

## วงจรเรโซแนนซ์และการวิเคราะห์ห้วงจรโดยใช้ PSpice

อ วิทวัส วิทย์ชำนานุกุล (kwwithaw@kmitl.ac.th)

คณะวิศวกรรมศาสตร์

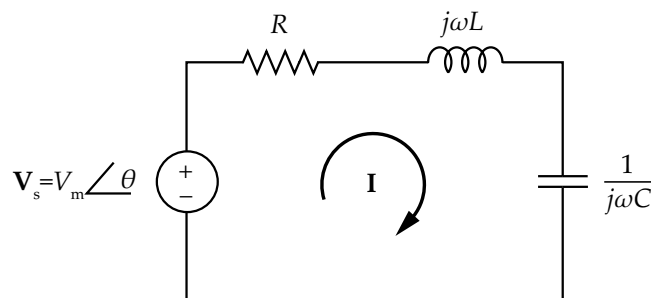
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**วัตถุประสงค์:** เพื่อให้ให้นักศึกษาเข้าใจการทำงานของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและขนาน และสามารถใช้โปรแกรม PSpice เพื่อจำลองการทำงานของวงจรได้

### A. ทฤษฎีของวงจรเรโซแนนซ์

วงจรเรโซแนนซ์มีลักษณะสำคัญคือผลตอบสนองของความถี่ทางขนาดหรือแอมพลิจูดจะเป็นยอดแหลมคือวงจรจะยอมให้ความถี่ผ่านเพียงช่วงแคบๆ เท่านั้น วงจรเรโซแนนซ์ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ (C) และตัวเหนี่ยวนำ (L) อย่างน้อยชนิดละหนึ่งตัว ประโยชน์ของวงจรเรโซแนนซ์ที่สำคัญก็คือใช้สร้างตัวกรองความถี่เพื่อเลือกเอาความถี่ใดความถี่หนึ่งออกมา การใช้งานที่พบได้บ่อยคือใช้เลือกความถี่ของสถานีในเครื่องรับวิทยุหรือโทรทัศน์

#### A.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม



รูปที่ 1. วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม [1]

วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมในรูปที่ 1 มีอิมพีแดนซ์รวมเท่ากับ

$$\mathbf{Z} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$$

หรือเขียนได้เป็น

$$\mathbf{Z} = R + j(X_L - X_C)$$

สถานะเรโซแนนซ์ของวงจรจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยอุปกรณ์แบบรีแอคทีฟตัวหนึ่ง (นั่นคือ C หรือ L) มีค่าเท่ากับพลังงานที่ส่งออกมาจากอุปกรณ์แบบรีแอคทีฟอีกตัวหนึ่ง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือค่ารีแอคแตนซ์ของ C และ L หักล้างกันหมดเหลือเพียง resistance เท่านั้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{Im}(\mathbf{Z}) = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0$$

ค่าความถี่  $\omega_0$  คือความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นจากสมการด้านบนจะได้ว่า

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ rad/s}$$

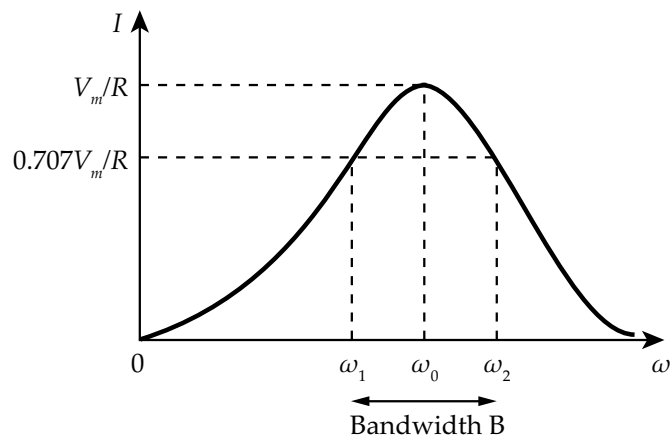
และจากความสัมพันธ์  $\omega_0 = 2\pi f_0$  เราจะได้ว่า

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ Hz}$$

ในวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมนี้ขนาดของกระแสจะเท่ากับ

$$I(\omega) = |\mathbf{I}| = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}$$

ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2



รูปที่ 2. กระแสที่เกิดขึ้นในวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม [1]

ที่ความถี่เรโซแนนซ์กระแสในวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมจะมีค่าสูงที่สุดคือ

$$I_{\text{MAX}} = I(\omega_0) = V_m/R$$

และที่ความถี่ Cutoff  $\omega_c$  พลังงานจะลดลงครึ่งหนึ่งของพลังงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ หรือกระแสลดลงเป็น  $1/\sqrt{2}$  เท่าของกระแสสูงสุด ดังนั้นเราสามารถหาความถี่ Cutoff ได้จากสมการ

$$I_c = I_{\text{MAX}}/\sqrt{2}$$

หรือ

$$\sqrt{R^2 + (\omega_c L - 1/\omega_c C)^2} = \sqrt{2}R$$

แก่สมการจะได้ความถี่ Cutoff สองความถี่คือ

$$\omega_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}}$$

$$\omega_2 = \frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}}$$

โดยความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ Cutoff กับความถี่เรโซแนนซ์คือ

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2}$$

และเราสามารถคำนวณค่า Bandwidth ของวงจรเรโซแนนซ์ได้จาก

$$B = \omega_2 - \omega_1 = R/L \text{ rad/s}$$

ส่วนความแหลมคม (Sharpness) ของผลตอบสนองในวงจรเรโซแนนซ์จะวัดได้จากค่า Q หรือ Quality factor ซึ่งคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ส่งระหว่างอุปกรณ์แบบรีแอคทีฟ ณ ความถี่เรโซแนนซ์ ต่อพลังงานสูญเสียในความต้านทานของวงจร นั่นคือ

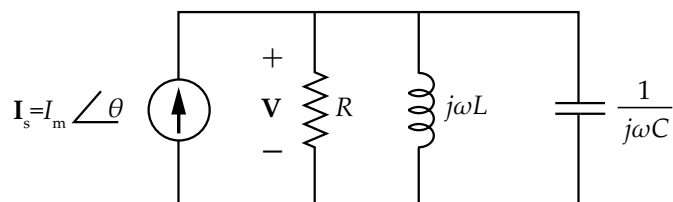
$$Q = \frac{\text{Reactive energy}}{\text{Average energy}} = \frac{I^2 X_L(\omega_0)/2}{I^2 R/2} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

จากสมการของ Bandwidth และ Q จะได้ว่า

$$Q = \frac{\omega_0}{B}$$

ค่า Q สูงหมายถึงว่าวงจรจะยอมให้สัญญาณรอบๆ ความถี่เรโซแนนซ์ผ่านได้ในช่วงแคบๆ และสัญญาณที่ความถี่อื่นๆ ทั้งหมดจะถูกกั้นไว้ และจะถือว่าวงจรเรโซแนนซ์นั้นมี Quality factor สูงเมื่อค่า Q มากกว่า 10

### A.2 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน



รูปที่ 3. วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน [1]

วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานดังแสดงในรูปที่ 3 มีค่า admittance รวมเท่ากับ

$$Y = \frac{1}{R} + j\omega C + \frac{1}{j\omega L}$$

เช่นเดียวกับวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม สถานะเรโซแนนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานเกิดขึ้นเมื่อพลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยอุปกรณ์แบบรีแอคทีฟตัวหนึ่งมีค่าเท่ากับพลังงานที่ส่งออกมาจากอุปกรณ์แบบรีแอคทีฟอีกตัวหนึ่ง ดังนั้นความถี่เรโซแนนซ์จะเท่ากับ

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ rad/s}$$

ค่าความถี่ Cutoff, Bandwidth, และ Quality factor ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานสามารถหาได้จากสูตรของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม โดยเปลี่ยนค่า  $R, L$ , และ  $C$  ในสมการให้เป็น  $1/R, C$  และ  $L$  ตามลำดับ จะได้ว่า

$$\omega_1 = -\frac{1}{2RC} + \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 + \frac{1}{LC}}$$

