

## บทที่ 4

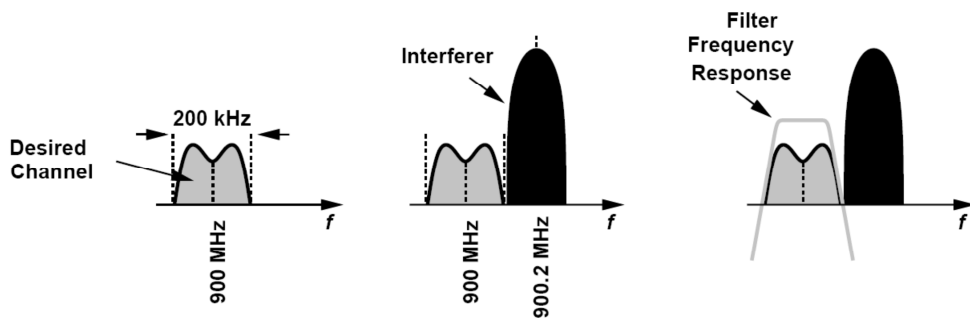
### การออกแบบวงจรกรองแบบแอคทีฟ (Active Filter Design)

#### 4.1 บทนำ

ปัจจุบัน มีการใช้คลื่นความถี่แต่ละช่องสัญญาณและใกล้กันเป็นจำนวนมาก ดังนั้น ขณะใช้งานอาจจะเกิดการแทรกสอดของสัญญาณไม่พึงประสงค์เข้ามาในเครื่องรับสัญญาณได้ วงจรกรองความถี่จึงมีความสำคัญอย่างมากในระบบสื่อสาร เนื่องจากวงจรกรองจะทำหน้าที่กรองสัญญาณที่ต้องการผ่านไปได้ แต่จะกำจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการให้มีอัตราขยายลดลง บทนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานวงจรกรองแบบอนาล็อก การจำแนกชนิดและลักษณะวงจรกรอง การออกแบบวงจรกรองแบบสเลนและคีย์ (Sallen and Key) และการออกแบบวงจรกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ทที่อาศัยพื้นฐานของวงจรกรองแบบสเลนและคีย์ เนื้อหาสุดท้ายจะกล่าวถึงการออกแบบวงจรกรองที่มีอันดับมากกว่าอันดับสอง

#### 4.2 การพิจารณาวงจรกรองแบบทั่วไป

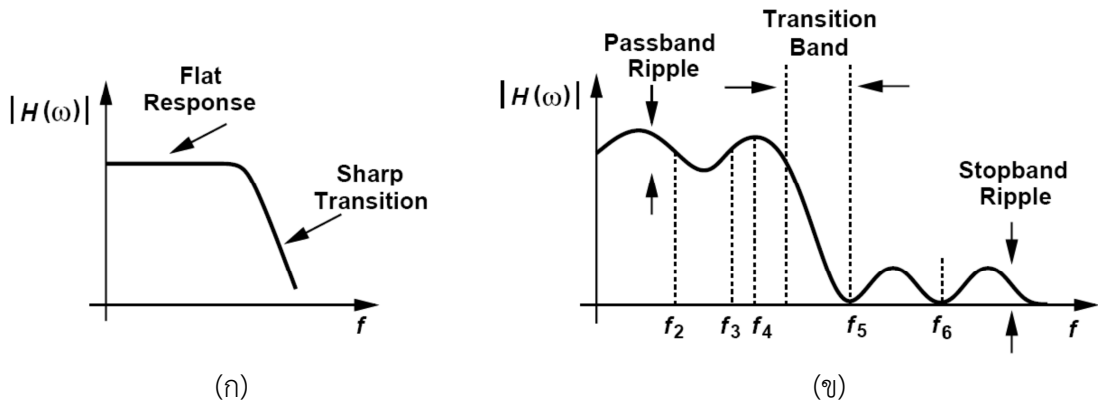
รูปที่ 4.1 แสดง สมมุติให้สัญญาณโทรศัพท์ที่รับได้มีความถี่กลางที่ใช้เท่ากับ 900 MHz และมีแบนวิธเท่ากับ 200 kHz



รูปที่ 4.1 (ก) ย่านความถี่ที่ต้องการรับ (ข) ความถี่ข้างเคียงที่มีขนาดใหญ่ (ค) การใช้ตัวกรองเพื่อกำจัดความถี่ข้างเคียง

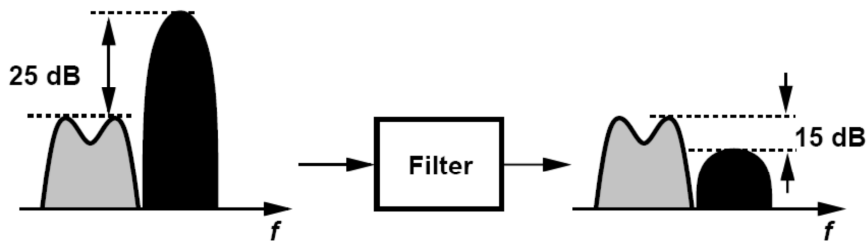
##### 4.2.1 คุณลักษณะของวงจรกรอง

คุณลักษณะที่สำคัญของวงจรกรองมีดังนี้ 1. วงจรกรองต้องไม่ส่งผลกระทบต่อสัญญาณ เช่น วงจรกรองที่ต้องการอัตราขยายของวงจรมีค่าคงที่มีผลการตอบสนองความถี่ 2. วงจรกรองต้องทำหน้าที่ลดสัญญาณแทรกสอด เราแบ่งผลการตอบสนองความถี่ออกเป็น 3 ย่าน ดังนี้ 1. ย่านแถบความถี่ผ่าน 2. ย่านเปลี่ยนแปลง และ 3. ย่านแถบหยุด รูปที่ 4.2 (ก) แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองมีอัตราขยายที่คงที่ และมีช่วงแถบส่งผ่าน



รูปที่ 4.2 (ก) ลักษณะทั่วไป (ข) คุณลักษณะการกรองแบบอุดมคติ

ตัวอย่างที่ 4.1 ในงานการสื่อสารแบบไร้สาย จะมีสัญญาณที่ไม่ต้องการแทรกสอดเข้าไปมากกว่าสัญญาณที่ใช้ งานประมาณ 25 dB จงหาวงจรกรองที่สามารถลดทอนสัญญาณที่แทรกสอดเข้ามาให้น้อยกว่าสัญญาณที่ต้องการประมาณ 15 dB



รูปที่ 4.3

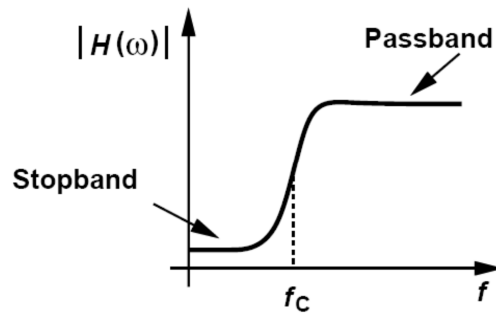
วิธีทำ รูปที่ 4.3 แสดงคุณสมบัติของวงจรกรองที่สามารถลดทอนขนาดของสัญญาณแทรกสอดลงไปได้ 40 dB จำนวนของการลดทอนในย่านแถบหยุด

แบบฝึกหัดที่ 4.1 เพื่อให้ป้องกันสัญญาณแทรกสอด 2 ช่องสัญญาณ ด้านหนึ่งของสัญญาณมีค่าสูงกว่าสัญญาณที่ออกแบบไว้ 25 dB จงหาค่าการลดทอนในย่านแถบหยุด ถ้ากำลังของสัญญาณแทรกสอดจะปรากฏเท่ากับ 18 dB

คุณลักษณะของวงจรกรองที่สำคัญอื่น ๆ คือ มีความเป็นเชิงเส้น สัญญาณรบกวน กำลังสูญเสีย และความซับซ้อนจำเป็นจะต้องพิจารณาเป็นพิเศษ

#### 4.2.2 การจำแนกวงจรกรอง

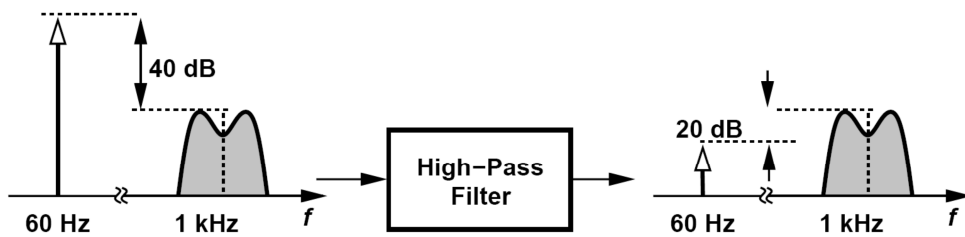
ในการจำแนกวงจรกรองแบบต่าง ๆ สามารถแยกได้จากคุณลักษณะการตอบสนองทางความถี่ของ ฟังก์ชันถ่ายโอน ซึ่งวงจรกรองจะสัมพันธ์กับการทำให้ความถี่ของสัญญาณผ่านได้ หรือกำจัดออกไป รูปที่ 4.4 เราจะเรียกวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเนื่องจากสัญญาณที่มีความถี่ต่ำสามารถผ่านวงจรไป แต่สัญญาณที่มี องค์ประกอบความถี่สูงไม่สามารถผ่านไปได้ ในทางกลับกัน เราเรียกวงจรความถี่สูงผ่านเมื่อสัญญาณที่มี องค์ประกอบความถี่ต่ำไม่สามารถผ่านวงจรไปได้ แต่องค์ประกอบความถี่สูงสามารถผ่านไปได้



รูปที่ 4.4 ผลการตอบสนองของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

**ตัวอย่างที่ 4.2** ถ้าต้องการขยายสัญญาณบริเวณใกล้เคียง 1 kHz ซึ่งวงจรไม่ต้องการให้ขนาดของสัญญาณไฟฟ้าที่มากกว่าสัญญาณที่ต้องการอยู่ 40 dB ที่ความถี่ 60 Hz ผ่านออกไป จงออกแบบวงจรกรองเพื่อลดทอนสัญญาณไฟฟ้าที่ไม่ต้องการดังกล่าวให้เหลือ 20 dB

