9.6 อิมพีแดนซ์และแอดมิตแตนซ์

ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสเซอร์กระแสและแรงดันของตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำในโดเมนความถี่มีลักษณะเดียวกับกฎของโอห์มซึ่งกล่าวไว้สำหรับตัวต้านทาน เราจะนิยามค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ขององค์ประกอบวงจรว่าเป็นอัตราส่วนของเฟสเซอร์แรงดันต่อเฟสเซอร์กระแส ใช้สัญลักษณ์ $\mathbf{Z}$ โดยที่

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}} \tag{9.24}$$

สมการ (9.24) เรียกว่าเป็นกฎของโอห์มในโดเมนความถี่

จาก $\mathbf{V} = V_m \angle \phi$ และ $\mathbf{I} = I_m \angle \beta$ เราจะได้

$$\mathbf{Z} = \frac{V_m \angle \phi}{I_m \angle \beta} = \frac{V_m}{I_m} \angle \phi - \beta \tag{9.25}$$

ค่าอิมพีแดนซ์ $\mathbf{Z}$ จะมีขนาด $|\mathbf{Z}|$ และเฟส θ โดยที่

$$|\mathbf{Z}| = \frac{V_m}{I_m}$$

และ

$$\theta = \phi - \beta$$

อิมพีแดนซ์จะมีบทบาทเช่นเดียวกับตัวต้านทานในวงจรตัวต้านทาน และเนื่องจากมันถูกนิยามเป็นอัตราส่วนของเฟสเซอร์แรงดันต่อเฟสเซอร์กระแส ดังนั้นอิมพีแดนซ์จะมีหน่วยโอห์มเช่นเดียวกับตัวต้านทาน

แม้ว่าค่าอิมพีแดนซ์จะเป็นอัตราส่วนของเฟสเซอร์แรงดันต่อเฟสเซอร์กระแส แต่ตัวมันเองไม่ใช่เฟสเซอร์ เป็นเพียงค่าตัวเลขเชิงซ้อนที่ใช้บอกความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฟสเซอร์สองค่า เมื่อเราแปลงค่าอิมพีแดนซ์กลับไปในโดเมนเวลามันจะไม่มีความหมาย อย่างไรก็ตามการใช้แนวคิดเกี่ยวกับค่าอิมพีแดนซ์จะช่วยให้เราแก้ปัญหาวงจรที่ถูกกระตุ้นด้วยไซนูซอยด์ในสภาวะคงตัวได้เหมือนกับการแก้ปัญหาวงจรตัวต้านทาน และเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์เป็นค่าตัวเลขเชิงซ้อน ดังนั้นจึงสามรถเขียนได้หลายรูปแบบเช่น

แบบโพลาร์

$$|\mathbf{Z}| \angle \theta$$

แบบเอกโปเนนเทียล

$$Ze^{j\theta}$$

หรือแบบเรกแทงกูลาร์

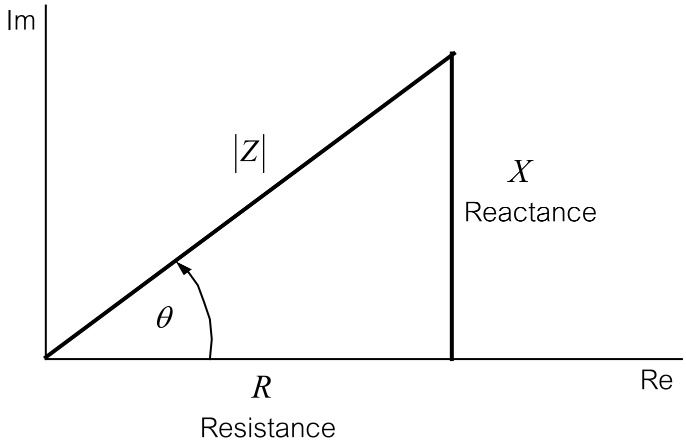
$$R + jX$$

เมื่อ R คือส่วนจริง $R = \mathrm{Re}\,\mathbf{Z}$ เรียกว่าส่วนต้านทาน (Resistive Part) และ X คือส่วนจินตภาพ $X = \mathrm{Im}\,\mathbf{Z}$ เรียกว่าส่วนจินตภาพ (Reactive Part) ของจำนวนเชิงซ้อน $\mathbf{Z}$ สังเกตว่าขนาดของ $\mathbf{Z}$ เขียนได้สองแบบคือ $|\mathbf{Z}|$ และ Z และ