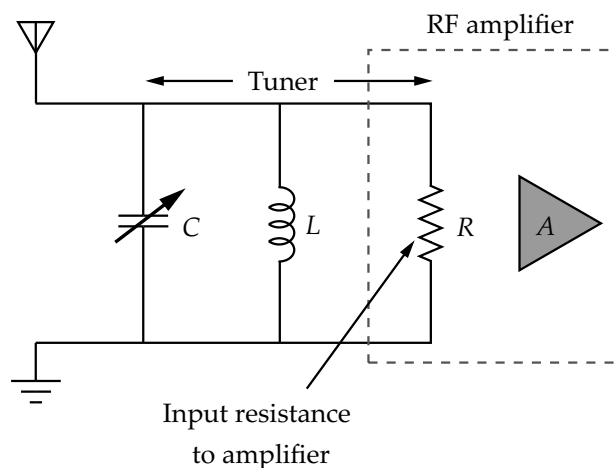
$$\omega_2 = \frac{1}{2RC} + \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 + \frac{1}{LC}}$$

$$B = \omega_2 - \omega_1 = 1/RC$$

$$Q = \frac{\omega_0}{B} = \omega_0 RC = R \sqrt{\frac{C}{L}}$$

### A.3 ตัวอย่างการใช้งานวงจรเรโซแนนซ์

วงจรเรโซแนนซ์ถูกใช้งานมากในวงจรเครื่องรับวิทยุและโทรทัศน์เพื่อปรับเลือกสถานี รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างวงจรเรโซแนนซ์สำหรับภาครับวิทยุ AM ซึ่งเป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานและมี  $C$  ปรับค่าได้ หาก  $L$  มีขนาด  $1 \mu\text{H}$  จงหาช่วงของ  $C$  ที่ทำให้วงจรนี้สามารถปรับความถี่เรโซแนนซ์ได้ตลอดย่านของวิทยุ AM



รูปที่ 4. ตัวอย่างของวงจรเรโซแนนซ์ในภาครับวิทยุ [1]

ย่านความถี่วิทยุ AM ถูกกำหนดไว้ในช่วง 540 kHz ถึง 1600 kHz ดังนั้นเพื่อให้ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรปรับได้ตลอดย่านนี้ จะต้องคำนวณหาค่า C โดยใช้สมการความถี่เรโซแนนซ์

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ Hz}$$

หรือเขียนได้เป็น

$$C = \frac{1}{L(2\pi f_0)^2}$$

ดังนั้นเมื่อ  $f_0 = 1600 \text{ kHz}$  จะได้ C เท่ากับ 9.9 nF และเมื่อ  $f_0 = 540 \text{ kHz}$  จะได้ C เท่ากับ 86.9 nF ดังนั้นช่วงของ C สำหรับวงจรมีค่า 9.9nF ถึง 86.9 nF

## B. การทดลองวงจรเรโซแนนซ์โดยใช้ OrCAD PSpice

OrCAD PSpice สามารถวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่ของวงจรได้โดยใช้ฟังก์ชันของ AC Sweep โดยเราจะต้องกำหนดความถี่เริ่มต้น (Start Freq) ความถี่สิ้นสุด (End Freq) และจำนวนจุดความถี่ทั้งหมดที่จะวิเคราะห์ (Total Pts) ซึ่งหากไม่ทราบค่าที่แน่ชัดอาจจะต้องลองผิดลองถูกเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

สำหรับ OrCAD PSpice เราสามารถกำหนด AC Sweep ได้สามแบบด้วยกันคือ

- **Linear:** ความถี่ที่วิเคราะห์จะเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นจากความถี่เริ่มต้นถึงความถี่สิ้นสุด โดยจำนวนจุดทั้งหมดเท่ากับ Total Pts
- **Octave:** ความถี่จะเพิ่มขึ้นทีละสองเท่าจากความถี่เริ่มต้นถึงความถี่สิ้นสุด (เช่น 2 Hz, 4 Hz, 8 Hz) โดยในแต่ละ Octave จะมีจำนวนจุดทั้งหมดเท่ากับ Total Pts
- **Decade:** ความถี่จะเพิ่มขึ้นทีละสิบเท่าจากความถี่เริ่มต้นถึงความถี่สิ้นสุด (เช่น 2 Hz, 20 Hz, 200 Hz) โดยในแต่ละ Decade จะมีจำนวนจุดทั้งหมดเท่ากับ Total Pts