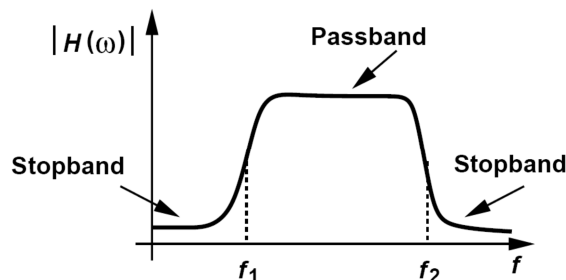
**วิธีทำ** รูปที่ 4.5 แสดงวงจรกรองความถี่สูงผ่านซึ่งถูกออกแบบไว้ให้ที่ความถี่ 60 Hz มีการลดทอน 60 dB



รูปที่ 4.5

**แบบฝึกหัดที่ 4.2** ถ้าย่านของสัญญาณวิทยุมีการแทรกสอดของสัญญาณรบกวนที่ความถี่ 100 kHz ขนาด 30 dB ซึ่งมากกว่าระดับสัญญาณที่ต้องการเท่ากับ 30 dB จงออกแบบวงจรกรองแถบหยุดเพื่อลดทอนสัญญาณให้น้อยกว่าสัญญาณที่ต้องการเท่ากับ 20 dB

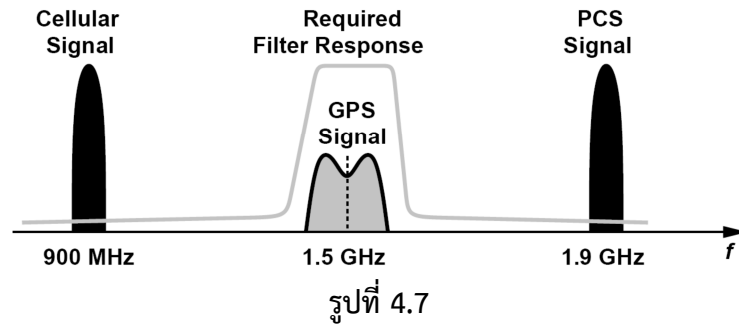
วงจรกรองแถบความถี่ผ่านคือ วงจรกรองความถี่ที่ให้ช่วงความถี่ที่ต้องการผ่านไปได้ หรือกล่าวได้ว่าเป็นวงจรที่กำจัดความถี่ต่ำและสูงทิ้งไป ตัวอย่างของการกรองช่วงความถี่แสดงในรูปที่ 4.6



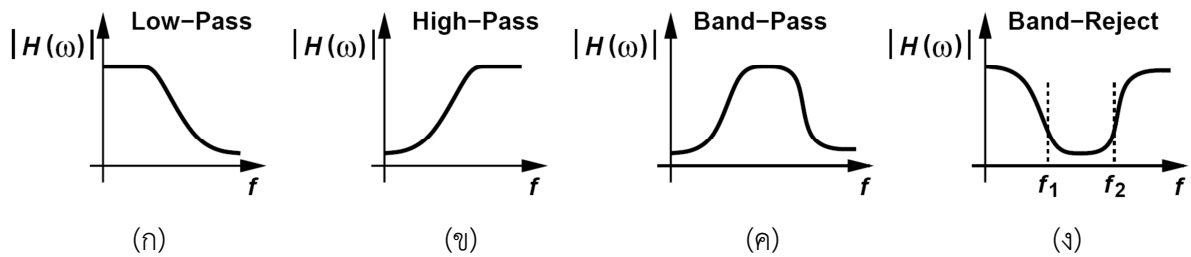
รูปที่ 4.6 ช่วงความถี่แถบผ่านของวงจรกรองแถบผ่าน (Band pass- filter)

**ตัวอย่างที่ 4.3** ออกแบบวงจรภาครับสัญญาณ Global Positioning System (GPS) ซึ่งทำงานที่ความถี่โดยประมาณ 1.5 GHz เพื่อระงับสัญญาณที่แทรกสอดเข้ามา

**วิธีทำ** ในกรณีของโทรศัพท์ที่ใช้ความถี่ย่าน 900 MHz และ 1.9 GHz จะมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามา เพราะฉะนั้น เครื่องรับโทรศัพท์ต้องมีวงจรกรองแบบแถบความถี่ผ่านเพื่อตัดสัญญาณแทรกสอดทิ้งไป ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.7



แบบฝึกหัดที่ 4.3 วงจรภาครับสัญญาณบลูทูธทำงานที่ความถี่ 2.4 GHz วงจรกรองชนิดอะไรที่สามารถกรองสัญญาณ PCS ได้



รูปที่ 4.8 แสดงผลการตอบสนองความถี่ของตัวกรองซึ่งแบ่งตามชนิดของวงจร ประกอบด้วยผลการตอบสนองความถี่ต่ำผ่านได้ (ข) ผลการตอบสนองความถี่สูงผ่านได้ (ค) ผลการตอบสนองแถบความถี่ผ่านได้ และ (ง) ผลการตอบสนองแถบความถี่ไม่สามารถผ่านได้

#### 4.2.3 วงจรกรองแบบแอกทีฟ

วงจรกรองหมายถึงวงจรที่ทำหน้าที่กรองขนาดของสัญญาณในความถี่ที่ไม่ต้องการออก ในบทนี้จะกล่าวถึงวงจรกรองแบบแอกทีฟ ซึ่งวงจรกรองแบบแอกทีฟคือ วงจรที่นำออปแอมป์มาการประยุกต์ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็นวงจรกรอง มีชนิดและการจำแนกวงจรกรองออกหลายแบบ แต่ในบทนี้ เราจะกล่าวถึงการออกแบบวงจรกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ธ ซึ่งใช้ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลักในการออกแบบวงจรกรองและทดลองการทำงานของวงจร และชนิดของวงจรกรองแบบอื่น ๆ

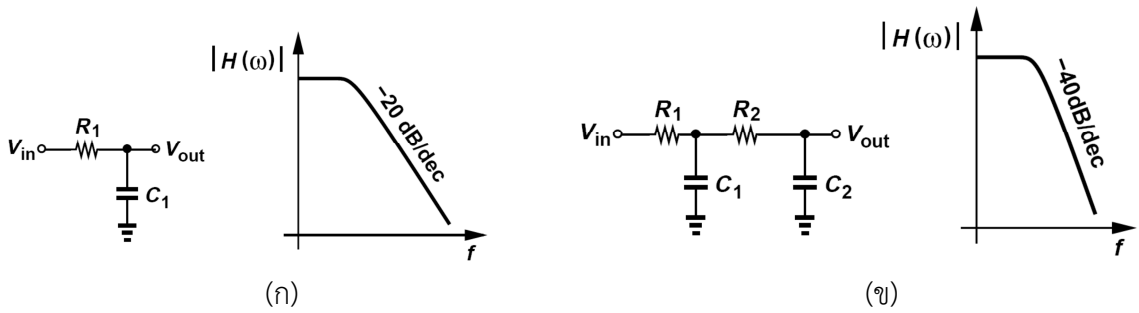
ข้อดีของวงจรกรองแบบแอกทีฟที่เหนือกว่าวงจรกรองแบบพาสซีฟคือ

1. อัตราขยายสูงสุดหรือค่าสูงสุดของฟังก์ชันถ่ายโอนมากกว่าหนึ่ง
2. ผลกระทบจากการต่อโหลดน้อยเนื่องจากการทำงานของวงจรกรองไม่ขึ้นอยู่กับภาระจ่ายแรงดันให้กับโหลด

#### 4.2.4 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรอง

การออกแบบวงจรกรองแต่ละแบบจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของระบบสื่อสารที่จะนำวงจรกรองไปใช้งานดังนี้ 1 ความถี่แทรกสอดเข้ามาใกล้กับสัญญาณที่ออกแบบไว้มากหรือน้อย และ/หรือ 2 ระดับของสัญญาณที่แทรกสอดเข้ามามากกว่าสัญญาณที่ออกแบบไว้หรือไม่ หากอยู่ใกล้และขนาดของสัญญาณสูงกว่าสัญญาณที่ออกแบบ เราต้องออกแบบให้วงจรมีความชันของอัตราขยายมากเพื่อกำจัดสัญญาณแทรกสอดตัวอย่าง

เราสามารถออกแบบค่ารีปเปิล ชนิดของวงจรกรอง ความถี่คutoff และค่าอื่น ๆ ที่สำคัญของวงจรกรองได้จากการออกแบบสมการฟังก์ชันถ่ายโอน ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนทั่วไปมีค่าเท่ากับ



รูปที่ 4.9 วงจรกรองแบบ RC (ก) อันดับที่ 1 และ (ข) อันดับที่ 2

$$H(s) = a \frac{(s - z_1)(s - z_2) \cdots (s - z_m)}{(s - p_1)(s - p_2) \cdots (s - p_n)} \tag{4.1}$$

เมื่อ  $z_k$  และ  $p_k$  คือ ความถี่ซีโรและความถี่โพล

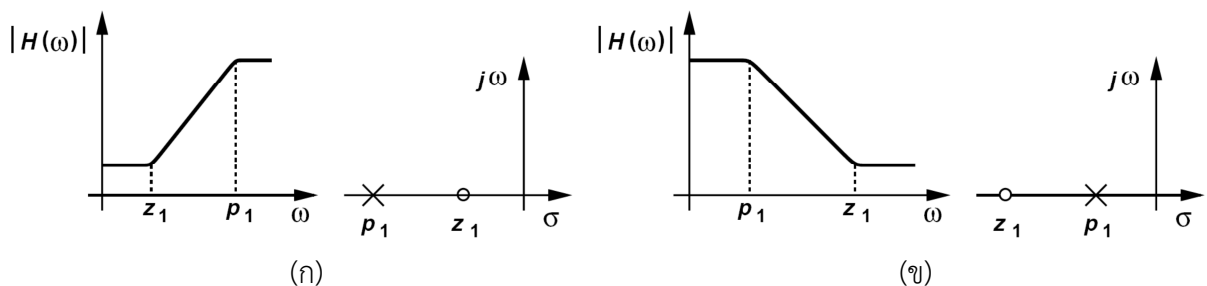
เราสามารถหาค่า  $z_k$  และ  $p_k$  ได้บนคอมเพล็กซ์เพลน ซึ่งค่า  $z_k$  และ  $p_k$  ได้มาจาก  $\sigma + j\omega$  เมื่อ  $\sigma$  คือ ค่าจริง และ  $\omega$  คือค่าจินตภาพ

