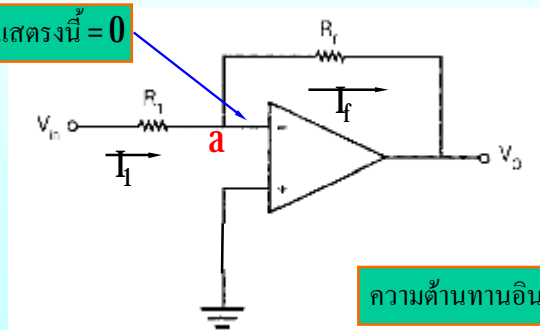
$$A_{CL} = -R_f/R_1$$



## การวิเคราะห์ไฟตรง (DC Analysis)

- สำหรับออปแอมป์ในอุดมคติ แรงดันที่โหนด 'a' เท่ากับศูนย์
- $I_1 = I_f$  ดังนั้น  $V_{in}/R_1 = -V_o/R_f$
- จะได้ว่า  $V_o/V_{in} = -R_f/R_1 = A_{CL}$

กระแสตรงนี้ = 0



ความต้านทานอินพุตของวงจร =  $R_1$



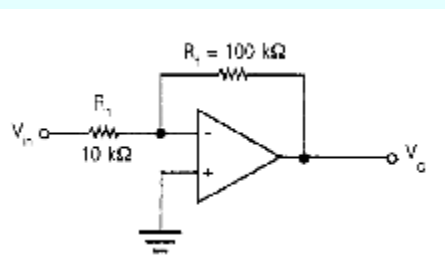
## ตัวอย่างที่ 1

จงออกแบบวงจรขยายอินพุตแบบกลับเฟสให้มีอัตราขยายเท่ากับ  $-10$  และมีความต้านทานอินพุตเท่ากับ  $10\text{K}\Omega$

วิธีทำ

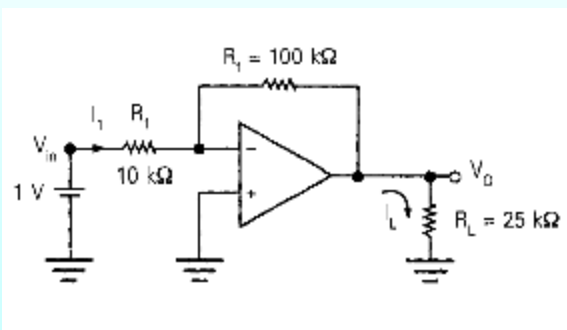
$$R_1 = 10\text{K}\Omega$$

$$R_f = -A_{CL} \times R_1 = -(-10) \times 10\text{K}\Omega = 100\text{K}\Omega$$



## ตัวอย่างที่ 2

จากวงจร กำหนดให้  $R_1 = 10\text{K}\Omega$ ,  $R_f = 100\text{K}\Omega$ ,  $V_{in} = 1\text{V}$  และ โหลด  $R_L = 25\text{K}\Omega$  จงหาค่าของ  $I_1$ ,  $V_o$ ,  $I_L$  และ  $I_o$  (กระแสเอาต์พุตรวม)



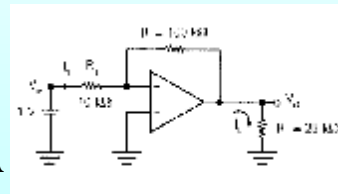
## ตัวอย่างที่ 2 (ต่อ)

$$I_1 = \frac{V_{in}}{R_1} = \frac{1V}{10K\Omega} = 0.1 \text{ mA} = I_f$$

$$V_o = \frac{R_f}{R_1} V_{in} = -\frac{100K\Omega}{10K\Omega} (1V) = -10V$$

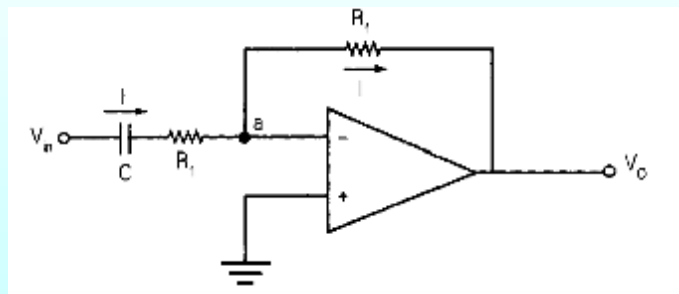
$$I_L = \frac{V_o}{R_L} = -\frac{10V}{25K\Omega} = -0.4 \text{ mA}$$

