



01205332 / 01205303

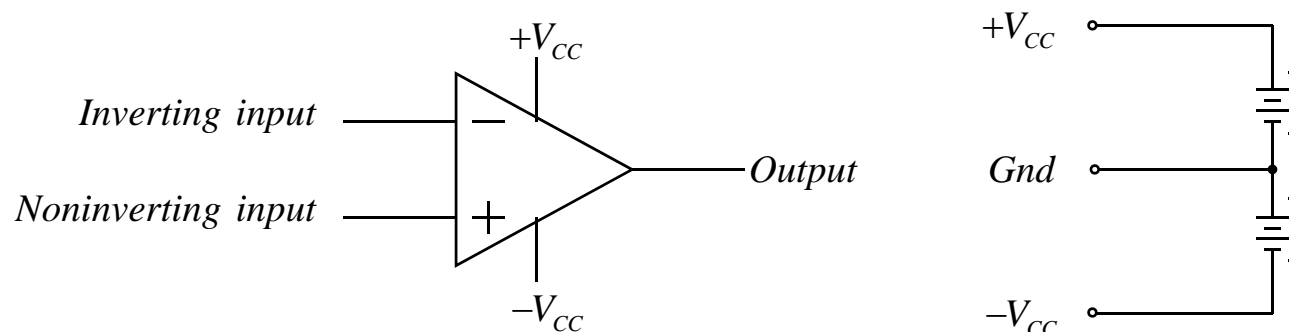
ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์

Electronic Laboratory

- คุณสมบัติของออปแอมป์ และวงจรขยายเชิงเส้น
  - วงจร differentiator, integrator และผลตอบสนองเชิงความถี่
  - วงจรเปรียบเทียบ, วงจรออสซิลเลเตอร์
- และวงจรเรียงกระแสอย่างละเอียด

## คุณสมบัติของออปแอมป์

### • องค์ประกอบของออปแอมป์



- ออปแอมป์เป็นวงจรรวมขนาดใหญ่ ที่มีทรานซิสเตอร์ (BJT, FET) มากกว่า 50 ตัวอยู่ภายใน
- ออปแอมป์ประกอบด้วย ขาอินพุต 2 ขา คือ Noninverting input ( $V^+$ ) กับ Inverting input ( $V^-$ )  
ขาไฟเลี้ยง 2 ขา คือ ขา  $+V_{CC}$  กับ ขา  $-V_{CC}$  และ ขาเอาต์พุต 1 ขา
- โดยสัญญาณที่เข้าทางขา Noninverting input จะถูกขยาย  $A_{OL}$  เท่า กลายเป็นเอาต์พุตที่มีเฟสตรงกัน ส่วนสัญญาณที่เข้าทางขา Inverting input จะถูกขยาย  $A_{OL}$  เท่า กลายเป็นเอาต์พุตที่มีเฟสตรงข้าม
- นั่นคือ แรงดันเอาต์พุต  $V_{out} = (A_{OL} V^+) + (-A_{OL} V^-) = A_{OL} (V^+ - V^-)$   
ซึ่งเป็นการขยายผลต่างแรงดันอินพุตด้วยอัตราขยาย  $A_{OL}$  (Open-Loop Gain) นั่นเอง
- และในทางปฏิบัติขนาดของแรงดันเอาต์พุตที่ได้ โดยปกติจะเล็กกว่าขนาดของแรงดันไฟเลี้ยงเล็กน้อย (ประมาณ 1~2 V) เสมอ

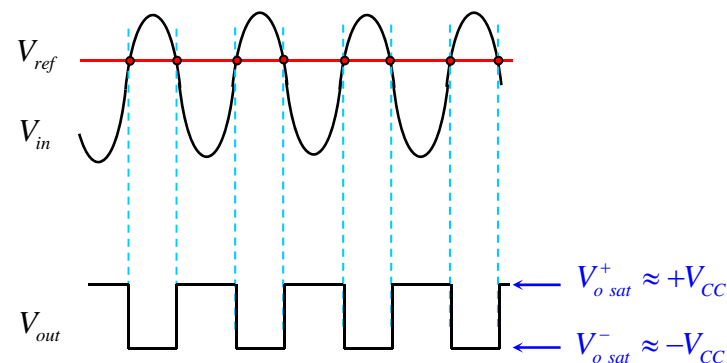
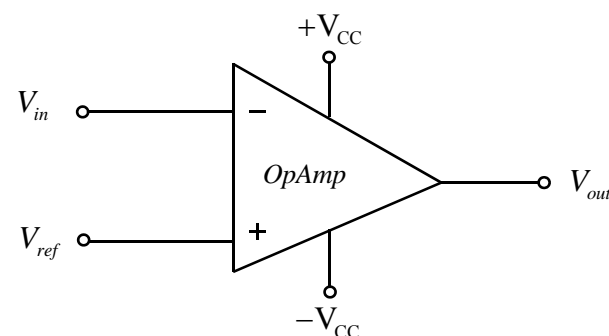
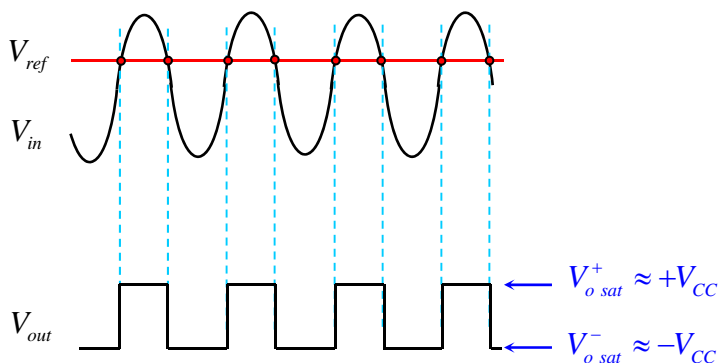
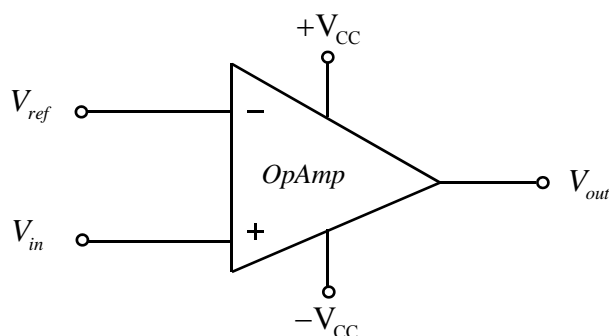
## คุณสมบัติของออปแอมป์