### 4.3 วงจรกรองอันดับที่หนึ่ง

เนื่องจากขั้นตอนแรกในการวิเคราะห์วงจรกรองคือเราต้องพิจารณาและสร้างจากวงจรกรองอันดับหนึ่งก่อน ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองคือ

$$H(s) = a \frac{s + z_1}{s + p_1} \tag{4.2}$$

จากตัวอย่างวงจรกรองในรูปที่ 4.9 (ก) และฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการที่ 4.2 คุณลักษณะที่จะบ่งบอกถึงว่าเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำ หรือวงจรกรองความถี่สูงจะขึ้นอยู่กับค่า  $z_1$  และ  $p_1$  ซึ่งรูปที่ 4.10 แสดงกราฟผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรอง ค่าองค์ประกอบของย่านที่ถูกลดทอนจนถึงแถบความถี่หยุดมีค่าเท่ากับ  $z_1/p_1$



รูปที่ 4.10 (ก) วงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับที่หนึ่ง (ข) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่หนึ่ง

เมื่อพิจารณาวจรพาสซีฟในรูปที่ 4.10 (ก) ซึ่งถูกนำมาสร้างตามฟังก์ชันถ่ายโอน ด้วยการแทนค่าโพลและซีโรมีค่าดังนี้  $z_1 = -1/(R_1C_1)$  และ  $p_1 = -1/[R_1(C_1 + C_2)]$  เมื่อค่าซีโรมากกว่าค่าโพล ผลการตอบสนองความถี่แสดงในรูปที่ 4.10 (ข)

ตัวอย่างที่ 4.4 จงหาผลการตอบสนองความถี่ของวงจรในรูปที่ 4.10 (ก)

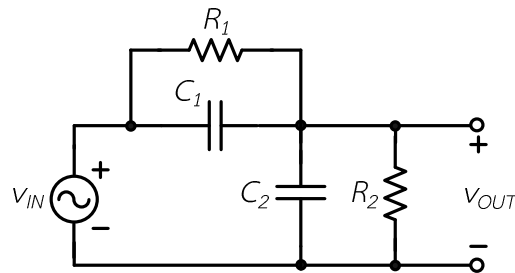
วิธีทำ เรามี

$$\frac{V_{out}}{V_{in}}(s) = \frac{R_2 \parallel (1/sC_2)}{R_2 \parallel (1/sC_2) + R_1 \parallel (1/sC_1)} \tag{4.3}$$

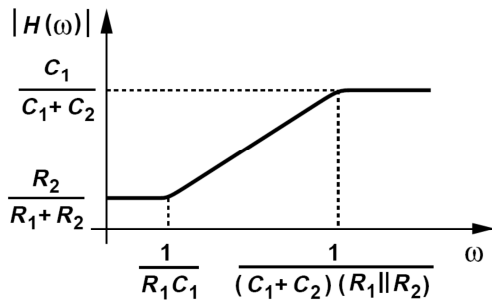
$$= \frac{R_2 (R_1 C_2 s + 1)}{R_1 R_2 (C_1 + C_2) s + R_1 + R_2} \tag{4.4}$$

วงจรมีความถี่ซีโรเท่ากับ  $-1/R_1 C_2$  และความถี่โพลมีค่าเท่ากับ  $-[(C_1 + C_2) R_1 // R_2]^{-1}$  ซึ่งค่าซีโรและโพลจะขึ้นอยู่กับค่าของอุปกรณ์ ค่าซีโรอาจจะน้อยกว่าค่าโพลก็ได้ ถ้าค่าความถี่ซีโรน้อยกว่าค่าความถี่โพลจะเป็นไปตามเงื่อนไขสมการ

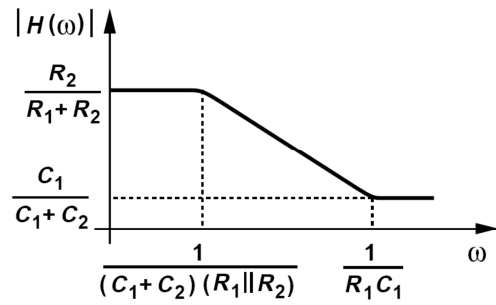
$$\frac{1}{R_1 C_1} < \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 (C_1 + C_2)} \tag{4.5}$$



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.11

และเมื่อ

$$1 + \frac{C_2}{C_1} < 1 + \frac{R_2}{R_1} \tag{4.6}$$

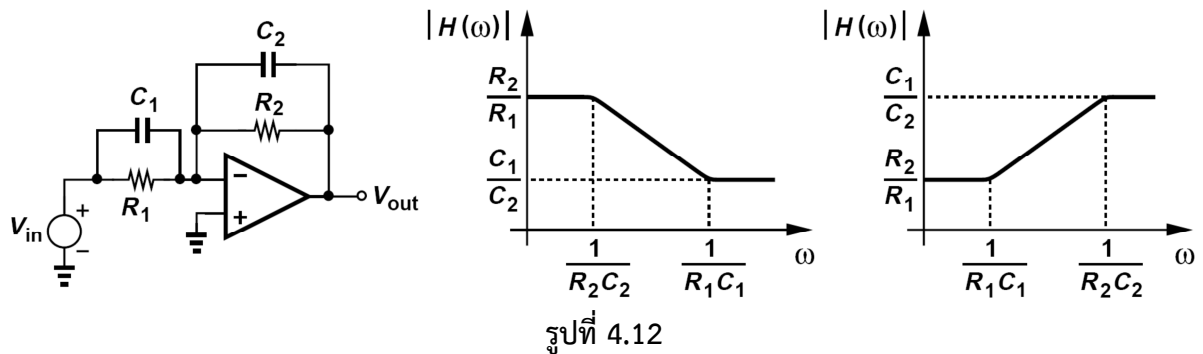
ดังนั้น

$$R_2 C_2 < R_1 C_1 \tag{4.7}$$

ภาพที่ 4.11 (ข) แสดงกราฟผลการตอบสนองทางความถี่ในกรณีที่  $R_2C_2 < R_1C_1$  และภาพที่ 4.11 (ค) แสดงกราฟผลการตอบสนองทางความถี่ในกรณีที่  $R_2C_2 > R_1C_1$  เนื่องจาก ณ. ที่  $s = 0$  ค่า  $V_{out}/V_{in} = R_2/(R_1 + R_2)$  เพราะตัวเก็บประจุทำงานลักษณะเปิดวงจร และที่  $s = \infty$  ค่า  $V_{out}/V_{in} = C_1/(C_1 + C_2)$  เพราะตัวเก็บประจุมีค่าความต้านทานน้อยกว่า  $R_1$  และ  $R_2$  และเป็นการกำหนดค่าปัจจัย

**แบบฝึกหัดที่ 4.4** จากตัวอย่างที่ 4.4 จงออกแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่าน ซึ่งกำหนดให้ความถี่ซีโรเท่ากับ 50 MHz และความถี่โพลเท่ากับ 100 MHz และใช้ตัวเก็บประจุเท่ากับ 10 pF สมมติให้อัตราขยายของออปแอมป์มีค่าสูงมาก

**ตัวอย่างที่ 4.5** รูปที่ 4.12(ก) แสดงวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่านในรูปที่ 4.11 (ก) จงคำนวณหาผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจร สมมติให้ออปแอมป์มีอัตราขยายสูงมาก



**วิธีทำ** ฟังก์ชันถ่ายโอนเท่ากับ

$$\frac{V_{out}}{V_{in}}(s) = \frac{-(R_2 \parallel (1/C_2s))}{R_1 \parallel (1/C_1s)} \tag{4.8}$$

$$= -\frac{R_2}{R_1} \times \frac{R_1C_1s + 1}{R_2C_2s + 1} \tag{4.9}$$

เนื่องจากที่  $s = 0$  ค่า  $V_{out}/V_{in} = -R_2/R_1$  และที่  $s = \infty$  ค่า  $V_{out}/V_{in} = -C_1/C_2$  ภาพที่ 4.12 (ข) แสดงกราฟผลการตอบสนองทางความถี่ในกรณีที่  $R_1C_1 < R_2C_2$  และภาพที่ 4.12 (ค) แสดงกราฟผลการตอบสนองทางความถี่ในกรณีที่  $R_1C_1 > R_2C_2$

**แบบฝึกหัดที่ 4.8** ถ้าความถี่โพลมากกว่าความถี่ซีโรอยู่ 5 เท่า อัตราขยายของแถบผ่านจะมากกว่าอัตราขยายย่านแถบหยุดเท่ากับ 10 เท่า

4.3 การออกแบบวงจรกรองแบบแอกทีฟเครือข่าย

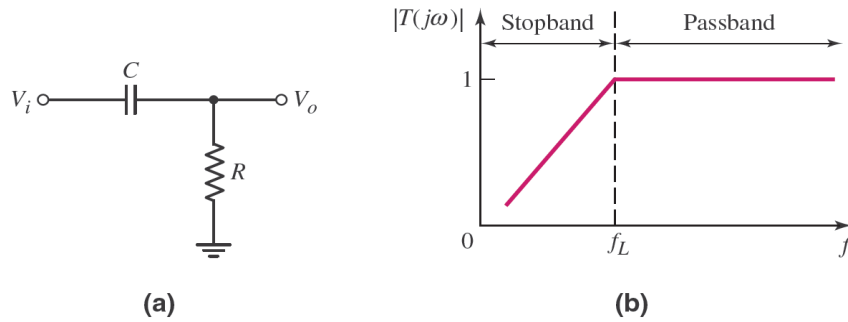
จากการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ เราทราบถึงการทำงานของวงจร RC ในลักษณะวงจรกรองแบบพาสซีฟ รูปที่ 4.13 แสดงตัวอย่างอย่างง่ายของวงจรคลัปปิงตัวเก็บประจุ ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$T(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R}{R + (1/sC)} = \frac{sRC}{1 + sRC} \tag{4.10}$$