$$I_o = I_L - I_f = -0.4 \text{ mA} - 0.1 \text{ mA} = -0.5 \text{ mA}$$



## การวิเคราะห์ไฟฟสดับ (AC Analysis)

เมื่อนำวงจรขยายแบบกลับเฟสไปใช้งานจริงต้องมีตัวเก็บประจุ  
เชื่อมต่อทางด้านอินพุตเพื่อแยกแรงดันไฟตรงของ 2 วงจรออกจาก  
กัน



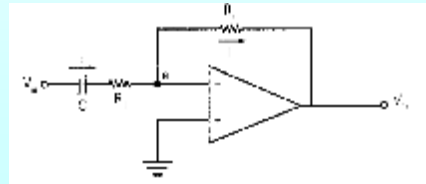
## การวิเคราะห์ที่ไฟลดับ (ต่อ)

- โดยธรรมชาติของตัวเก็บประจุจะยอมให้ความถี่สูงผ่านได้ง่ายกว่าความถี่ต่ำ
- ค่าความถี่ต่ำสุดที่ถือว่าวงจรสามารถทำงานได้คำนวณได้จาก

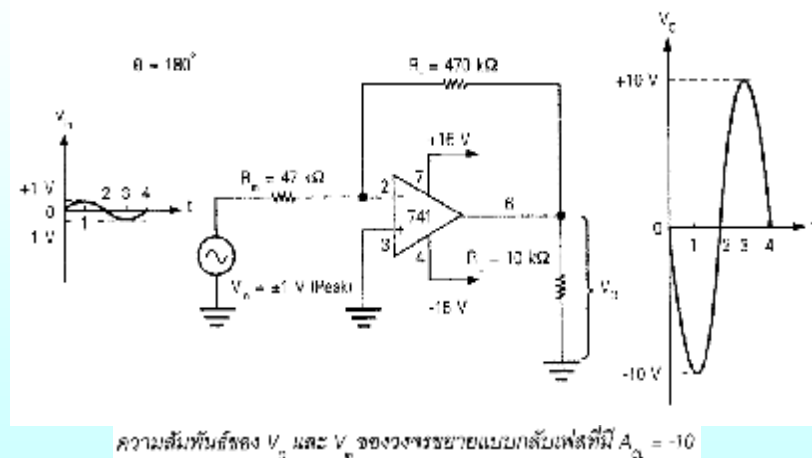
$$F_L = \frac{1}{2\pi R_1 C}$$

- ที่ความถี่สูงกว่า  $F_L$  อัตราขยายลูปปิดของวงจรมีค่าประมาณเท่ากับ  $-R_f/R_1$

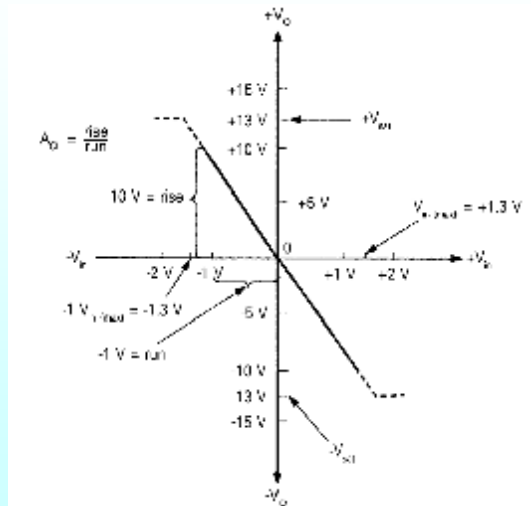
$$A_{CL} \cong -\frac{R_f}{R_1}$$



## ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตและอินพุต

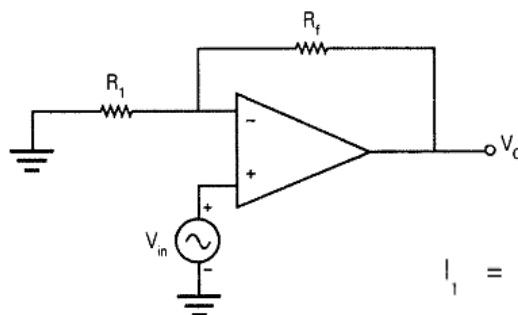


### ความสัมพันธ์ ฯ (ต่อ)



### วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier)

$$A_{CL} = \frac{V_o}{V_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

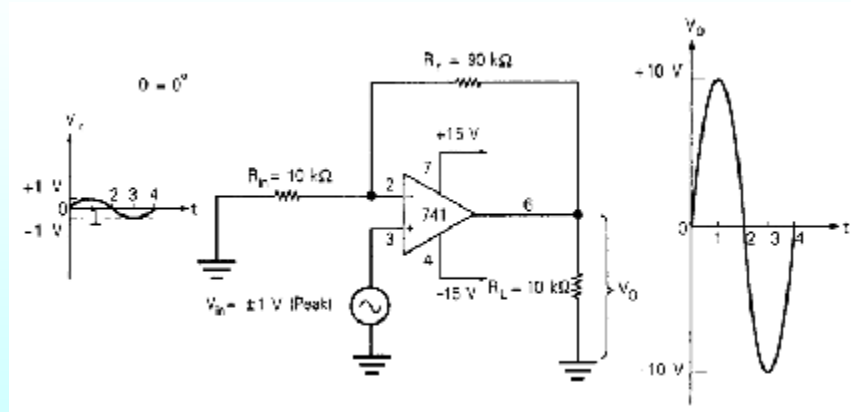


$$I_1 = \frac{V_{in}}{R_1}$$





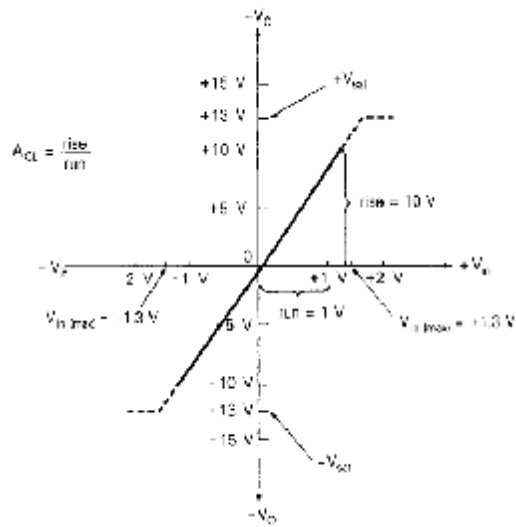
## ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตและอินพุต



วงจรขยายไม่กลับเฟส เมื่อ  $V_{in} = 1\text{ V}$  และ  $V_o = 10\text{ V}$



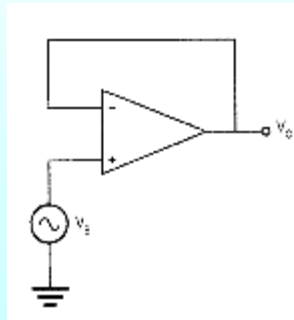
## ความสัมพันธ์ ๑ (ต่อ)



## วงจรขยายตามแรงดัน (Voltage Follower Amplifier)

- บางทีเรียกว่าวงจรบัฟเฟอร์
- เทียบเท่ากับวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสที่มี