- คุณสมบัติของออปแอมป์ในทางอุดมคติกับในทางปฏิบัติ

	Parameter	Ideal Op-amp	Typical Op-amp
Infinite open-loop voltage gain {	Differential Voltage gain	$\infty$	$10^5 - 10^9$
No output offset voltage {	Common mode voltage gain	0	$10^{-5}$
Infinite frequency response {	Gain bandwidth	$\infty$	1-20 MHz
Zero Input Current {	Input resistance	$\infty$	$10^6 \Omega$ (BJT) $10^9 - 10^{12} \Omega$ (FET)
Ideal voltage source {	Output resistance	0	100 – 1000 $\Omega$

# วงจรออปแอมป์

## • การใช้งานออปแอมป์เป็นวงจรเปรียบเทียบ(Comparator)



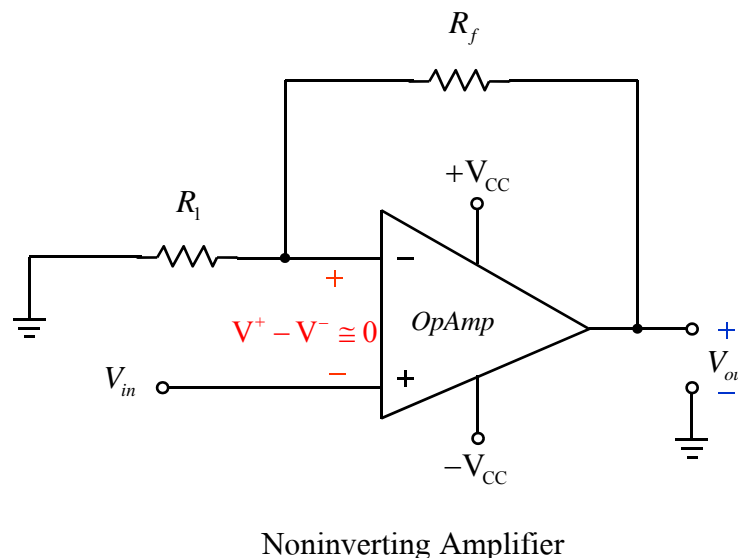
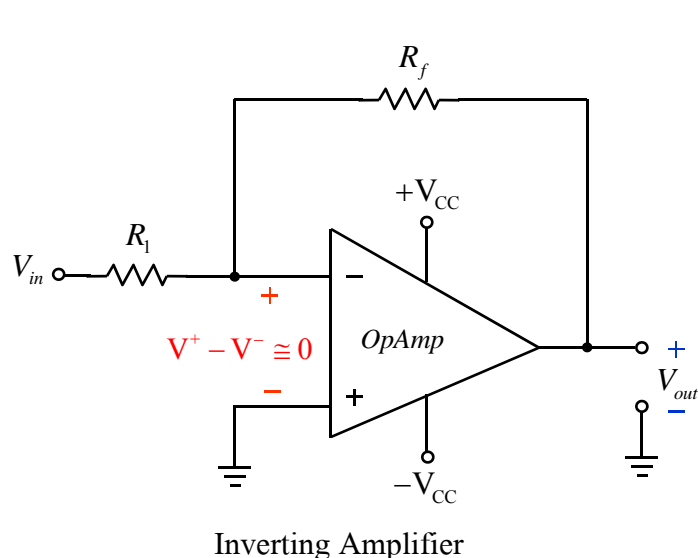
- จากการที่ออปแอมป์มี Open-loop voltage gain สูงมาก ทำให้

เมื่อศักย์ไฟฟ้า  $V^+ > V^-$  แค่เพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้เอาต์พุตมีค่าที่  $V_{out} = V_{osat}^+ \approx +V_{CC}$

เมื่อศักย์ไฟฟ้า  $V^+ < V^-$  แค่เพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้เอาต์พุตมีค่าที่  $V_{out} = V_{osat}^- \approx -V_{CC}$

# วงจรออปแอมป์

## • การลัดวงจรเสมือน(Virtual Short) และกราวด์เสมือน(Virtual Ground)



- ขณะที่แรงดันเอาต์พุตยังไม่อิ่มตัว (ไม่เกินระดับแรงดันไฟเลี้ยง)

ศักย์ไฟฟ้าของขาอินพุต Inverting input ( $V^-$ ) จะเท่ากับ Noninverting input ( $V^+$ )

หรือความต่างศักย์ระหว่างขาอินพุตทั้งสองเป็นศูนย์ (ถึงแม้ไม่มีการเชื่อมต่อกันทางกายภาพโดยตรง)

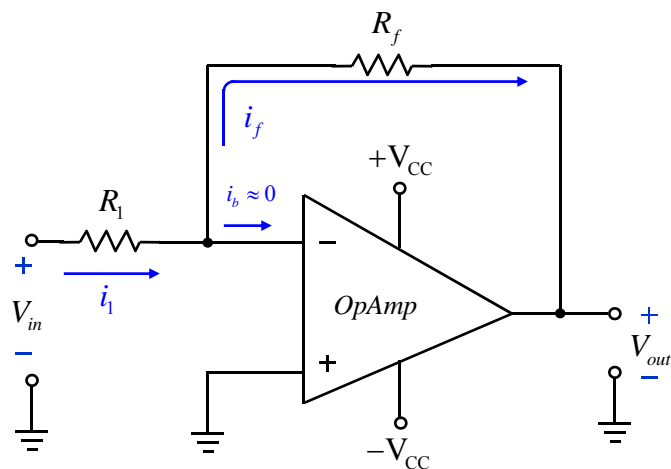
หรือที่เรียกกันว่าภาวะลัดวงจรเสมือน(virtual short)

ซึ่งสามารถเกิดได้เมื่อมีการต่อใช้งานออปแอมป์แบบ Negative feedback

กล่าวคือต้องมีการนำสัญญาณจากขา output ป้อนกลับไปที่ขา inverting input ( $V^-$ )