โดยปกติเราจะใช้ Linear sweep เมื่อต้องการวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่ในช่วงแคบๆ ส่วน Octave sweep และ Decade sweep จะใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่ในช่วงกว้าง เนื่องจากหากใช้ Linear sweep กับความถี่ในย่านกว้างจะมีข้อมูลกระจุกตัวอยู่ในช่วงความถี่ฝั่งใดฝั่งหนึ่งมากเกินไป

เมื่อกำหนดค่าต่างๆสำหรับ AC Sweep แล้ว PSpice จะทำการวิเคราะห์วงจรในสภาวะเสถียร (Steady-state) โดยที่แหล่งกำเนิดกระแสและแรงดันในวงจรจะเปลี่ยนความถี่ไปเรื่อยๆ ในช่วงที่กำหนดไว้

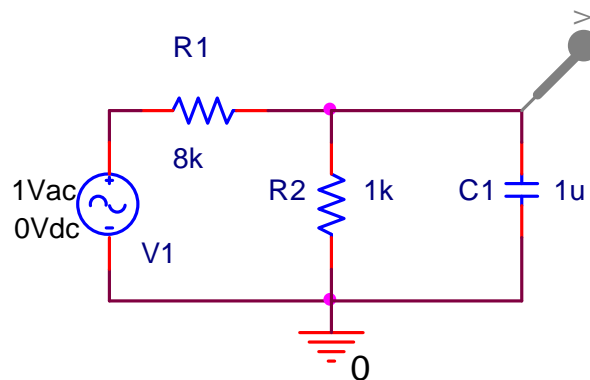
## B.1 ขั้นตอนการใช้ PSpice เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองของความถี่ของวงจร

ในหัวข้อนี้จะเป็นตัวอย่างการใช้ OrCAD PSpice เพื่อหาผลตอบสนองของความถี่ของวงจร RC ซึ่งมีลักษณะเป็นวงจรความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter)

เริ่มต้นการทำงาน


1. เปิดโปรแกรม OrCAD PSpice โดยไปที่ *Start > All Programs > OrCAD 16.0 > OrCAD Capture > OrCAD Capture* จะได้หน้าต่าง OrCAD Capture – [Session Log] ขึ้นมา
2. ให้เลือก *File > New > Project ...* จะมีหน้าต่าง New Project ให้เลือก Analog or Mixed A/D เนื่องจากเราต้องการวิเคราะห์วงจร Analog จากนั้นให้ตั้งชื่อโปรเจกต์ใน Name และโฟลเดอร์ที่ต้องการเก็บโปรเจกต์ใน Location แล้วกด OK
3. ในหน้าต่าง Create PSpice Project ให้เลือก Create a blank project แล้วกด OK

วาดวงจร



รูปที่ 5. วงจรอนุกรม RC ใน PSpice

1. กดปุ่ม P เพื่อแสดงหน้าต่าง Place Part ในครั้งแรกอาจจะยังไม่มีอุปกรณ์แสดงอยู่ในช่อง Part List เนื่องจากยังไม่ได้เพิ่มไลบรารีของอุปกรณ์ลงในโปรเจกต์ ให้กด Add Library ... โดยปกติโปรแกรมจะเปิดไปที่โฟลเดอร์ \$OrCAD\$\OrCAD\_16.0\tools\capture\library\pspice โดยอัตโนมัติ ซึ่งในโฟลเดอร์นั้นจะมีไฟล์ไลบรารีของอุปกรณ์ชนิดต่างๆ อยู่ โดยมีสกุลเป็น \*.olb ให้เลือกเฉพาะ analog.olb และ source.olb แล้วกด OK จะเห็นว่ามีการเพิ่มไลบรารีเพิ่มขึ้นในช่อง Libraries
2. วาดแหล่งกำเนิดแรงดัน V1 โดยเลือก Libraries > SOURCE จากนั้นเลือก Part List > VAC แล้วกด OK เมาส์จะมีรูปของ VAC ขึ้นอยู่ให้คลิกซ้ายบนจุดที่ต้องการจะวาง VAC แล้วกด Esc เพื่อจบการวาง โดยปกติ VAC จะกำหนดค่า Vac หรือแรงดันไฟสลับให้เป็น 1 โวลต์และ Vdc หรือแรงดันไฟตรง (Offset) เป็น 0 โวลต์อยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงค่า