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \tag{9.26}$$

ส่วนเฟส

$$\theta = \tan^{-1}\frac{X}{R} \tag{9.27}$$



รูปที่ 9.7 การแทนค่าอิมพีแดนซ์ด้วยกราฟบนระนาบเชิงซ้อน

ความสัมพันธ์นี้สรุปได้ดังในกราฟบนระนาบเชิงซ้อน ในรูปที่ 9.7 พิจารณาตัวอย่างของค่าอิมพีแดนซ์

$$\mathbf{Z} = 2 + j2$$

จะได้ขนาด

$$|\mathbf{Z}| = Z = \sqrt{8}$$

และเฟส

$$\theta = 45^\circ$$

สำหรับองค์ประกอบตัวต้านทาน

$$\mathbf{V} = R\mathbf{I}$$

ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน

$$\mathbf{Z} = R \tag{9.28}$$

สำหรับองค์ประกอบตัวเหนี่ยวนำ

$$\mathbf{V} = j\omega L\mathbf{I}$$

ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ

$$\mathbf{Z} = j\omega L \tag{9.29}$$

และสุดท้ายสำหรับองค์ประกอบตัวเก็บประจุ

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{I}}{j\omega C}$$

ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ

$$\mathbf{Z} = \frac{1}{j\omega C} \tag{9.30}$$

ตารางที่ 9.4 สรุปค่าอิมพีแดนซ์ขององค์ประกอบวงจรทั้งสาม

ตาราง 9.4 ค่าอิมพีแดนซ์ขององค์ประกอบวงจร

องค์ประกอบ	**ค่าอิมพีแดนซ์**
ตัวต้านทาน	$\mathbf{Z} = R$
ตัวเหนี่ยวนำ	$\mathbf{Z} = j\omega L$
ตัวเก็บประจุ	$\mathbf{Z} = \frac{1}{j\omega C}$

ค่าแอดมิตแตนซ์ (Admittance) ก็จะคล้ายกับค่าความนำในวงจรตัวต้านทาน หน่วยของแอดมิตแตนซ์คือ ซีเมนส์ จาก $\mathbf{Z} = Z\angle\theta$ เราจะได้

$$\mathbf{Y} = \frac{1}{\mathbf{Z}} = \frac{1}{|\mathbf{Z}|\angle\theta} = |\mathbf{Y}|\angle-\theta \tag{9.31}$$

และสำหรับแบบเรคแทงกูลาร์ $\mathbf{Z} = R + jX$ จะได้

$$\mathbf{Y} = \frac{1}{\mathbf{Z}} = \frac{1}{R + jX} = \frac{R - jX}{R^2 + X^2} = G + jB \tag{9.32}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าส่วนจริง G เรียกว่าความนำ ของค่าแอดมิตแตนซ์ ไม่ใช่ส่วนกลับของ R และค่าส่วนจินตภาพ B เรียกว่าซัสเซปแตนซ์ ของค่าแอดมิตแตนซ์ ก็ไม่ใช่ส่วนกลับของ X

สำหรับค่าอิมพีแดนซ์ขององค์ประกอบหนึ่ง $\mathbf{Z} = R + jX$ องค์ประกอบนี้จะมีค่าความเหนี่ยวนำเมื่อค่ารีแอกแตนซ์ X มีค่าเป็นบวก และจะมีค่าความจุเมื่อค่ารีแอกแตนซ์ X มีค่าเป็นลบ เนื่องจากค่า

แอดมิตแตนซ์เป็นส่วนกลับของค่าอิมพีแดนซ์ ดังนั้นเราสามารถกล่าวในทำนองเดียวกันว่า สำหรับค่าแอดมิตแตนซ์ขององค์ประกอบหนึ่ง $\mathbf{Y} = G + jB$ องค์ประกอบนี้จะมีค่าความเหนี่ยวนำเมื่อค่าซัสเซปแตนซ์ B มีค่าเป็นลบ และจะมีค่าความจุเมื่อค่าซัสเซปแตนซ์ B มีค่าเป็นบวก

พิจารณาตัวอย่าง ตัวเก็บประจุมีค่าความจุ $C = 1$ mF ต้องการหาค่าอิมพีแดนซ์และค่าแอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุนี้ จะได้ว่า

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

ซึ่งนอกจากค่าความจุแล้วเรายังต้องการค่าความถี่เชิงมุม ω ด้วย สมมติให้ค่า $\omega = 100$ rad/s จะได้

$$\mathbf{Z} = \frac{1}{j0.1} = \frac{10}{j} = -10j = 10\angle -90^\circ\ \Omega$$

เพื่อหาค่าแอดมิตแตนซ์ เราใช้

$$\mathbf{Y} = \frac{1}{\mathbf{Z}} = j\omega C = j0.1 = 0.1\angle 90^\circ\ \text{S}$$

9.7 การใช้กฎของเคอชชอฟฟ์กับเฟสเซอร์

เราได้ศึกษาการใช้กฎของเคอชชอฟฟ์ในโดเมนเวลามาแล้วในบทที่ 4 พิจารณา KVL รอบวงรอบใดๆ ซึ่งต้องการ

$$v_1 + v_2 + v_3 + \ldots + v_n = 0 \tag{9.33}$$

สำหรับแรงดันไซนูซอยด์ในสภาวะคงตัว เราเขียนสมการในรูป cosine ได้

$$V_{m1}\cos(\omega t + \theta_1) + V_{m2}\cos(\omega t + \theta_2) + \ldots + V_{mn}\cos(\omega t + \theta_n) = 0 \tag{9.34}$$