# วงจรออปแอมป์

## • Inverting Amplifier



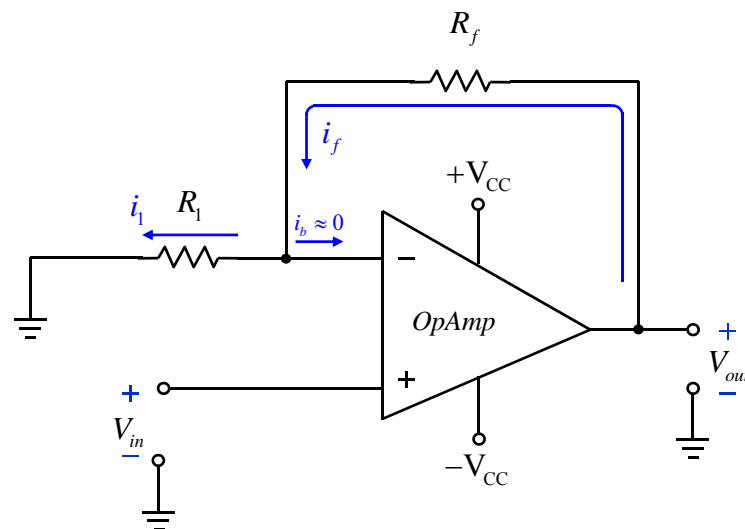
Inverting Amplifier

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_1}$$

$$Z_{in} = R_1$$

$$Z_{out} \cong 0$$

## • Noninverting Amplifier



Noninverting Amplifier

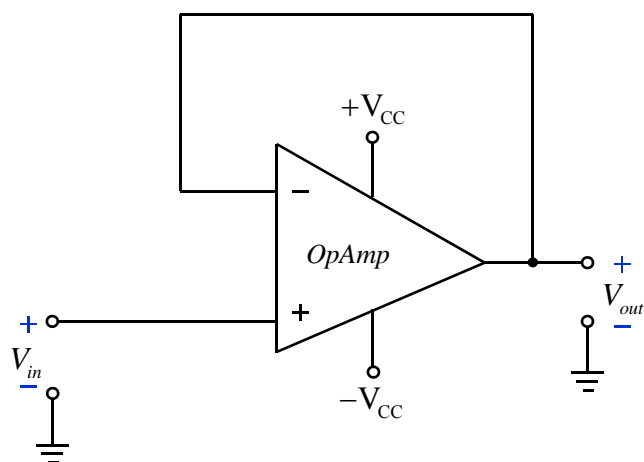
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

$$Z_{in} = \infty$$

$$Z_{out} \cong 0$$

# วงจรออปแอมป์

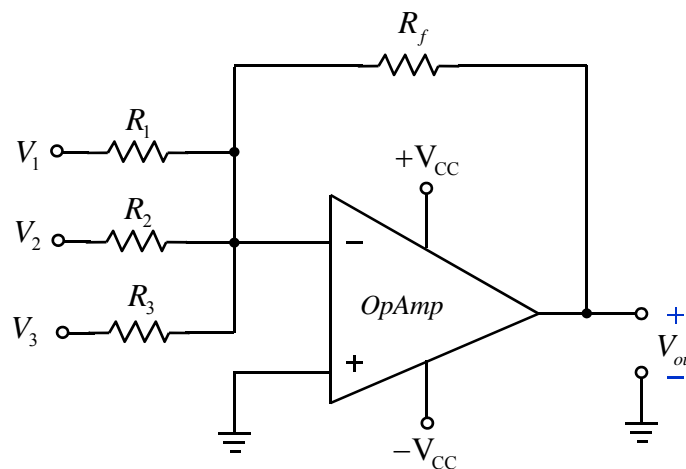
## • Unity Follower (Buffer)



Unity Follower (Buffer)

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1$$

## • Summing Amplifier

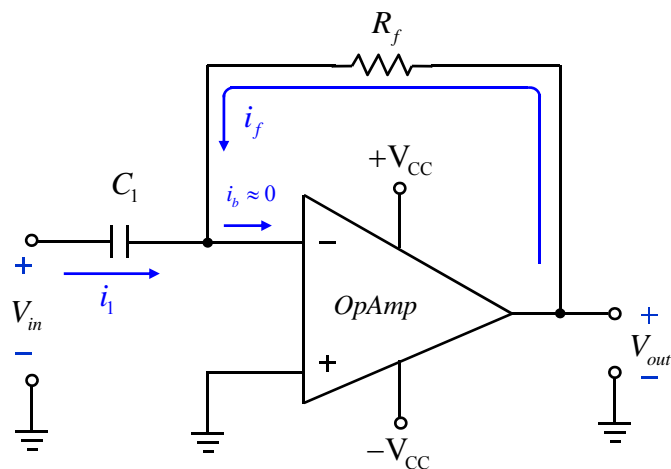


Summing Amplifier

$$V_{out} = - \left( \frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3 \right)$$