3. วาด R1 โดยกด P อีกครั้งหนึ่งเพื่อแสดงหน้าต่าง Place Part แล้วเลือก Libraries > ANALOG จากนั้นเลือก Part List > R แล้วกด OK จากนั้นวางอุปกรณ์ลงบนพื้นที่ทำงานเช่นเดียวกับในขั้นตอนที่ 2 หากต้องการหมุนตัวอุปกรณ์ให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมให้กดปุ่ม R ก่อนที่จะวางตัวอุปกรณ์ หลังจากวางแล้วให้ดับเบิลคลิกที่ 1k เพื่อเปลี่ยนค่าใน Value ให้เป็น '8k' หรือ 8 กิโลโห์มนั่นเอง
4. วาด R2 โดยทำซ้ำในขั้นตอนที่ 3 และให้ค่าของตัวต้านทานเป็น 1 กิโลโห์ม
5. วาด C1 โดยกด P อีกครั้งแล้วเลือก Libraries > ANALOG จากนั้นเลือก Part List > C แล้วกด OK จากนั้นวางอุปกรณ์ลงบนพื้นที่ทำงาน ดับเบิลคลิกที่ 1n เพื่อเปลี่ยนค่าใน Value ให้เป็น '1u' หรือ 1 ไมโครฟารัด
6. กด G เพื่อวางกราวด์ของวงจร โดยเลือก Libraries > CAPSYM จากนั้นเลือก Symbol > 0 แล้วกด OK และวางกราวด์ลงบนพื้นที่ทำงานในตำแหน่งที่เหมาะสม
7. ลากสายเพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกันโดยกด W เมาส์จะเปลี่ยนเป็นรูปเครื่องหมายบวก ให้คลิกที่ตำแหน่งเริ่มต้นของสาย คลิกที่ตำแหน่งที่ต้องการจะเลี้ยวสายไปทางซ้ายหรือขวา และคลิกที่ตำแหน่งปลายสาย จากนั้นกด Esc ทำซ้ำจนกว่าจะครบทุกสาย (ระวัง: ข้อแตกต่างระหว่างจุดตัดของสายสองเส้น หากเป็นจุดเชื่อมต่อจะมีวงกลมสีชมพูทับที่จุดตัดชัดเจน หากไม่มีวงกลมทับแสดงว่าจุดนั้นไม่ใช่จุดเชื่อมต่อของสาย)
8. วางโพรบ V เพื่อวัดแรงดันที่โหนดร่วมของ R1, R2, และ C1 โดยไปที่เมนู PSpice > Markers > Voltage Level หรือกด  บนแถบเครื่องมือ แล้ววางโพรบไว้บนพื้นที่ทำงานในตำแหน่งที่เหมาะสม