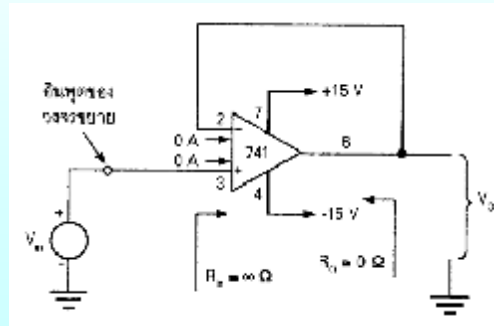
$$R_1 = \infty \text{ และ } R_f = 0$$



$$\begin{aligned} V_o &= V_{in} \\ A_{CL} &= 1 \\ I_o &= I_L \end{aligned}$$

## คุณสมบัติของวงจรขยายตามแรงดัน

- ความต้านทานอินพุตของวงจรเท่ากับความต้านทานอินพุตของออปแอมป์ (สำหรับไอซี 741C = 2M $\Omega$ ) ← ยิ่งสูงยิ่งดี
- ความต้านทานเอาต์พุตของวงจรเท่ากับความต้านทานเอาต์พุตของออปแอมป์ (สำหรับไอซี 741C = 75  $\Omega$ ) ← ยิ่งต่ำยิ่งดี

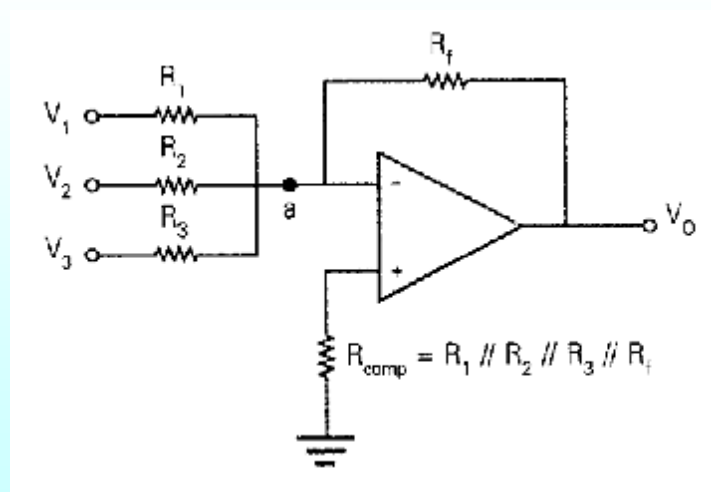


## วงจรรวมสัญญาณ (Summing Amplifier)

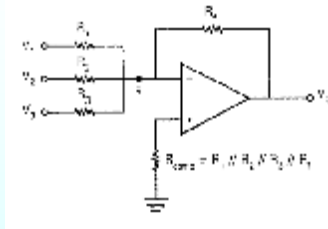
- คือวงจรออปแอมป์ที่สามารถต่อขั้วอินพุตใดอินพุตหนึ่งเพื่อให้สามารถรับสัญญาณหลาย ๆ สัญญาณ และนำขนาดของสัญญาณมารวมกันได้
- มี 2 แบบคือ
  - วงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส
  - วงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟส



## วงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส



## วงจรขยายรวมสัญญาณแบบกลับเฟส

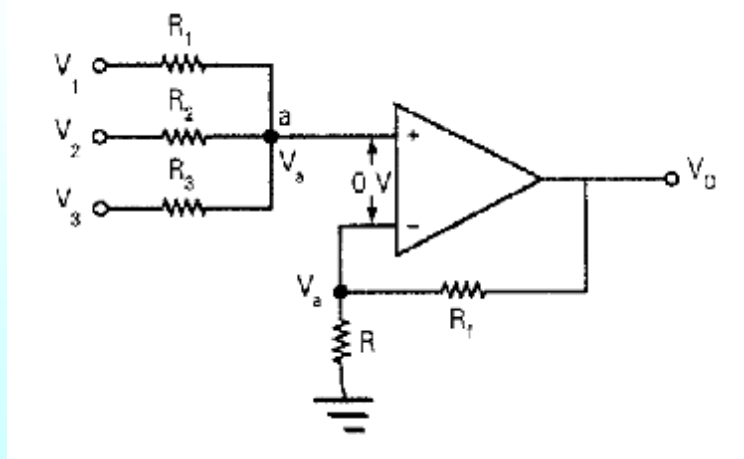


$$V_o = -\left\{ \frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3 \right\}$$