# วงจรออปแอมป์

## • Differential Amplifier



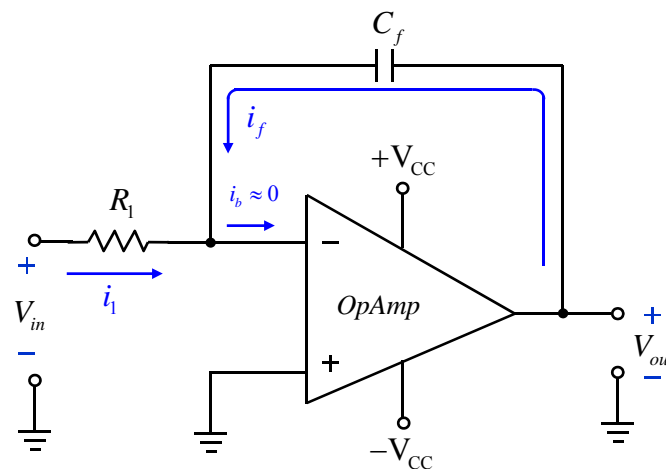
Differential Amplifier

$$v_{out}(t) = -R_f C_1 \frac{dv_{in}(t)}{dt}$$

สำหรับ  $V_{in}$  ความถี่ต่ำๆ  $V_{out} =$

สำหรับ  $V_{in}$  ความถี่สูงๆ  $V_{out} =$

## • Integrator



Integrator

$$v_{out}(t) = -\frac{1}{R_1 C_f} \int v_{in}(t) dt$$

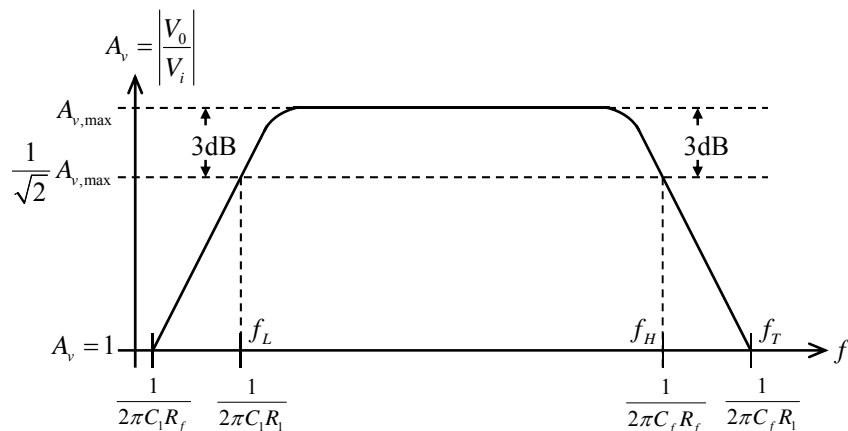
สำหรับ  $V_{in}$  ความถี่ต่ำๆ  $V_{out} =$

สำหรับ  $V_{in}$  ความถี่สูงๆ  $V_{out} =$

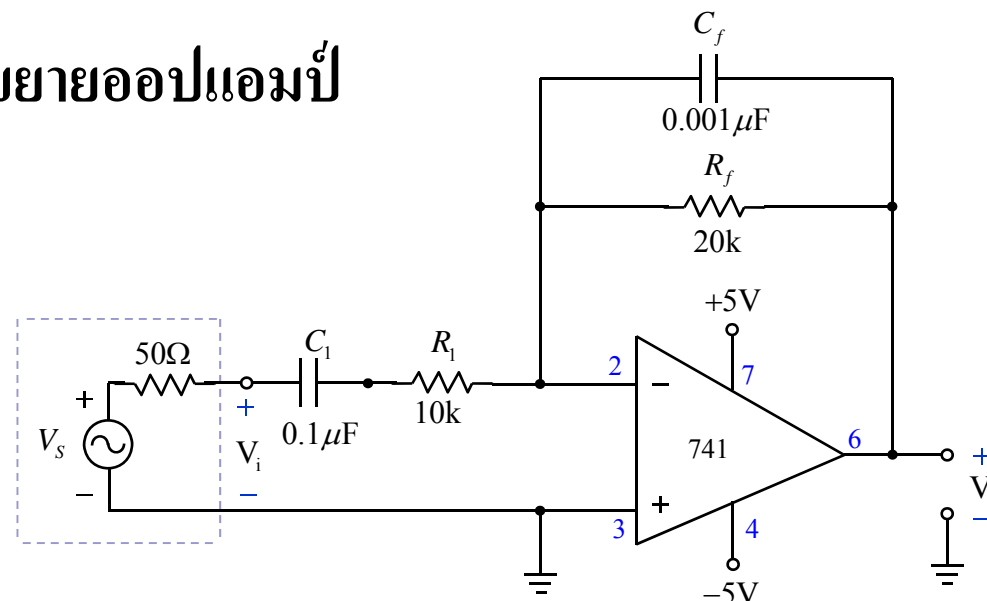


# วงจรออปแอมป์

## • การตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรขยายออปแอมป์



คุณลักษณะเชิงความถี่ของวงจรขยายออปแอมป์



ตัวอย่างวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้สลับแบบกลับเฟส

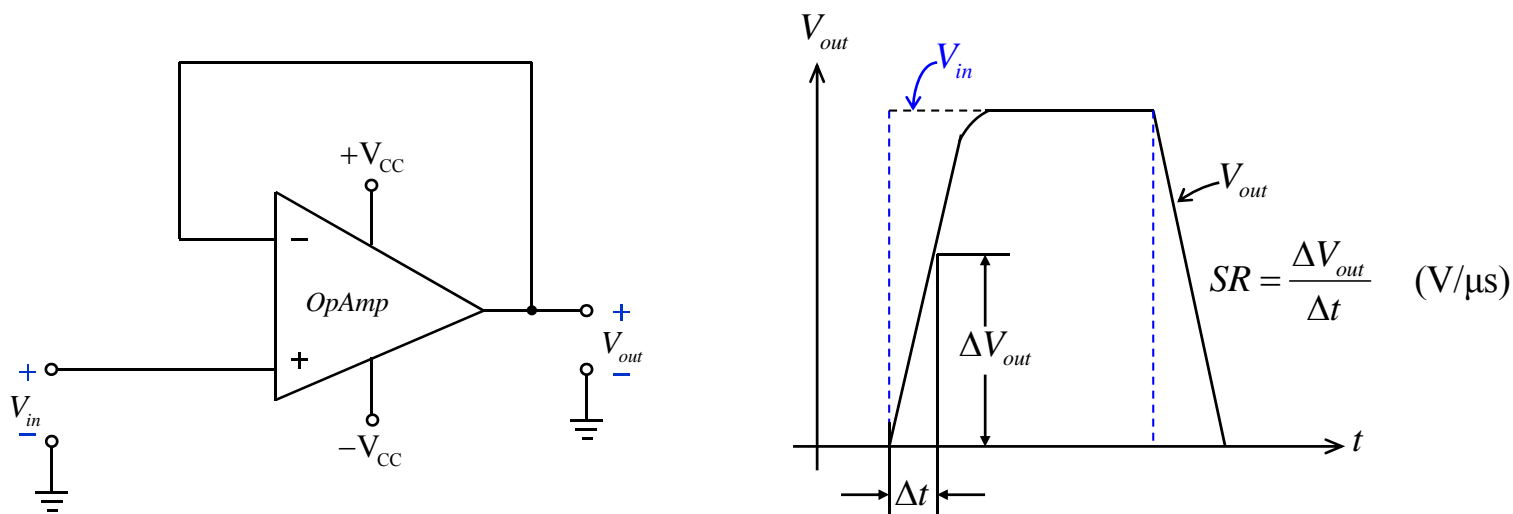
- วงจรขยายสัญญาณในทางปฏิบัติ จะมีอัตราขยายที่ไม่คงที่ตลอดทุกย่านความถี่ เนื่องจาก R,C ในวงจร และเนื่องจากตัวออปแอมป์เองที่อัตราขยายลดลงที่ย่านความถี่สูงๆ
- หากเทียบกับย่านความถี่ปานกลาง ที่อัตราขยายคงที่และมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับย่านความถี่ต่ำๆหรือสูงๆ ความถี่ cut-off ตรงย่านความถี่ต่ำจะเท่ากับ  $f_L = \frac{1}{2\pi C_1 R_1}$  และที่ตรงย่านความถี่สูงเท่ากับ  $f_H = \frac{1}{2\pi C_f R_f}$
- โดยทั่วไปแล้ว ผลคูณระหว่างอัตราขยายในย่านความถี่กลางกับ Bandwidth ของวงจรจะมีค่าคงที่