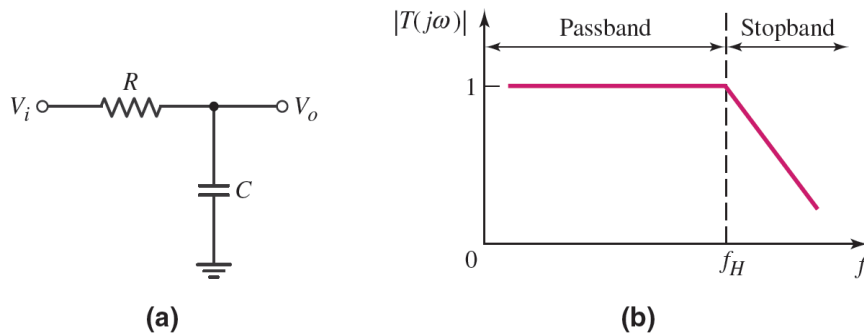
รูปที่ 4.13 แสดงกราฟโพลของอัตราขยายแรงดัน  $|T(s)|$  เราเรียกลักษณะของผลการตอบสนองความถี่ของวงจรนี้เรียกว่าวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

รูปที่ 4.14(d) แสดงตัวอย่างหนึ่งของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

$$T(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1/sC}{R + (1/sC)} = \frac{1}{1 + sRC} \tag{4.11}$$

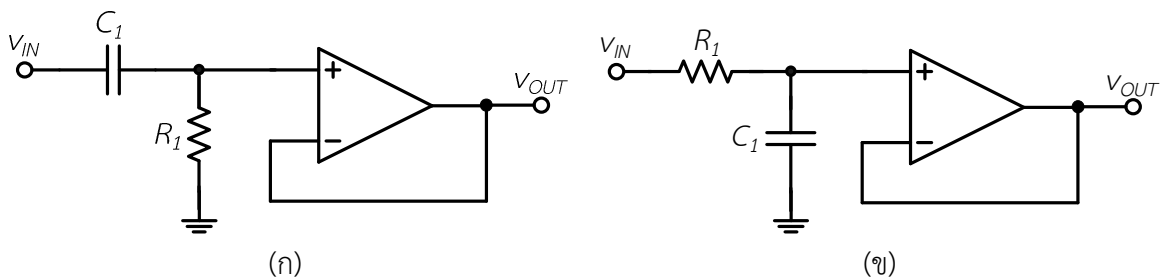


รูปที่ 4.13 (ก) วงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบพาสซีฟ (ข) กราฟโพลของฟังก์ชันถ่ายโอน



รูปที่ 4.14 (ก) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟ (ข) กราฟโพลของฟังก์ชันถ่ายโอน

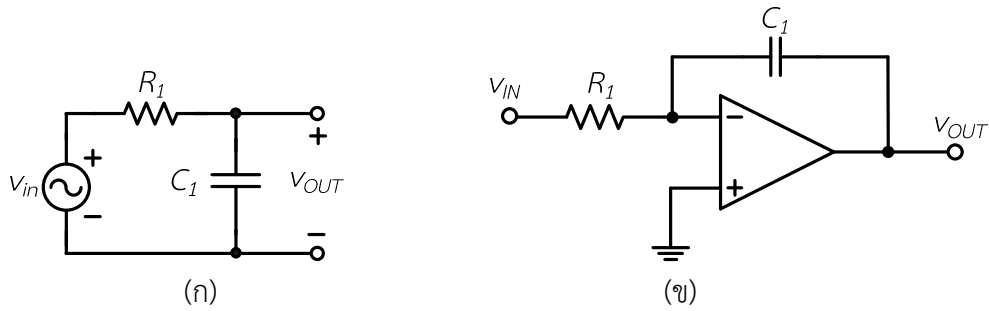
จากการศึกษาวงจรกรองความถี่อันดับหนึ่งพบว่า ผลการตอบสนองของสัญญาณเชิงความถี่ในช่วงแถบผ่านจะมีความชัน -20 dB/dec ส่วนมากเราจะเห็นวงจรกรองที่มีอันดับสูง



รูปที่ 4.15 วงจรกรองแบบแอกทีฟ (ก) วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (ข) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

รูปที่ 4.15 (ก) แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟ รูปที่ 4.15 (ข) แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบแอกทีฟ





รูปที่ 4.16 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (ก) แบบพาสซีฟ (ข) แบบแอคทีฟ

รูปที่ 4.16 (ข) แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์ วงจรกรองแบบแอคทีฟที่ต้องจะยึดหยุ่นต่อการออกแบบ และถูกไปใช้ได้หลากหลายในระบบอิเล็กทรอนิกส์ ตารางที่ 1 แสดงการจำแนกวงจรกรอง

#### 4.4 วงจรกรองอันดับสอง (Second-Order Filters)

ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองอันดับสองสามารถเขียนในรูปแบบสมการไบควอดเรติกได้ดังสมการที่

4.12

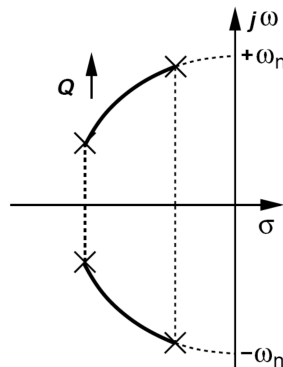
$$H(s) = \frac{\alpha s^2 + \beta s + \gamma}{s^2 + (\omega_n/Q)s + \omega_n^2} \tag{4.12}$$

Unlike the numerator, the denominator is expressed in terms of quantities  $\omega_n$  and  $Q$  because they signify important aspects of the response. We begin our study by calculating the pole frequencies. Since most second-order filters incorporate complex poles, we assume  $(\omega_n/Q)^2 - 4\omega_n^2 < 0$ , obtaining

$$p_{1,2} = -\frac{\omega_n}{2Q} \pm j\omega_n \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} \tag{4.13}$$

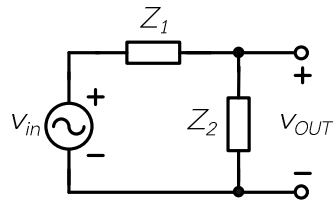
Note that as the “quality factor” of the poles,  $Q$ , increases, the real part decreases while the imaginary part approaches  $\pm\omega_n$ . This behavior is illustrated in Fig. 14.19. In other words, for high  $Q$ 's, the poles look “very imaginary,” thereby bringing the circuit closer to instability.

ค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor:  $Q$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าจำนวนจริงลดลง และค่าจำนวนจินตภาพจะเท่ากับ  $\pm \omega_n$  เท่ากับ รูปที่ 4.17 แสดงการเปลี่ยนของโพลเป็นฟังก์ชันของ  $Q$



รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนของโพลเป็นฟังก์ชันของ  $Q$

เราสามารถศึกษาวงจรกรอง RLC โดยใช้วิธีการของวงจรแบ่งแรงดันซึ่งแสดงในรูปที่ 4.17 เมื่อ  $Z_1$  คือ อิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรม และ  $Z_2$  คืออิมพีแดนซ์ที่ต่อขนาน

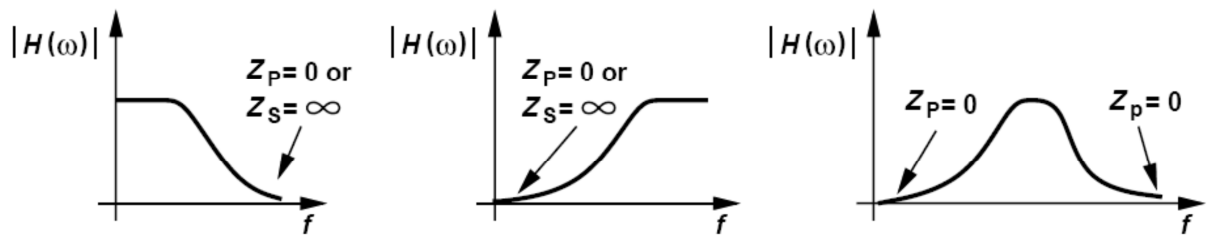


รูปที่ 4.18 วงจรแบ่งแรงดัน

$Z_p$  หาได้จาก

$$\frac{V_{out}}{V_{in}}(s) = \frac{Z_p}{Z_s + Z_p} \tag{4.14}$$

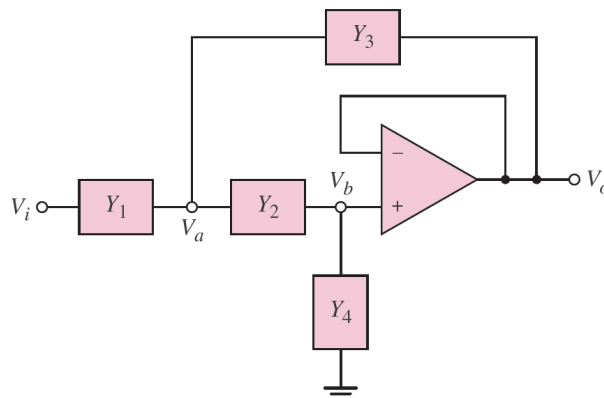
We note that (a) if, at high frequencies,  $Z_P$  goes to zero and/or  $Z_S$  goes to infinity,<sup>6</sup> then the circuit operates as a low-pass filter; (b) if, at low frequencies,  $Z_P$  goes to zero and/or  $Z_S$  goes to infinity, then the circuit serves as a high-pass filter; (c) if  $Z_S$  remains constant but  $Z_P$  falls to zero at both low and high frequencies then the topology yields a band-pass response. These cases are conceptually illustrated in Fig. 14.28.