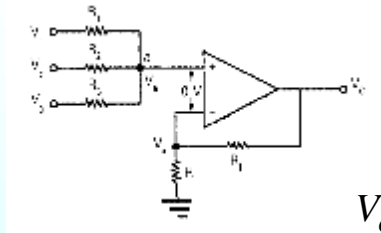
ถ้าให้  $R_1=R_2=R_3=R_f$  จะได้  $V_o = -(V_1+V_2+V_3)$



## วงจรขยายรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟส



## วงจรขยายรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟส



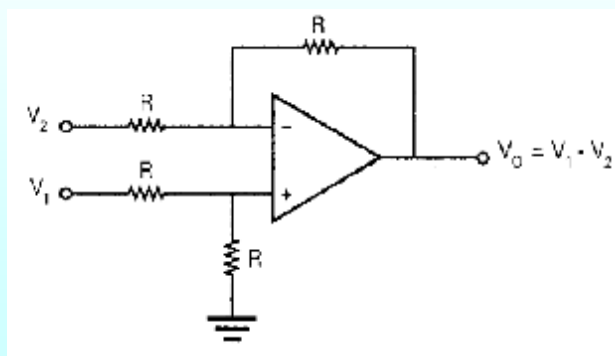
$$V_o = \left[ 1 + \frac{R_f}{R} \right] \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$

ถ้าให้  $R_1 = R_2 = R_3 = R_f/R$  จะได้  $V_o = V_1 + V_2 + V_3$



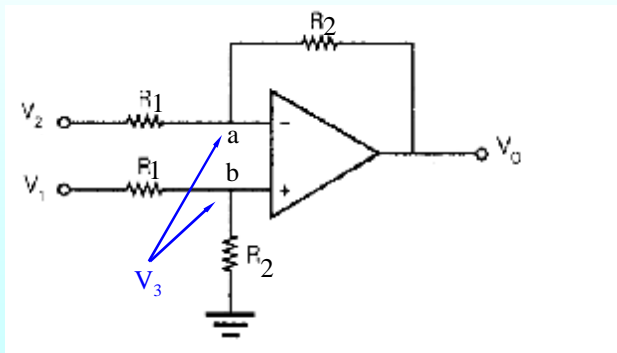
## วงจรขยายผลต่าง (Differential Amplifier)

วงจรขยายผลต่างคือวงจรออปแอมป์ที่ทำหน้าที่ขยายผลต่างของแรงดันทั้งสองทางด้านอินพุต



## การวิเคราะห์วงจรขยายผลต่าง

เมื่อความต่างศักย์ระหว่างจุด 'a' และจุด 'b' เป็นศูนย์  
ดังนั้นแรงดัน  $V_3$  ที่จุด 'a' และจุด 'b' เท่ากันด้วย



## การวิเคราะห์

ที่โหนด a

$$\frac{V_3 - V_2}{R_1} + \frac{V_3 - V_o}{R_2} = 0$$

และที่โหนด b

$$\frac{V_3 - V_1}{R_1} + \frac{V_3}{R_2} = 0$$

ดังนั้น

$$\frac{V_3 - V_1}{R_1} + \frac{V_3}{R_2} = \frac{V_3 - V_2}{R_1} + \frac{V_3 - V_o}{R_2}$$

จะได้

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2)$$



## โหมดผลต่างและโหมดอัตราขยายร่วม

- หากเป็นออปแอมป์ในอุดมคติ แรงดัน  $V_0 = 0$  เมื่อ  $V_1 = V_2$
- แต่ในความเป็นจริง  $V_0 \neq 0$  แม้ว่า  $V_1 = V_2$
- เนื่องจากแรงดัน  $V_0$  ไม่ได้ขึ้นกับผลต่างของแรงดันอินพุตอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยของแรงดันอินพุต ซึ่งเรียกว่า **สัญญาณโหมดร่วม** ( $V_C$ ) ด้วย