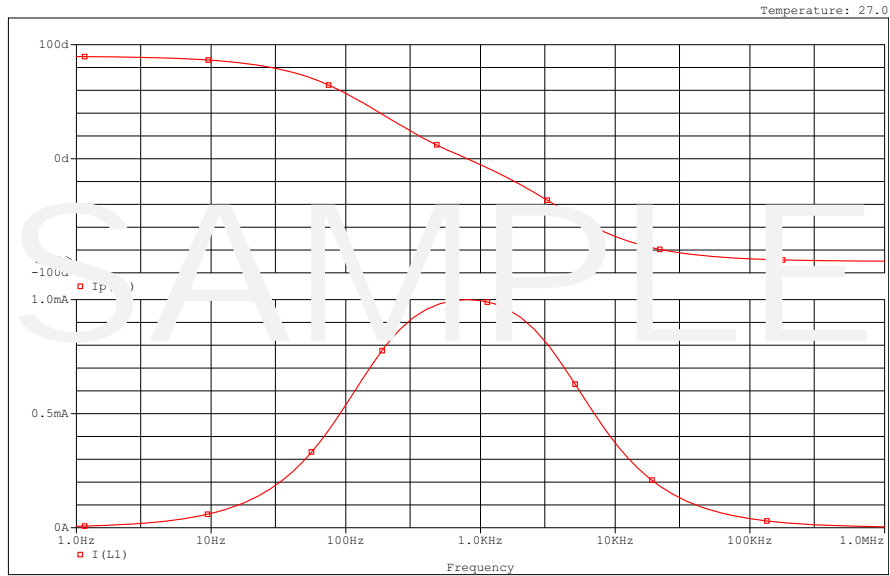
#### วิเคราะห์ผลตอบสนอง

1. เลือกเมนู PSpice > New Simulation Profile แล้วตั้งชื่อใน Name จากนั้นกดปุ่ม Create
2. ในหน้าต่าง Simulation Settings ให้เลือกแท็บ Analysis แล้วเลือก Analysis type เป็น AC Sweep/Noise และกำหนดค่าต่างๆ ดังนี้ AC Sweep Type: Logarithmic (Decade), Start Frequency: 1, End Frequency: 1k, Points/Decade: 10 จากนั้นกด OK (หน่วยของ Frequency จะเป็น Hz โดยอัตโนมัติ)
3. กด F11 เพื่อสั่งให้มีการจำลองผลตอบสนองของวงจร โปรแกรมจะใช้เวลาวิเคราะห์สักครู่หนึ่ง หากวงจรถูกต้องจะขึ้นผลลัพธ์เป็นกราฟของแรงดันที่ตำแหน่งของโพรบ โดยปกติจะเป็น V(R2:2) หากวงจรไม่ถูกต้องโปรแกรมจะแจ้งความผิดพลาดขึ้นให้แก้ไขให้ถูกต้องแล้วกด F11 อีกครั้ง

#### แสดงผลลัพธ์

1. รูปกราฟที่ได้เป็นแรงดันที่ตำแหน่งของโพรบเทียบกับความถี่ที่กำหนดไว้ในตอนต้น คือจาก 1 Hz ถึง 1 kHz ให้หาความถี่ที่ทำให้แรงดันลดลงเหลือ 0.707 เท่าของแรงดันที่ 1 Hz โดยใช้เคอร์เซอร์เข้ามาช่วยวัดกราฟโดยไปที่เมนู Trace > Cursor > Display แล้วใช้เมาส์ปุ่มซ้ายและขวาคลิกลากเคอร์เซอร์บนกราฟแล้วสังเกตค่าความถี่และแรงดันบนหน้าต่างย่อย Probe Cursor โดยค่าความถี่ที่ได้คือความถี่ Cutoff ของวงจรนี้