รูปที่ 4.19 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรในรูปที่ 4.18 (ก) ความถี่ต่ำผ่าน (ข) ความถี่สูงผ่าน (ค) แถบความถี่ผ่าน

#### 4.4.1 วงจรกรองแอกทีฟที่มีความถี่โพล 2 โพล

รูปที่ 4.20 แสดงวงจรกรองแอกทีฟที่มีความถี่โพล 2 โพล ซึ่งแทนค่าอุปกรณ์ด้วยค่าแอดมิตแตนซ์  $Y_1$  ถึง  $Y_4$  และมีออปแอมป์ต่อในลักษณะวงจรตามแรงดัน เราสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน และสามารถออกแบบวงจรกรองได้จากการออกแบบค่าแอดมิตแตนซ์  $Y_1$  ถึง  $Y_4$  ฟังก์ชันถ่ายโอนมีค่าตามคุณลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรแบบต่าง ๆ ได้



รูปที่ 4.20 วงจรกรองแอกทีฟอันดับ 2 แบบทั่วไป

เขียนสมการที่โหนด  $V_b$  ด้วยวิธีการ KCL

$$(V_a - V_b)Y_2 = V_b Y_4 \quad (4.15)$$

จากคุณลักษณะของวงจรตามแรงดัน  $V_a = V_o$  ดังนั้น สมการที่ 4.xx เราสามารถเขียนได้ว่า

$$V_a = V_b \left( \frac{Y_2 + Y_4}{Y_2} \right) = V_o \left( \frac{Y_2 + Y_4}{Y_2} \right) \quad (4.16)$$

แทนสมการที่ 4.16 ในสมการที่ 4.15 และค่า  $V_b = V_o$  เราจะได้

$$V_i Y_1 + V_o (Y_2 + Y_3) = V_o (Y_1 + Y_2 + Y_3) \quad (4.17)$$

$$= V_o \left( \frac{Y_2 + Y_4}{Y_2} \right) (Y_1 + Y_2 + Y_3) \quad (4.18)$$

$$V_a = V_b \left( \frac{Y_2 + Y_4}{Y_2} \right) = V_o \left( \frac{Y_2 + Y_4}{Y_2} \right) \quad (4.19)$$

คูณ  $Y_2$  กับสมการ 4.19 และจัดสมการใหม่ เราจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนใหม่ดังนี้

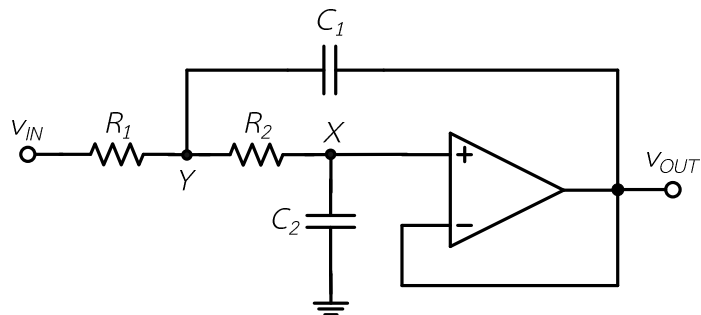
$$T(s) = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}(s) = \frac{Y_1 Y_2}{Y_1 Y_2 + Y_4 (Y_1 + Y_2 + Y_3)} \quad (4.20)$$

ถ้าออกแบบให้วงจรเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ค่า  $Y_1$  และ  $Y_2$  จะต้องเท่ากับค่าความนำ ที่ความถี่ต่ำสัญญาณจะผ่านไปยังวงจรตามแรงดันได้ ถ้า  $Y_4$  คือตัวเก็บประจุ ที่ความถี่สูง สัญญาณที่เอาต์พุตจะมีแรงดันลดลง

ถ้าออกแบบให้วงจรเป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับ 2  $Y_3$  จะต้องเป็นตัวเก็บประจุ ในทางกลับกัน ถ้า  $Y_1$  และ  $Y_2$  คือตัวเก็บประจุ สัญญาณที่มีความถี่ต่ำจะไม่สามารถผ่านไปได้ แต่ถ้าสัญญาณมีความถี่สูงจะผ่านไปยังเอาต์พุตของวงจรตามแรงดันได้ เพราะฉะนั้น ค่า  $Y_3$  และ  $Y_4$  จะต้องเท่ากับค่าความนำ เพื่อวงจรมีฟังก์ชันถ่ายโอนลักษณะความถี่สูงผ่าน

#### 4.4.2 วงจรกรองพื้นฐานของ Sallen และ Key

รูปที่ 4.21 แสดงวงจรกรองแบบพื้นฐานของ Sallen และ Key ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองที่ใช้ ออปแอมป์หนึ่งตัว ออปแอมป์ที่ใช้ถูกต่อลักษณะวงจรบัฟเฟอร์



รูปที่ 4.21 วงจรกรองพื้นฐานของ Sallen และ Key

$$V_Y = R_2 C_2 s V_{OUT} + V_{OUT} \quad (4.21)$$

$$= (1 + R_2 C_2 s) \quad (4.22)$$

$$\frac{(1 + R_2 C_2 s) V_{out} - V_{in}}{R_1} + C_2 s V_{out} + [(1 + R_2 C_2 s) V_{out} - V_{out}] C_1 s = 0 \quad (4.23)$$

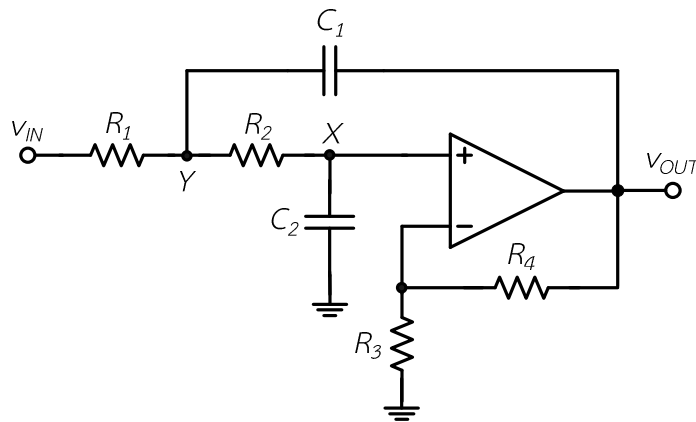
ดังนั้น

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}}(s) = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + (R_1 + R_2) C_2 s + 1} \quad (4.24)$$

$$Q = \frac{1}{R_1 + R_2} \sqrt{R_1 R_2 \frac{C_1}{C_2}} \quad (4.25)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (4.26)$$

ตัวอย่างที่ 4.6 รูปที่ 4.22 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน Sallen และ Key ซึ่งมีอัตราขยายแถบความถี่ผ่านมากกว่าหนึ่ง สมมติให้อุปกรณ์มีคุณลักษณะแบบอุดมคติ จงหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจร



รูปที่ 4.22 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน Sallen and Key ที่มีอัตราขยายอยู่ในแถบความถี่

วิธีทำ

แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ  $V_{out} = (1 + R_4/R_3)V_X$  และกระแสที่ไหลผ่าน  $R_2$  หาได้จาก  $V_X C_2 s = V_{out} C_2 s / (1 + R_4/R_3)$  ดังนั้น แรงดันที่โหนด Y มีค่าเท่ากับ

$$V_Y = \frac{V_{out} + R_2 C_2 s V_{out}}{1 + (R_4/R_3)} \quad (4.27)$$

$$= \frac{1 + R_2 C_2 s}{1 + (R_4/R_3)} V_{out} \quad (4.28)$$

KCL ที่โหนด Y ดังนั้น สมการกระแสที่ได้ดังนี้

$$\frac{1}{R_1} \left( \frac{1 + R_2 C_2 s}{1 + (R_4/R_3)} V_{out} - V_{in} \right) + \left( \frac{1 + R_2 C_2 s}{1 + (R_4/R_3)} V_{out} - V_{out} \right) C_1 s + \frac{R_2 C_2 s V_{out}}{1 + (R_4/R_3)} = 0 \quad (4.29)$$

และเมื่อ

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}} = \frac{1 + (R_4/R_3)}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 [R_1 C_2 + R_2 C_2 - R_1 (R_4/R_3) C_1] s + 1} \quad (4.30)$$

จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนจะเห็นว่าค่า  $\omega_n$  ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

**แบบฝึกหัดที่ 4.6** จากตัวอย่างที่ 4.6 จงวิเคราะห์ห้วงจรกรองในรูปที่ 4.22 อีกครั้งถ้า  $R_0$  ต่ออยู่ระหว่างโหนด Y กับกราวด์

**ตัวอย่างที่ 4.7** กำหนดให้วงจร Sallen และ Key ในรูปที่ 4.22 มีค่า  $R_1 = R_2$  และ  $C_1 = C_2$  วงจรมีค่าคอมเพล็กซ์โพลหรือไม่

**วิธีทำ** จากสมการที่ 4.30 เราทราบว่า

$$\frac{1}{Q} = \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} + \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}} - \sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2} \frac{R_3}{R_4}} \quad (4.31)$$

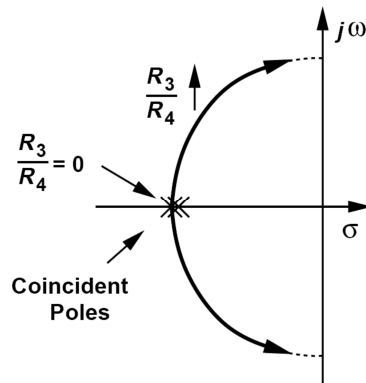
เมื่อกำหนดให้  $R_1 = R_2$  และ  $C_1 = C_2$  ทำให้

$$\frac{1}{Q} = 2 - \frac{R_3}{R_4} \quad (4.32)$$

นั่นคือ

$$Q = \frac{1}{2 - (R_3/R_4)} \quad (4.33)$$

ถ้า  $R_3/R_4 = 0$  ค่า  $Q$  จะเริ่มจาก  $1/2$  และ เพิ่มขึ้นเนื่องจาก  $R_3/R_4$  เพิ่มมากขึ้น 2. เมื่อ  $R_3/R_4 = 0$  ความถี่โพลเริ่มจากค่าจำนวนจริง และเมื่อ  $R_3/R_4 > 0$  ความถี่โพลจะเป็นจำนวนเชิงซ้อน