เท่ากับ  $\text{Gain} \times BW \cong \left| -\frac{R_f}{R_1} \right| f_H = \frac{R_f}{R_1} \times \frac{1}{2\pi R_f C_f} = \frac{1}{2\pi R_1 C_f} = f_T$  ซึ่งเป็นความถี่ที่อัตราขยายวงจรเป็น 1 (unity-gain frequency)

(gain bandwidth product)

# วงจรออปแอมป์

## • Slew Rate



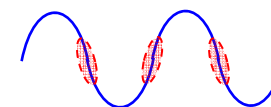
- เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของแรงดันเอาต์พุตที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ของวงจรขยาย
- นั้นหมายความว่า จะเกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณเอาต์พุต ที่ต้องเปลี่ยนแปลงเร็วกว่าอัตรา Slew Rate นี้

- กรณียของเอาต์พุตที่เป็นรูปคลื่นไซน์  
จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ

$$V_{out} = V_{om} \sin(\omega t)$$

$$\frac{dV_{out}}{dt} = \omega V_{om} \cos(\omega t) \quad \text{ซึ่ง} \quad \left( \frac{dV_{out}}{dt} \right)_{\max} = \omega V_{om} = 2\pi f V_{om}$$

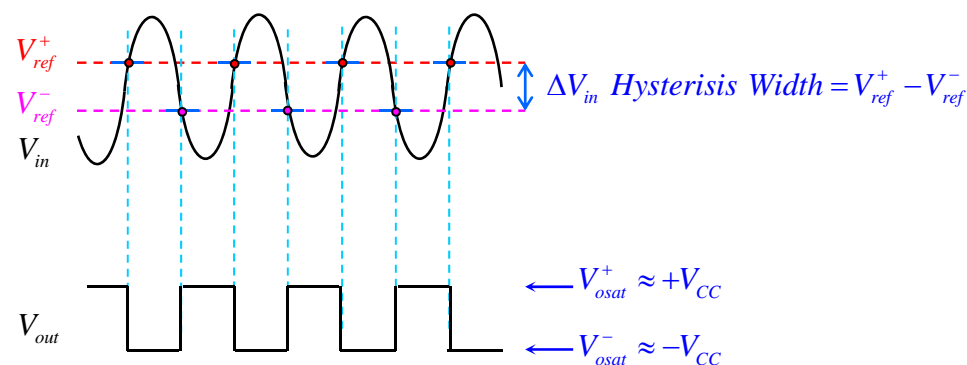
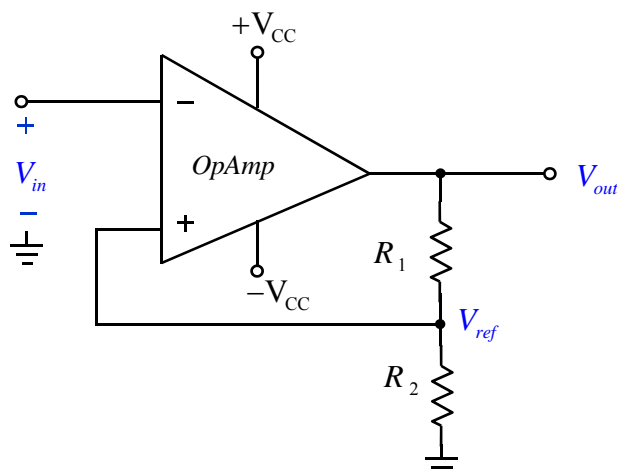
ฉะนั้นสัญญาณเอาต์พุตจะเพี้ยน ถ้า  $\frac{dV_{out}}{dt} > SR$  หรือ  $f > \frac{SR}{2\pi V_{om}}$   
โดยจะเริ่มเพี้ยนที่บริเวณ  $V_{out} = 0$  ก่อน



# วงจรออปแอมป์

## • วงจรเปรียบเทียบแบบ Schmitt trigger

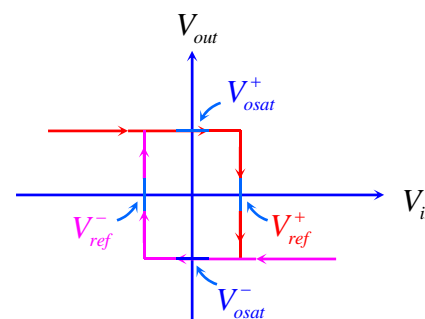
- เป็นวงจรเปรียบเทียบที่มี ระดับแรงดันอ้างอิง 2 ระดับ ตามระดับแรงดันเอาต์พุตที่เป็นอยู่ในขณะนั้น
- โดยทั่วไปจะใช้ R แบ่งแรงดันจากเอาต์พุต ป้อนกลับไปที่ยัง Noninverting Input เพื่อใช้เป็น  $V_{ref}$



วงจรเปรียบเทียบแบบ Schmitt trigger

$$V_{ref} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{out}$$

$$V_{ref}^+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{osat}^+ \quad V_{ref}^- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{osat}^-$$