## สัญญาณโหมดร่วม (Common Mode)

$$V_C = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

สำหรับวงจรขยายผลต่าง เนื่องจากค่าผิดพลาดของออปแอมป์และตัวต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  แรงดัน  $V_0$  จึงเป็นผลมาจากสมการ

$$V_0 = A_1 V_1 + A_2 V_2$$

อัตราขยายของอินพุตไม่กลับเมื่อ  
อินพุตกลับต่อลงดิน

อัตราขยายของอินพุตกลับเมื่อ  
อินพุตไม่กลับต่อลงดิน



## กำหนดให้

$V_d$  คือสัญญาณโหมดต่าง (Differential Mode)

$A_d$  คืออัตราขยายของสัญญาณผลต่างของอินพุต

$A_c$  คืออัตราขยายของสัญญาณโหมดร่วม



จาก  $V_c = \frac{V_1 + V_2}{2}$       และ       $V_d = (V_1 - V_2)$

จะได้  $V_1 = V_c + \frac{1}{2}V_d$

$$V_2 = V_c - \frac{1}{2}V_d$$

แทน  $V_1$  และ  $V_2$  ลงใน  $V_o = A_1V_1 + A_2V_2$

จะได้  $V_o = A_dV_d + A_cV_c$





นั่นคือ

$$A_d = \frac{1}{2}(A_1 - A_2)$$

และ

$$A_c = A_1 + A_2$$



## อัตราส่วนตัดทิ้งโหมดร่วม (Common-Mode Rejection Ratio)

คือค่าความไวของออปแอมป์ที่ทำงานเป็นวงจรรขยาย  
ผลต่างเปรียบเทียบกับสัญญาณโหมดร่วม เรียกว่า  
ว่า **CMRR**

$$\text{CMRR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

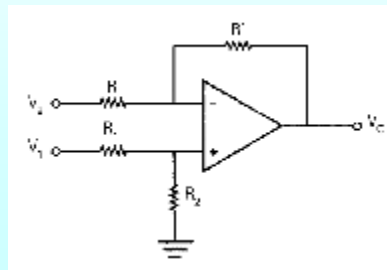
ออปแอมป์เบอร์ 741 มี CMRR ต่ำสุด 70 dB



## ตัวอย่าง

จากวงจรต่อไปนี้ จงหาค่าของ

1. แรกดันเอาต์พุต
2. สมการ  $V_o$  เมื่อ  $V_c = 0$  ถ้า  $R'/R = R_2/R_1$
3. ค่า CMRR ถ้า  $R'/R$  ไม่เท่ากับ  $R_2/R_1$



แรกดันที่อินพุตไม่กลับ คือ  $\frac{R_2}{R_1 + R_2} (V_1)$

จากสมการ  $A_{CL} = -\frac{R_f}{R_1}$  สำหรับอินพุตกลับ

และสมการ  $A_{CL} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$  สำหรับอินพุตไม่กลับได้ว่า

$$\text{ก. } V_o = -\frac{R'}{R} V_2 + \left\{ \frac{R + R'}{R} \right\} \left\{ \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1 \right\} \quad \dots\dots\dots(2.36)$$

$$\text{ข. } V_c = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \quad \text{และ} \quad V_d = (V_1 - V_2)$$

$$\text{แต่} \quad V_1 = V_c + \frac{V_d}{2} \quad \text{และ} \quad V_2 = V_c - \frac{V_d}{2}$$



จากสมการ (2.36) ได้ว่า

$$\begin{aligned} V_o &= -\frac{R'}{R} \left\{ V_c - \frac{V_d}{2} \right\} + \frac{R_2}{R} \cdot \left\{ \frac{R+R'}{R_1+R_2} \right\} \left\{ V_c + \frac{V_d}{2} \right\} \\ &= \left\{ \frac{R_2}{R} \cdot \left\{ \frac{R+R'}{R_1+R_2} \right\} - \frac{R'}{R_1} \right\} V_c + \left\{ \frac{R'}{R_1} + \frac{R_2}{R} \right\} \cdot \left\{ \frac{R+R'}{R_1+R_2} \right\} \frac{V_d}{2} \dots(2.37) \end{aligned}$$