รูปที่ 4.23

**แบบฝึกหัด 4.15** จงคำนวณหาโพล ถ้า  $R_3 = R_4$

ที่ความถี่เท่ากับศูนย์  $s = j\omega = 0$  และฟังก์ชันถ่ายโอนเท่ากับ

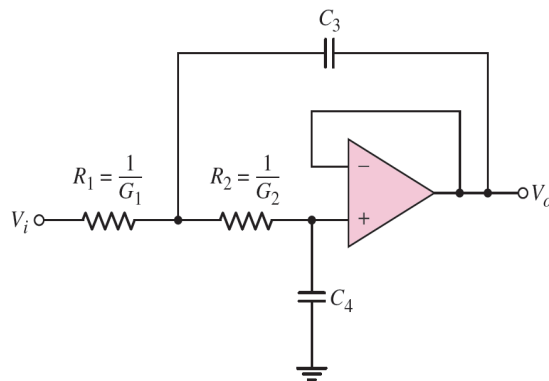
$$T(s=0) = \frac{G_1 G_2}{G_1 G_2} = 1 \quad (4.34)$$

ที่ความถี่สูงมาก  $s = j\omega = \infty$  และฟังก์ชันถ่ายโอนประมาณเท่ากับศูนย์ ดังนั้น วงจรจะทำการกรองให้ความถี่ต่ำผ่านได้

#### 4.4.3 วงจรกรองอันดับสองแบบบัตเตอร์เวิร์ธ

เราสามารถออกแบบวงจรกรองอันดับสอง ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.20 ด้วยการกำหนดให้  $Y_1 = G_1 = 1/R_1$ ,  $Y_2 = G_2 = 1/R_2$ ,  $Y_3 = sC_3$ , และ  $Y_4 = sC_4$  ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$T(s) = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}(s) = \frac{G_1 G_2}{G_1 G_2 + (G_1 + G_2 + sC_3)C_4 s} \quad (4.35)$$



**รูปที่ 4.24** วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน Sallen และ Key

วงจรกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ธ คือวงจรกรองที่มีขนาดของสัญญาณในช่วงแบนวิดธ์คงที่มาก ฟังก์ชันถ่ายโอนถูกออกแบบให้ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนช่วงแถบผ่านของวงจรกรองมีค่าคงที่มากที่สุด เราสามารถออกแบบได้โดยหาอัตราเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันถ่ายโอนเทียบกับความถี่ แล้วกำหนดให้ความถี่แถบผ่านมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะมีความถี่เท่ากับศูนย์

กำหนดให้  $G_1 = G_2 = G = 1/R$  ฟังก์ชันถ่ายโอนมีค่าเท่ากับ

$$T(s) = \frac{\frac{1}{R^2}}{\frac{1}{R^2} + C_4 \left( \frac{2}{R} + sC_3 \right) s} = \frac{1}{1 + RC_4 (2 + sRC_3) s} \quad (4.36)$$

เราหาค่าเวลาคงที่ได้คือ  $\tau_3 = RC_3$  และ  $\tau_4 = RC_4$  ถ้าเราแทนค่า  $s = j\omega$  เราจะได้

$$T(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau_4 (2 + j\omega\tau_3)} = \frac{1}{(1 - \omega^2\tau_3\tau_4) + j(2\omega\tau_4)} \quad (4.38)$$

ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนมีค่าเท่ากับ

$$|T(j\omega)| = \left[ (1 - \omega^2 \tau_3 \tau_4) (2\omega \tau_4)^2 \right]^{-1/2} \quad (4.39)$$

ค่าขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนที่เรียบสูงสุดของย่านกรองความถี่ ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติของวงจรกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ธ เรากำหนดให้

$$\left. \frac{d|T|}{d\omega} \right|_{\omega=0} = 0 \quad (4.40)$$

หาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันถ่ายโอนเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เชิงมุม จะได้ว่า

$$\frac{d|T|}{d\omega} = -\frac{1}{2} \left[ (1 - \omega)^2 + (2\omega)^2 \right]^{-3/2} [-4\omega(1 - \omega) + 8\omega] \quad (4.41)$$

กำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดฟังก์ชันถ่ายโอนเท่ากับศูนย์ที่  $\omega = 0$  ดังนั้น

$$\begin{aligned} \left. \frac{d|T|}{d\omega} \right|_{\omega=0} &= \left[ -4\omega \tau_3 \tau_4 (1 - \omega^2 \tau_3 \tau_4) + 8\omega \tau_4^2 \right] \\ &= 4\omega \tau_4 [-\tau_3(1 - \omega^2 \tau_3 \tau_4) + 8\omega \tau_4^2] \end{aligned} \quad (4.42)$$

สมการที่ 4.42 จะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อ  $2\tau_4 = \tau_3$  หรือ

$$C_3 = 2C_4 \quad (4.43)$$

ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการที่ 4.43 จะเป็นไปตามเงื่อนไขเมื่อ

$$|T| = \frac{1}{\left[ 1 + 4(\omega \tau_4)^4 \right]^{1/2}} \quad (4.44)$$

ที่ 3 dB หรือความถี่คัทออฟจะแสดงให้เห็นด้วยการหาขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนเท่ากับ  $1/2$  หรือเมื่อ  $4(\omega_{3dB} \tau_4)^4 = 1$  เราสามารถหาได้เท่ากับ

$$\omega_{3dB} = 2\pi f_{3dB} = \frac{1}{\tau_4 \sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}RC_4} \quad (4.45)$$

โดยทั่วไปเราสามารถเขียนความถี่คัทออฟในสมการ

$$\omega_{3dB} = \frac{1}{RC} \quad (4.46)$$

จากสมการ 4.44, 4.45 และ 4.46 เราสามารถเขียนสมการใหม่ได้ว่า

$$C_4 = 0.707C \quad (4.47)$$

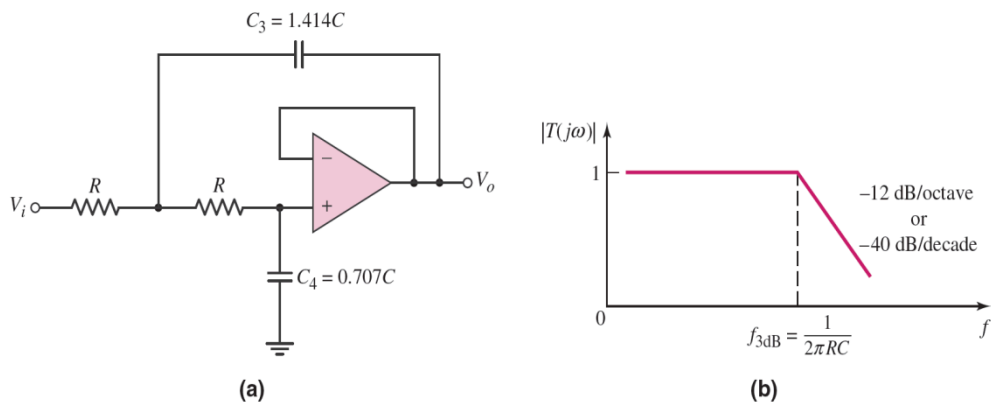
และ

$$C_3 = 1.414C \quad (4.48)$$

รูปที่ 4.25 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองแบบบัตเตอร์เวิร์ธ รูปที่ 4.26 แสดงกราฟโพลของฟังก์ชันถ่ายโอน จากสมการที่ 4.xx วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่สองมีขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$|T| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{3dB}}\right)^4}} \quad (4.67)$$

สมการที่ 4.xx แสดงค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันถ่ายโอนเทียบกับความถี่เชิงมุม เมื่อ  $\omega = 0$  มีค่าเท่ากับศูนย์ปราศจากการกำหนดค่า  $2\tau_4 = \tau_3$  อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มเงื่อนไข  $2\tau_4 = \tau_3$  คูณกับค่าอัตราขยายสูงสุดของวงจรกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ธ



รูปที่ 4.23 วงจรกรองมีค่าความถี่อันดับที่สอง (ก) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธ (ก) วงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธ

ตัวอย่างที่ 4.8 จงออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองแบบบัตเตอร์เวิร์ธสำหรับวงจรขยายคลื่นวิทยุ กำหนดให้ใช้วงจรในรูปที่ xxx และออกแบบให้มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 20 kHz

วิธีทำ จากสมการ 4.xx เราจะได้

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.67)$$

ค่า RC มีค่าเท่ากับ

$$RC = \frac{1}{2\pi f_{3dB}} \quad (4.67)$$

ถ้ากำหนดให้  $R = 100 \text{ k}\Omega$  ดังนั้น  $C = 79.6 \text{ pF}$  ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้  $C_3 = 1.414C = 113 \text{ pF}$  และ  $C_4 = 0.707C = 56.3 \text{ pF}$  เนื่องจากการใช้ค่าของอุปกรณ์ตามมาตรฐานคือ  $R = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $C_3 = 120 \text{ pF}$  และ  $C_4 = 56 \text{ pF}$  ซึ่งผลที่ได้จะทำให้แบนด์วิดท์มีค่าเท่ากับ 20.1 kHz