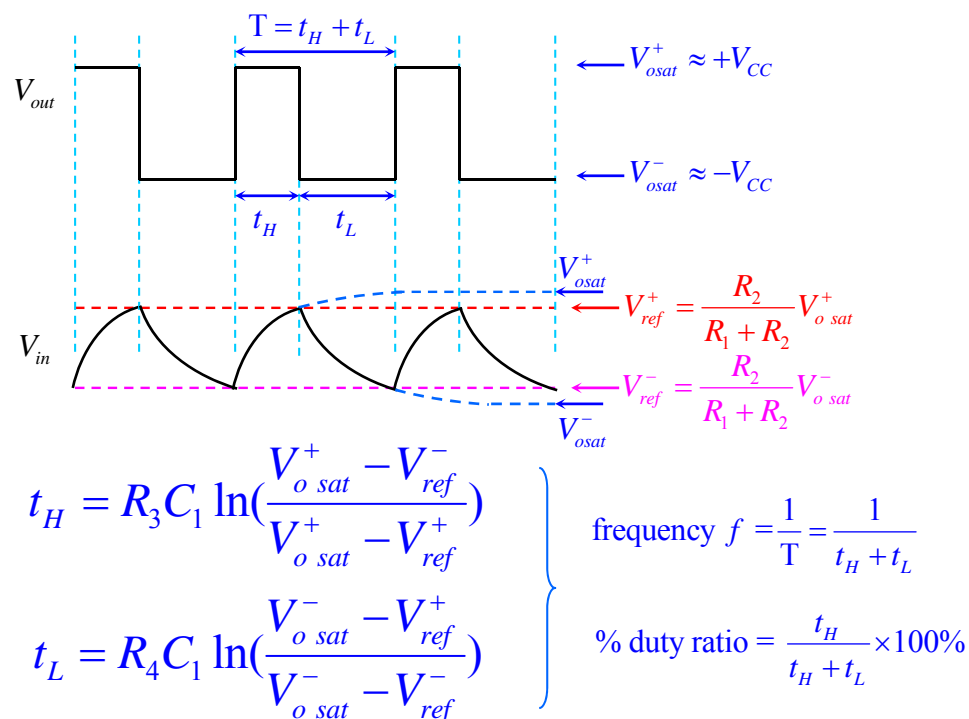
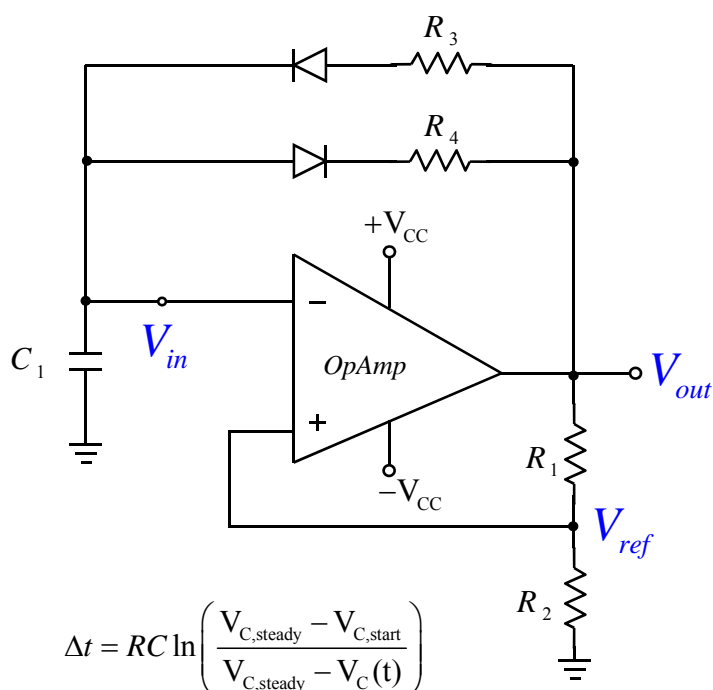


# วงจรออปแอมป์

## • วงจรออสซิลเลเตอร์กำเนิดสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม

- เป็นการนำวงจรเปรียบเทียบแบบ Schmitt trigger มาประยุกต์ใช้สร้างวงจรกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยม
- โดยใช้ R แบ่งแรงดันจากเอาต์พุต ป้อนกับไปที่ขา Noninverting Input เพื่อใช้เป็น  $V_{ref}$
- และใช้วงจร RC แบ่งแรงดันจากเอาต์พุต ป้อนกับไปที่ขา Inverting Input เพื่อใช้เป็น  $V_{in}$

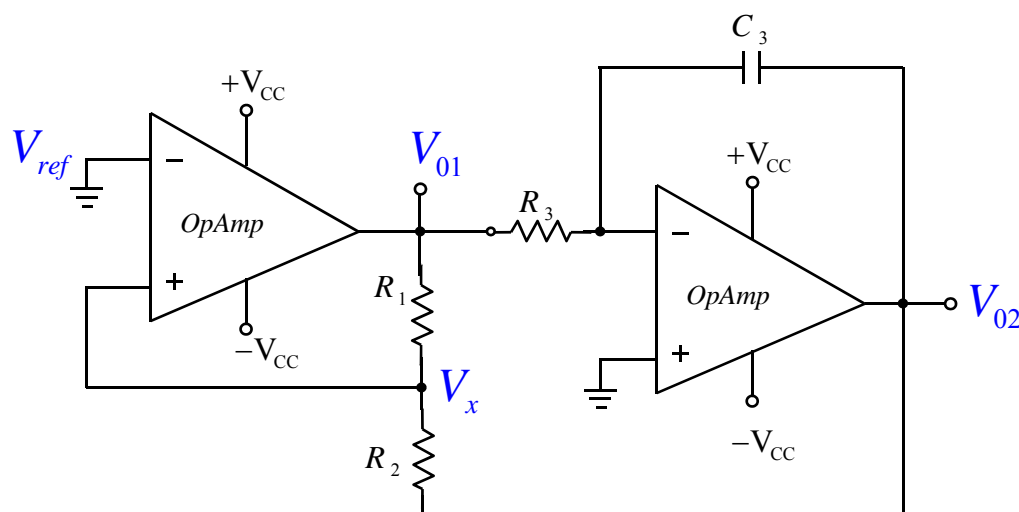
โดยเมื่อ  $V_{out} = V_{o sat}^+$  จะเกิดการอัดประจุเข้า C จนกระทั่ง  $V_{in} > V_{ref}^+$  เอาต์พุตก็จะเปลี่ยนค่าเป็น  $V_{out} = V_{o sat}^-$  และเมื่อ  $V_{out} = V_{o sat}^-$  จะเกิดการคายประจุจาก C จนกระทั่ง  $V_{in} < V_{ref}^-$  เอาต์พุตก็จะเปลี่ยนค่าเป็น  $V_{out} = V_{o sat}^+$