ถ้า  $\frac{R'}{R} = \frac{R_2}{R_1}$  นั่นคือ

$$\frac{R'}{R} + 1 = \frac{R_2}{R_1} + 1$$

หรือ  $\frac{R'+R}{R} = \frac{R_1+R_2}{R_1}$



จากสมการ (2.37) เทอมของ  $V_c = 0$  และ

$$V_o = \left\{ \frac{R'}{R} + \frac{R_2}{R_1} \right\} \frac{V_d}{2} = \left\{ \frac{R_2}{R_1} \right\} V_d \dots\dots(2.38)$$

$$(ค) \quad CMRR = \frac{A_d}{A_c}$$

จากสมการ (6.62) หาค่าของ  $A_d = \frac{V_o}{V_d}$  เมื่อ  $V_c = 0$

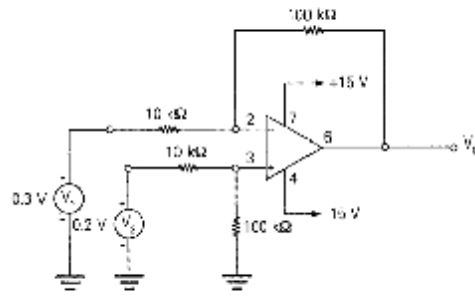
และหาค่าของ  $A_c = \frac{V_o}{V_c}$  เมื่อ  $V_d = 0$

$$CMRR = \frac{R'(R_1+R_2) + R_2(R+R')}{R'(R_1+R_2) - R_1(R+R')} \dots\dots(2.39)$$

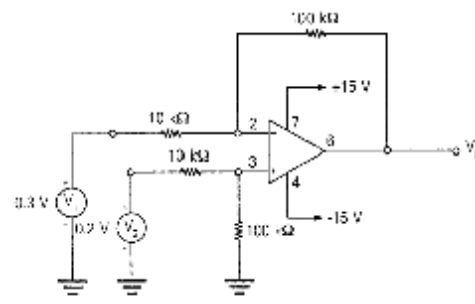


## ตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ 2.9 จากวงจรในรูปที่ 2.18 จงหาค่าของแรงดัน  $V_o$



รูปที่ 2.18



วิธีทำ

$$\text{จากสมการ } V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2)$$

แต่  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$      $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$

$$\text{แทนค่า } V_o = \frac{100 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} (+0.3 \text{ V} - (-0.2 \text{ V}))$$

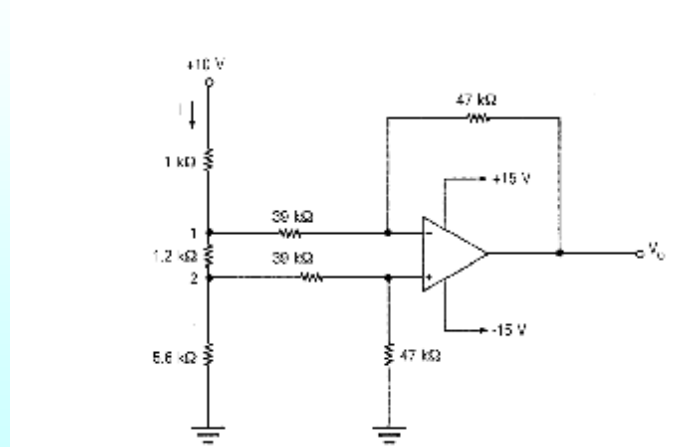
$$= 10 (+0.5 \text{ V})$$

$$\therefore V_o = +5 \text{ V}$$



## ตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ 2.10 จากวงจรขยายผลต่างในรูปที่ 2.19 จงคำนวณหาค่า  $V_o$



วิธีทำ                   หา

$$I = \frac{10 \text{ V}}{1 + 1.2 + 5.6 \text{ k}\Omega} = \frac{10 \text{ V}}{7.8 \text{ k}\Omega}$$