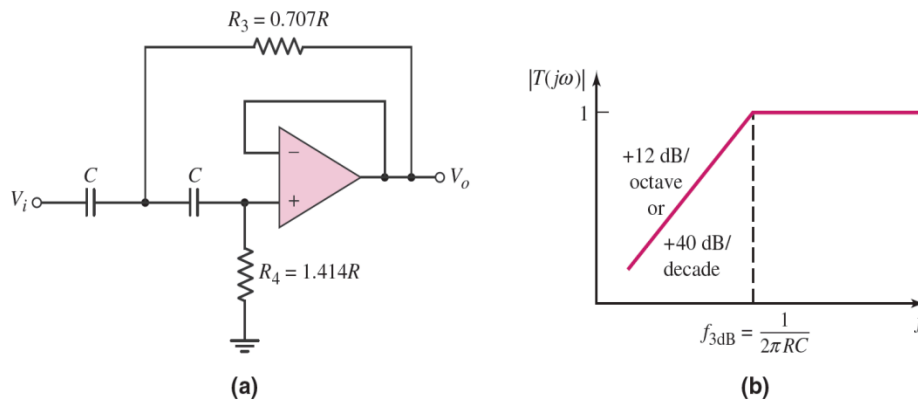
ตัวอย่างที่ 4.9 จงออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองแบบบัตเตอร์เวิร์ธที่ความถี่ 25 kHz กำหนดให้วงจรใช้ตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 50 pF (ตอบ  $C_3 = 50 \text{ pF}$ ,  $C_4 = 25 \text{ pF}$ ,  $R = 180 \text{ k}\Omega$ )

#### 4.6 วงจรกรองอันดับสองความถี่สูงผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธ



เราสามารถออกแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่านได้ด้วยวิธีการนำวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านมาสลับตัวด้านทานกับตัวเก็บประจุ รูปที่ 4.24 แสดงวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับสองแบบบัตเตอร์เวิร์ธ เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการที่ผ่านมา ทำการหาอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงเมื่อ  $s = j\omega = \infty$  ซึ่งเท่ากับศูนย์ ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการความถี่ที่ -3 dB หรือ ความถี่คัทออฟใหม่ได้ว่า

$$\omega_{3dB} = 2\pi f_{3dB} = \frac{1}{RC} \tag{4.67}$$



รูปที่ 4.24 วงจรกรองมีค่าความถี่โพล 3 โพล (ก) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธ (ข) วงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธ

เราหาค่า  $R_3 = 0.707R$  และ  $R_4 = 1.414R$  ค่าขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองอันดับสองความถี่สูงผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธคือ

$$|T| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{3dB}}{f}\right)^4}} \tag{4.67}$$

รูปที่ 4.24 (ข) แสดงกราฟโพลเดหรือขนาดของวงจรกรองอันดับสองความถี่สูงผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธ

### 4.7 วงจรกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ธที่มีอันดับสูง (Higher-Order Butterworth Filters)

อันดับฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรมัลติโพลคือจำนวนโพล และถูกออกแบบด้วยความต้องการของการนำไปใช้งานแต่ละเงื่อนไขของวงจร จำนวน  $N$  อันดับของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน  $\omega_c$  ที่ความถี่สูง ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนจะลดลงด้วยอัตรา  $N \times -20$  dB/decade ขณะที่วงจรกรองความถี่สูงผ่าน ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา  $N \times 20$  dB/decade จนถึงความถี่คัทออฟ ซึ่งความถี่คัทออฟมีค่าเท่ากับ

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi RC} \tag{4.67}$$

ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่  $N$  แบบบัตเตอร์เวิร์ธคือ

$$|T| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{3dB}}\right)^{2N}}} \tag{4.67}$$

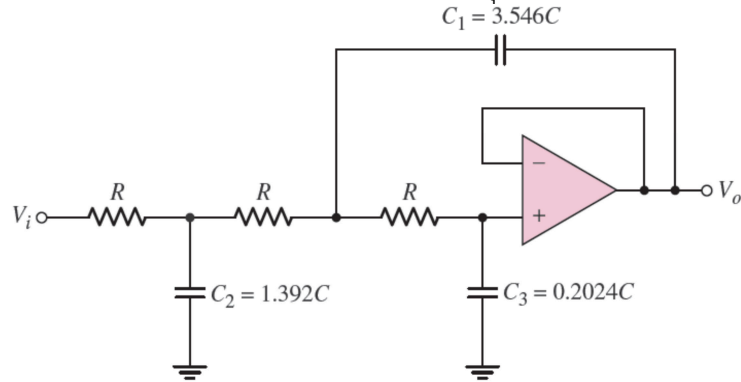
สำหรับวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับที่  $N$  แบบบัตเตอร์เวิร์ธ มีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

$$|T| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{3dB}}{f}\right)^{2N}}} \quad (4.67)$$

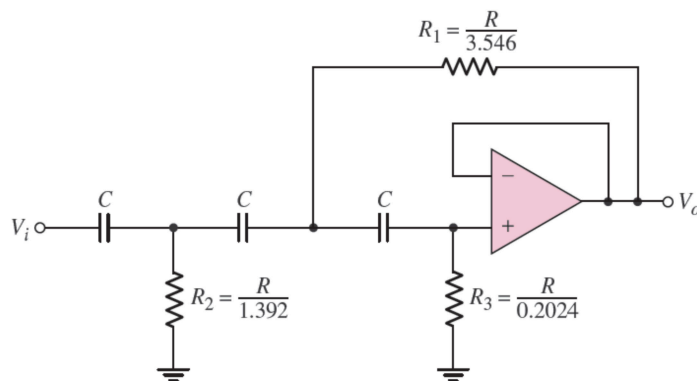
รูปที่ 4.25(ก) แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสามแบบบัตเตอร์เวิร์ธ ซึ่งวงจรจะใช้ตัวต้านทานหาค่า 3 ตัวที่มีค่าเท่ากัน และความสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุที่พบโดยการใช้อนุพันธ์ตัวแรกและตัวที่สองของแรงดันไฟฟ้าที่ได้ขนาดและความถี่และการอนุพันธ์นั้นเท่ากับศูนย์ที่  $s = j\omega = 0$  รูปที่ 4.25(ข) แสดงวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับสามแบบบัตเตอร์เวิร์ธ ในกรณีนี้ วงจรจะใช้ตัวเก็บประจุ 3 ตัวที่มีค่าเท่ากัน และมีความสัมพันธ์ระหว่างตัวต้านทานเพื่อให้สัญญาณความถี่สูงผ่านไป

เราสามารถสร้างวงจรกรองที่มีอันดับสูงด้วยการเพิ่มวงจร  $RC$  อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มวงจร  $RC$  จะทำให้เกิดผลกระทบของโหลด ประโยชน์ของตัวกรองที่ใช้งานอยู่ว่า ถ้าสองคนหรือมากกว่า ออกแบบวงจรกรองประสิทธิภาพการผลิตขนาดใหญ่ใช้งานตัวกรองขั้นสูง เนื่องจากออกแบบมีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเอาต์พุตต่ำมาก ดังนั้น วงจรจึงไม่ปัญหาเรื่องผลกระทบของโหลดเมื่อต่อคาสแคดหลายภาค

รูปที่ 4.26(ก) แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 4 แบบบัตเตอร์เวิร์ธ ผลการตอบสนองของวงจรที่ทำให้ค่าอัตราขยายสูงสุดเรียบมากนี้ไม่ได้มาจากวงจรกรองอันดับ 2 สองวงจรมาต่อคาสแคดกัน ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุเป็นพหุนามอันดับ 3 แรกของฟังก์ชันการถ่ายโอน รูปที่ 4.26(ข) แสดงวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับที่ 4 แบบบัตเตอร์เวิร์ธ วงจรกรองอันดับสูงสามารถออกแบบได้โดยไม่ต้องพิจารณาเงื่อนไขวงจรกรองแบบแถบความถี่ผ่าน และวงจรกำจัดแถบความถี่จะใช้คุณลักษณะของวงจรที่เหมือนกัน

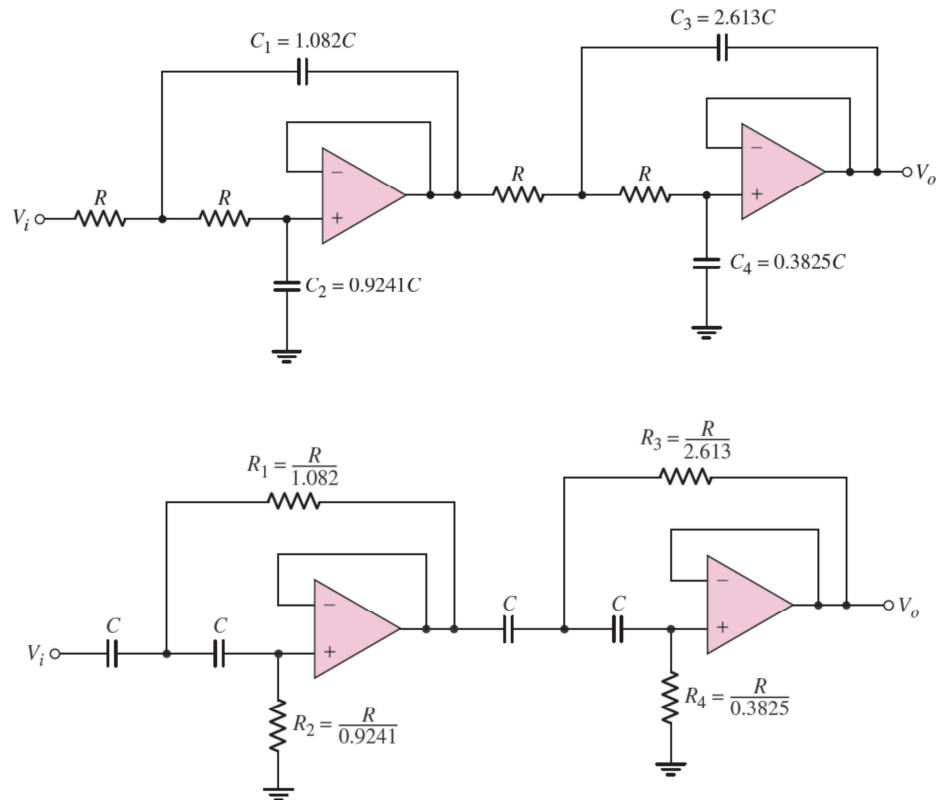


(ก)