# วงจรออปแอมป์

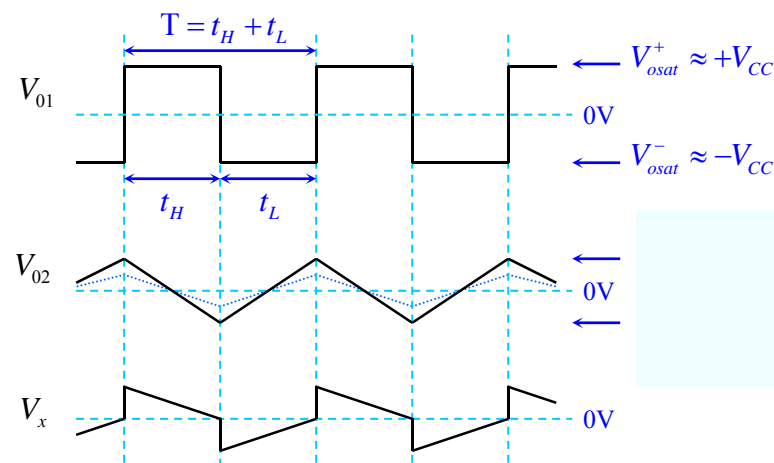
## • วงจรออสซิลเลเตอร์กำเนิดสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยม

- เป็นการนำวงจรกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยม กับวงจร Integrator มาประยุกต์ใช้สร้างวงจรกำเนิดคลื่นสามเหลี่ยม
- โดยในส่วนของวงจรกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยมในที่นี้ จะใช้ขา Inverting input เป็นขาแรงดันอ้างอิงคงที่ 0 V และใช้ขา Noninverting input ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาต์พุตของวงจร Integrator



*Comparator  
for generating  
square wave*

*Integrator  
for generating  
triangle wave*



$$V_{01} = \begin{cases} V_{o\ sat}^+ \\ V_{o\ sat}^- \end{cases}$$

$$V_{02} = -\frac{1}{R_3 C_3} \int V_{01} dt$$

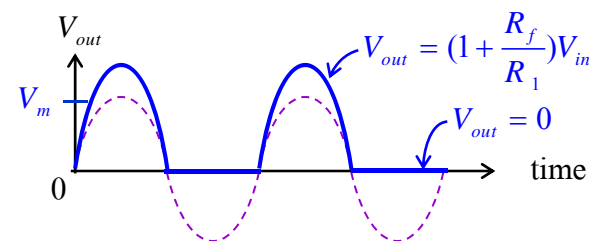
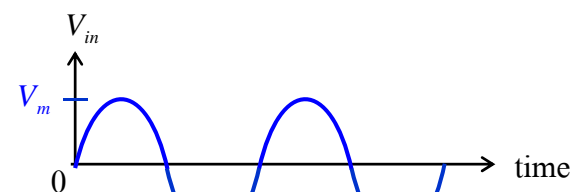
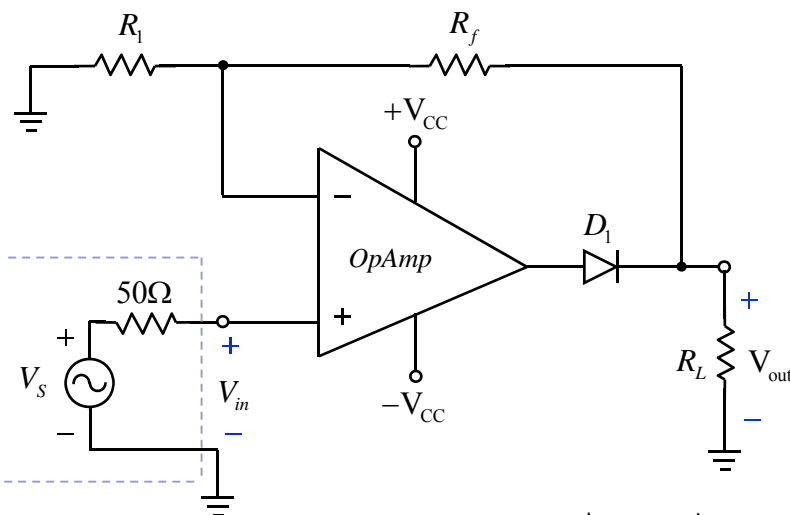
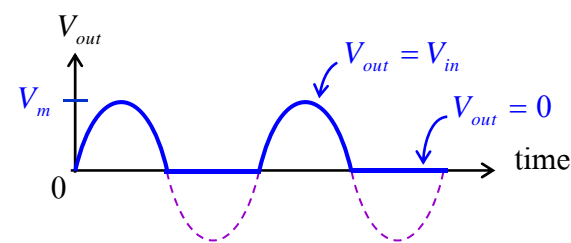
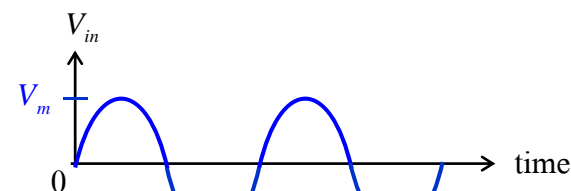
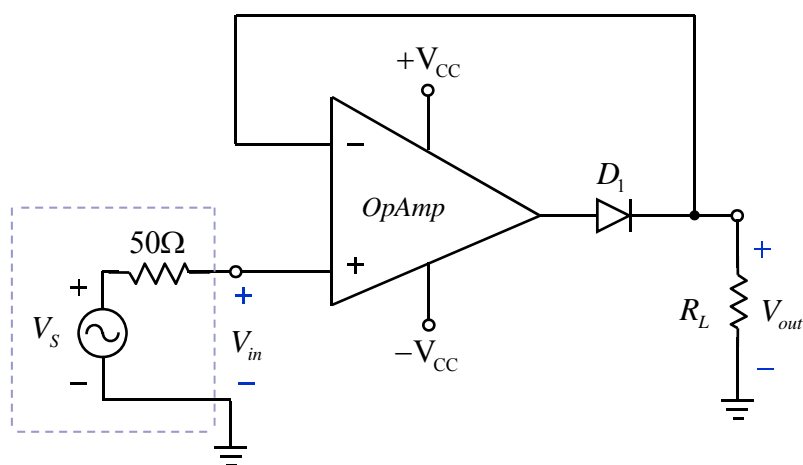
$$V_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{01} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{02}$$