$$= 1.28 \text{ mA}$$

$$V_1 = (1.28 \text{ mA})(1.2 + 5.6 \text{ k}\Omega)$$

$$= 8.704 \text{ V}$$

$$V_2 = (1.28 \text{ mA})(5.6 \text{ k}\Omega)$$

$$= 7.168 \text{ V}$$

จากสมการ  $V_o = \frac{R_f}{R_1} (V_1 - V_2)$

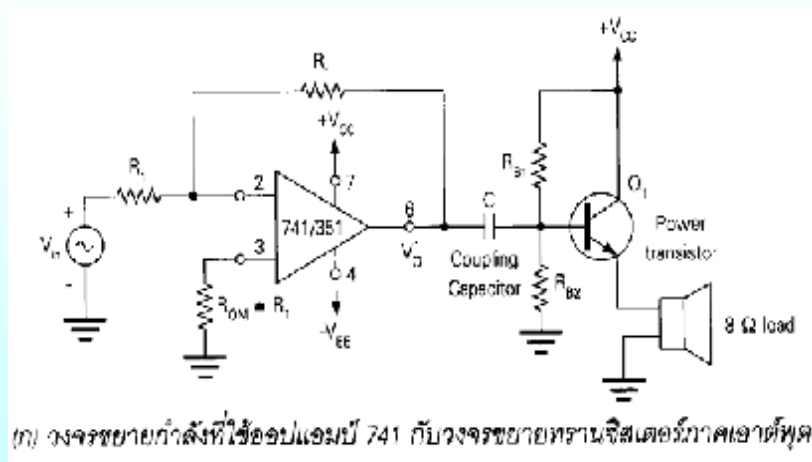
$$= \frac{47 \text{ k}\Omega}{39 \text{ k}\Omega} (8.704 - 7.168 \text{ V})$$

$$= 1.205 (1.536 \text{ V})$$

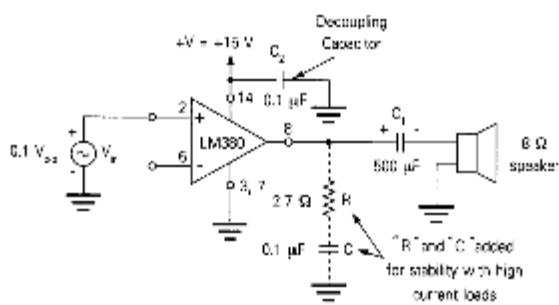
$\therefore V_o = 1.85 \text{ V}$



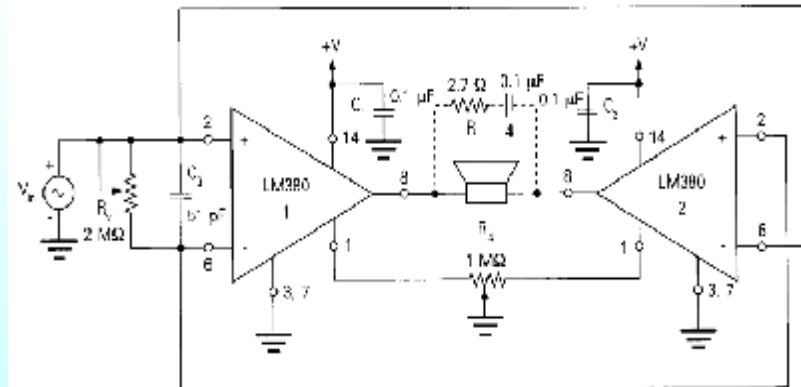
## วงจรขยายกำลัง (Power Amplifier)



## ไอซีขยายสัญญาณเสียงภาคกำลัง



## Bridge Power Audio Amplifier



รูปที่ 2.24 วงจร Bridge Audio Power Amplifier ที่ใช้ไอซีแอมป์ LM380



๑๖