(ข)

**รูปที่ 4.25** วงจรกรองมีค่าความถี่อันดับสาม (ก) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธ (ข) วงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธ



รูปที่ 4.26 วงจรกรองมีค่าความถี่โพล 4 โพล (ก) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธ (ง) วงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธ

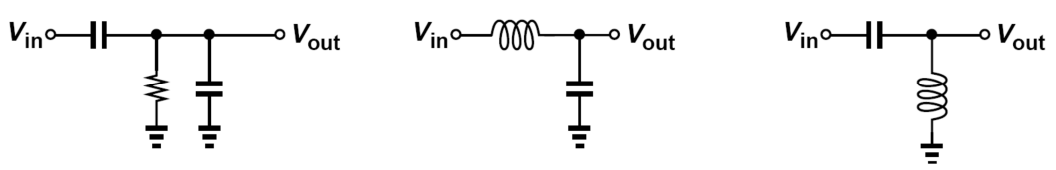
แบบฝึกหัดที่ 4.xx จงออกแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับสามแบบบัตเตอร์เวิร์ธที่มีความถี่ตัดเท่ากับ 200 Hz และที่ความถี่สูงผ่านมีอัตราขยายเท่ากับหนึ่ง (ตอบ (ก) ถ้ากำหนดให้  $C = 0.01 \mu F$ , ดังนั้น  $R_1 = 22.44 k\Omega$ ,  $R_2 = 57.17 k\Omega$  และ  $R_3 = 393.2 k\Omega$  (ข) (i)  $T = 0.124$  หรือ  $-18.1$  dB (ii)  $T = 0.959$  หรือ  $-0.365$  dB)

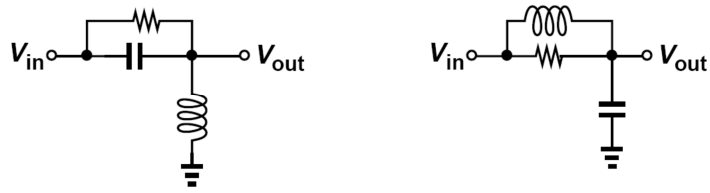
แบบฝึกหัดที่ 4.xx (ก) จงออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสี่แบบบัตเตอร์เวิร์ธที่มีความถี่ตัดเท่ากับ 30 kHz (ข) จงหาความถี่  $\omega_c$  ที่ ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนเท่ากับ 99% ของค่าสูงสุด (ตอบ (ก) ถ้ากำหนดให้  $R = 100 k\Omega$  ดังนั้น  $C_1 = 57.4 pF$ ,  $C_2 = 49.02 pF$ ,  $C_3 = 138.6 pF$  และ  $C_4 = 20.29 pF$  (ข)  $f = 18.43$  kHz)

แบบฝึกหัดที่ 4.xx จงออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่ง สอง สาม และสี่แบบบัตเตอร์เวิร์ธที่มีความถี่ตัดเท่ากับ 10 kHz และที่ความถี่ต่ำผ่านมีอัตราขยายเท่ากับหนึ่ง จงหาขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีหน่วยเป็น dB เมื่อความถี่เท่ากับ 12 kHz (ตอบ  $-3.87$  dB,  $-4.88$  dB,  $-6$  dB และ  $-7.24$  dB)

แบบฝึกหัดท้ายบท

1. จงหาผลตอบสนองความถี่ของวงจรในรูปที่ p4.1





รูปที่ p4.1

2. Derive the transfer function of each network shown in Fig. 14.54 and determine the poles and zeros.
3. We wish to realize a transfer function of the form

2.

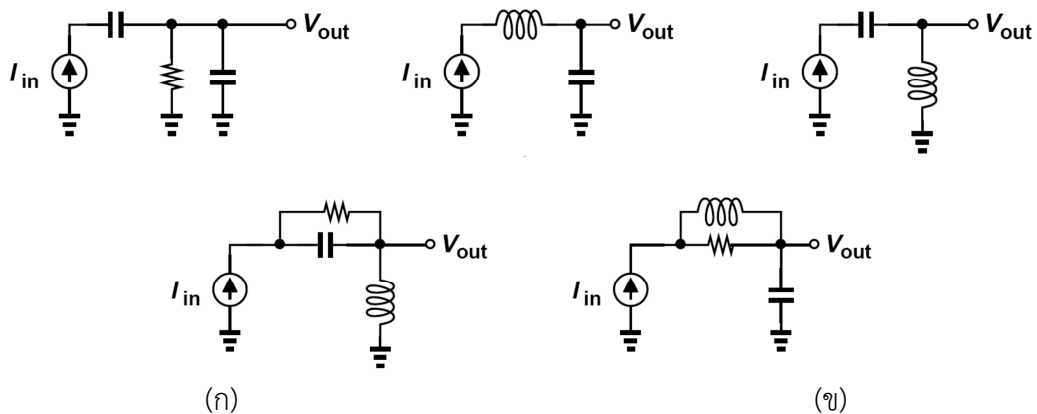
3.

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}}(s) = \frac{1}{(s + a)(s + b)}$$

เมื่อ a และ b คือค่าจริงบวก จงหา xxxx ฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปที่ xxxx

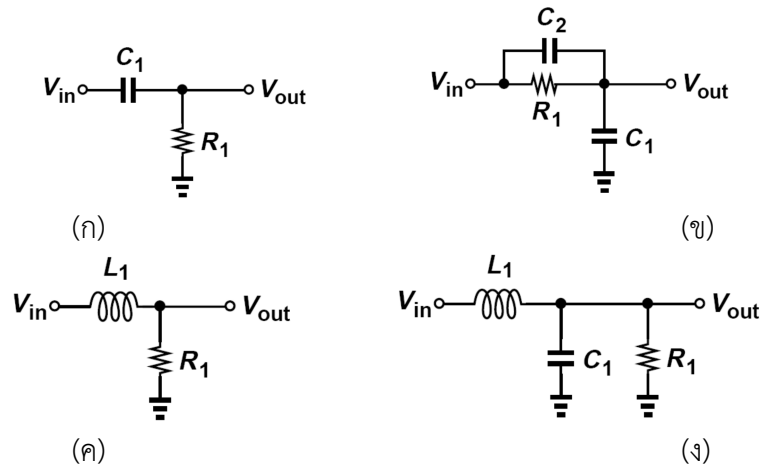
4. In some applications, the input to a filter may be provided in the form of a current. Compute the transfer function,  $V_{out}/I_{in}$ , of each of the circuits depicted in Fig. 14.55 and determine the poles and zeros.

4.



รูปที่ p4.2

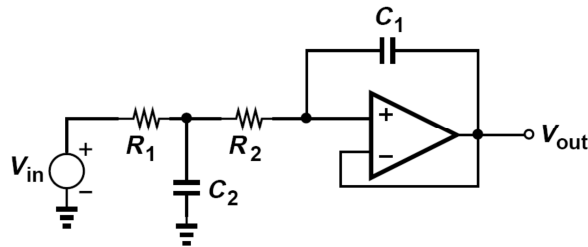
5. รูปที่ 4.56 แสดงวงจรกรองความถี่สูงผ่าน จงหาค่าความไวของโพลและซีโรเพื่อหาค่า  $R_1$  และ  $C_1$
6. จงพิจารณาวงจรกรองในรูปที่ 4.57 เพื่อคำนวณหาค่าความไวของโพล และซีโรเพื่อหาค่า  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $R_1$
7. We wish to achieve a pole sensitivity of 5% in the circuit illustrated in Fig. 14.58. If  $R_1$  exhibits a variability of 3%, what is the maximum tolerance of  $L_1$ ?



รูปที่ p4.3

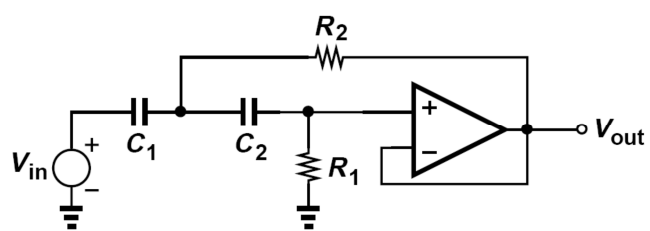
8. รูปที่ p4.4 แสดงวงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่านถูกออกแบบให้มี 2 โพล  
 (ก) จงพิสูจน์หาฟังก์ชันถ่ายโอน  
 (ข) จงคำนวณหาโพลและเงื่อนไขเพื่อยืนยันเสถียรภาพ  
 (ค) จงคำนวณหาโพลที่อ่อนไหวมาก ซึ่งสัมพันธ์กับ  $R_1$ ,  $C_1$  และ  $L_1$

18.



รูปที่ p4.4

19. วงจรกรอง SK ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.34 ถูกออกแบบให้มีค่า  $K = 4$  และ  $C_1 = C_2$  จงหาค่า  $R_1/R_2$  เพื่อให้ได้  $Q = 4$  what is the resulting  $Q$  sensitivity to  $R_1$   
 20. วงจรกรอง SK ถูกออกแบบให้มีค่า  $K = 1$  ถ้าต้องการให้ผลการตอบสนองความถี่มีพีคขึ้น  $1 \text{ dB}$  ตลอด จงหาค่าของอุปกรณ์ต่างๆ  
 21. วงจรกรอง SK ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.33 มี  $S_{R_1}^Q = 2$  ถ้า  $C_1 = C_2$  จงพล็อตกราฟ  $Q$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $\sqrt{R_2/R_1}$  และจงหาค่าของค่า  $Q$  และ  $\sqrt{R_2/R_1}$   
 22. รูปที่ 4.61 แสดงวงจรกรองความถี่สูงผ่านโดยใช้รูปแบบวงจรกรอง SK จงพิสูจน์หาฟังก์ชันถ่ายโอนและหาค่า  $Q$  และ  $\omega_n$



รูปที่ p 4.5

## เอกสารอ้างอิง

1. Behzad Razavi "Fundamental of Microelectronics"
2. Donald A. Neamen "Microelectronic Circuits Analysis and Design"