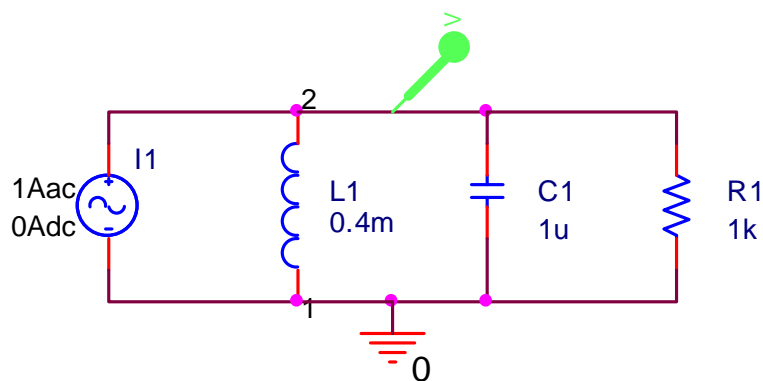


รูปที่ 8. ผลตอบสนองของวงจร RLC แบบอนุกรมที่ได้จาก PSpice

รายงาน

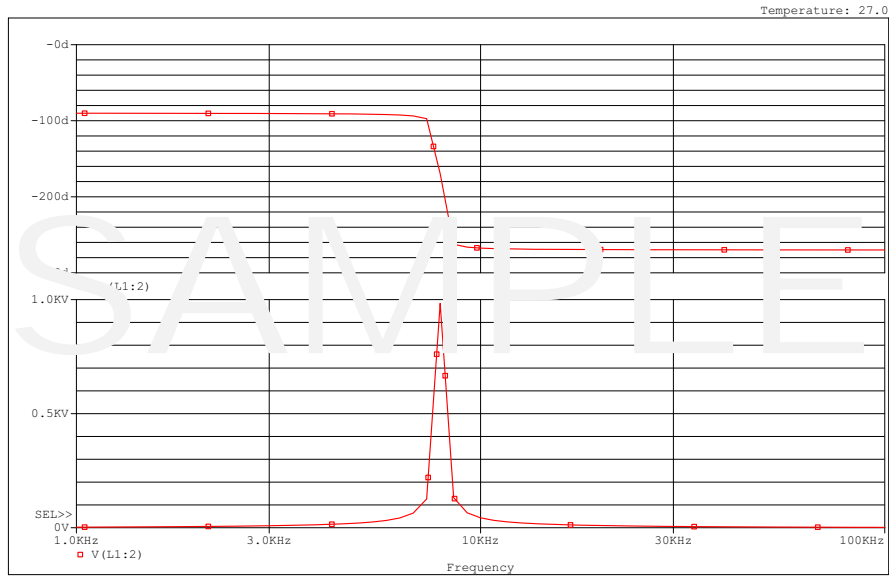
1. เก็บภาพกราฟขนาด  $I(L1)$  และเฟส  $Ip(L1)$  ของกระแสของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมนี้ลงในรายงาน โดยในหน้ากราฟให้ไปที่เมนู *File > Print Preview* แล้วกดปุ่ม *Print Screen* บนคีย์บอร์ดเพื่อนำภาพกราฟไปแปะในโปรแกรมจัดการภาพต่อไป
2. แสดงวิธีคำนวณหาความถี่เรโซแนนซ์  $f_0$  , ความถี่ cutoff  $f_1$  และ  $f_2$  , Bandwidth (Hz), และค่า Q โดยใช้สมการในส่วนของทฤษฎี เปรียบเทียบค่าเหล่านี้กับค่าที่วัดได้จากกราฟของ PSpice

**B.3** วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน



รูปที่ 9. วงจร RLC แบบขนานใน PSpice

ต่อวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานตามรูปที่ 9 โดยใช้ Source เป็นแหล่งกำเนิดกระแส AC ชื่อ IAC จากนั้นวิเคราะห์ผลตอบสนองแบบ AC Sweep โดยกำหนดให้ AC Sweep Type: Logarithmic (Decade), Start Frequency: 1k, End Frequency: 100k, Points/Decad: 100 แล้วทำการจำลองผลตอบสนองของวงจร



รูปที่ 10. ผลตอบสนองของวงจร RLC แบบขนานที่ได้จาก PSpice

รายงาน

1. เก็บภาพกราฟขนาด V(L1:2) และเฟส Vp(L1:2) ของแรงดันของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานนี้ลงในรายงาน
2. แสดงวิธีคำนวณหาความถี่เรโซแนนซ์  $f_0$ , ความถี่ cutoff  $f_1$  และ  $f_2$ , Bandwidth, และค่า Q จากสมการในส่วนของคุณทฤษฎี เปรียบเทียบค่าเหล่านี้กับค่าที่วัดได้จากกราฟของ PSpice

**B.4 ออกแบบวงจรเรโซแนนซ์**

จงออกแบบวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมที่มีความถี่เรโซแนนซ์  $\omega_0$  เป็น 1000 rad/s และมี Bandwidth 20 rad/s จากนั้นใช้ PSpice จำลองการทำงานเพื่อดูผลตอบสนองของวงจรทั้งในส่วนของคุณทฤษฎีและเฟสของกระแส

รายงาน

1. แสดงวิธีคำนวณหาค่า R, L, และ C และความถี่ cutoff  $f_1$ ,  $f_2$  และค่า Q
2. เปรียบเทียบความถี่เรโซแนนซ์ ความถี่ cutoff  $f_1$ ,  $f_2$  และ ค่า Q กับค่าที่วัดได้จากกราฟของ PSpice
3. เก็บภาพกราฟขนาดและเฟสของกระแสของวงจรเรโซแนนซ์ที่ออกแบบนี้ลงในรายงาน

**C. หนังสืออ้างอิง**

- [1] Charles Alexander and Matthew Sadiku, Fundamentals of Electric Circuits, McGraw-Hill, 4<sup>th</sup> ed., 2008.