# วงจรออปแอมป์

## • วงจรเรียงกระแสอย่างละเอียด (precision rectifier)

- เป็นวงจรที่สามารถเรียงกระแสของสัญญาณที่มีระดับแรงดันต่ำๆ (ต่ำกว่า threshold voltage ของไดโอด) ได้

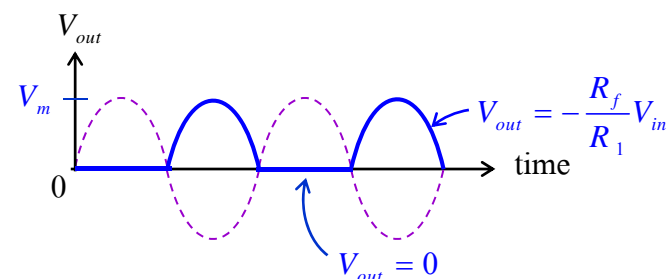
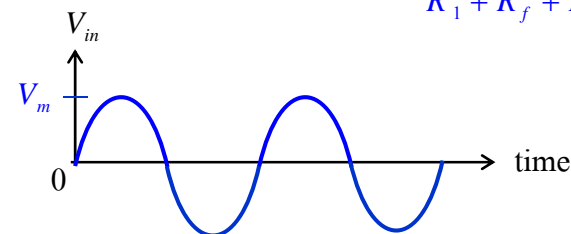
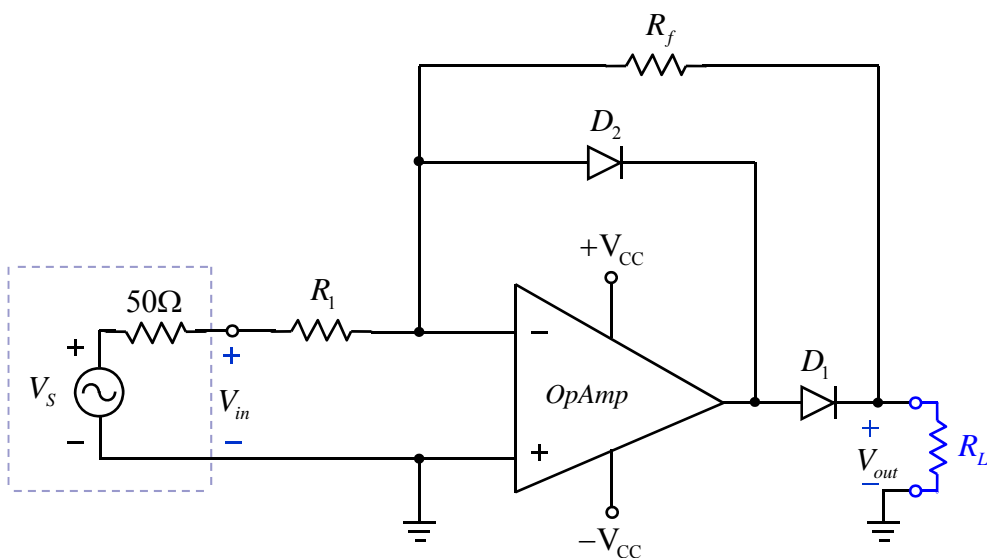
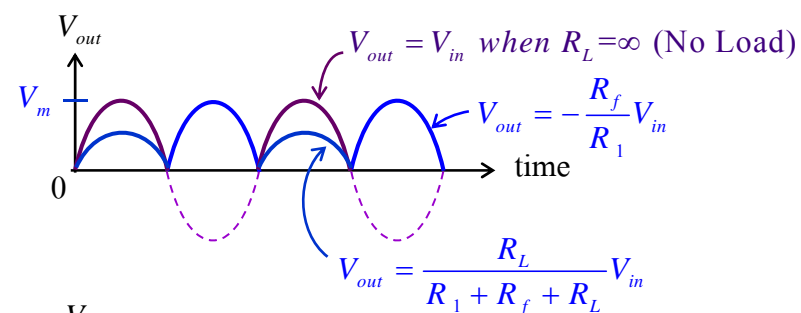
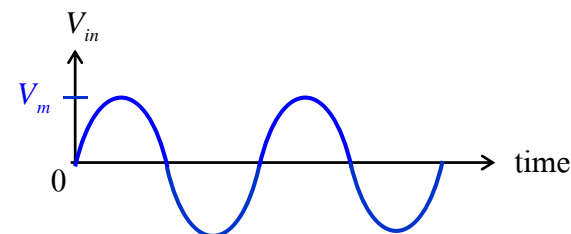
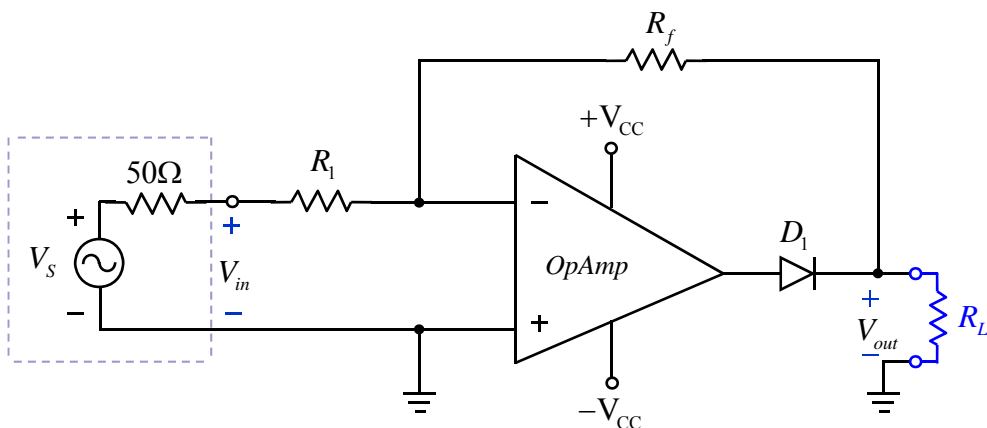
*แบบครึ่งคลื่นด้วย Noninverting Amp*



# วงจรออปแอมป์

- วงจรเรียงกระแสอย่างละเอียด (precision rectifier)

แบบครี้งคลื่นด้วย *Inverting Amp*



# วงจรออปแอมป์

## • วงจรเรียงกระแสอย่างละเอียด (precision rectifier)

แบบเต็มคลื่น