ข้อมูลที่ต้องการสำหรับแรงดันใดๆ v_n ได้จากขนาด V_{mn} และเฟส θ_n โดยคิดว่าทราบค่าความถี่เชิงมุม ω แล้วซึ่งจะไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการคำนวณ อาศัยสมการของออยเลอร์เขียนสมการ (9.34) ใหม่

$$\mathrm{Re}\left\{V_{m1}e^{j\omega t}e^{j\theta_1}\right\} + \mathrm{Re}\left\{V_{m2}e^{j\omega t}e^{j\theta_2}\right\} + \ldots + \mathrm{Re}\left\{V_{mn}e^{j\omega t}e^{j\theta_n}\right\} = 0$$

หรือ

$$\mathrm{Re}\left\{V_{m1}e^{j\omega t}e^{j\theta_1} + V_{m2}e^{j\omega t}e^{j\theta_2} + \ldots + V_{mn}e^{j\omega t}e^{j\theta_n}\right\} = 0$$

แยกพจน์ร่วม $e^{j\omega t}$ ออกจะได้

$$\mathrm{Re}\left\{(V_{m1}e^{j\theta_1} + V_{m2}e^{j\theta_2} + \ldots + V_{mn}e^{j\theta_n})e^{j\omega t}\right\} = 0$$

เขียนแรงดัน $V_{mp}e^{j\theta_p}$ ในรูปเฟสเซอร์ $\mathbf{V}_p$

$$\mathrm{Re}\left\{(\mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2 + \ldots + \mathbf{V}_n)e^{j\omega t}\right\} = 0$$

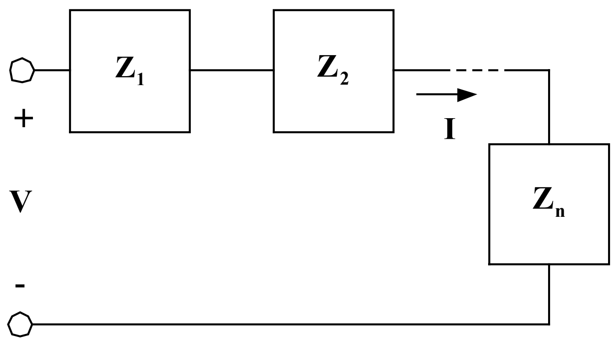
เนื่องจาก $e^{j\omega t}$ ไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2 + \ldots + \mathbf{V}_n = 0 \tag{9.35}$$

ดังนั้นเราได้ผลสรุปคือผลรวมของเฟสเซอร์แรงดันรอบวงรอบใดๆ มีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือกฎแรงดันของเคอชชอฟฟ์สามารถใช้ได้ในโดเมนความถี่ ในทำนองเดียวกันจะได้ว่ากฎกระแสของเคอชชอฟฟ์ก็สามารถใช้ในโดเมนความถี่ได้เช่นเดียวกัน

$$\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_3 + \cdots + \mathbf{I}_n = 0 \tag{9.36}$$

และเนื่องจากกฎกระแสและแรงดันของเคอชชอฟฟ์สามารถใช้ได้ในโดเมนความถี่ ดังนั้นจะสามารถสรุปได้ว่าเทคนิคและวิธีการที่ได้ศึกษาในบทที่ 4 และบทที่ 5 สำหรับวงจรตัวต้านทานยังคงใช้ได้กับเฟสเซอร์ของกระแสและแรงดัน เช่นเราสามารถใช้หลักการซุปเปอร์โพสิชัน การแปลงแหล่งจ่าย วงจรสมมูลเทวินินและนอร์ตัน วิธีวิเคราะห์โนดและเมช เป็นต้น ตราบใดที่วงจรเป็นวงจรเชิงเส้น



รูปที่ 9.8 อิมพีแดนซ์ต่อแบบอนุกรม

พิจารณาวงจรที่มีอิมพีแดนซ์ต่ออนุกรมกันดังแสดงในรูปที่ 9.8 เฟสเซอร์กระแส $\mathbf{I}$ ไหลผ่านอิมพีแดนซ์แต่ละตัว ใช้ KVL จะได้

$$\mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2 + \ldots + \mathbf{V}_n = \mathbf{V}$$

เนื่องจาก $\mathbf{V}_k = \mathbf{Z}_k\mathbf{I}_k$ ดังนั้นเราได้

$$(\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \ldots + \mathbf{Z}_n)\mathbf{I} = \mathbf{V} \tag{9.37}$$

ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมกันคือผลรวมของค่าอิมพีแดนซ์แต่ละตัวนั่นเอง

ส่วนในกรณีของการต่อแอดมิตแตนซ์ขนานกันดังแสดงในรูปที่ 9.9 จะสามารถหาได้ว่าค่าแอดมิตแตนซ์สมมูลคือ

$$\mathbf{Y}_{eq} = \mathbf{Y}_1 + \mathbf{Y}_2 + \mathbf{Y}_3 + \ldots + \mathbf{Y}_n \tag{9.38}$$

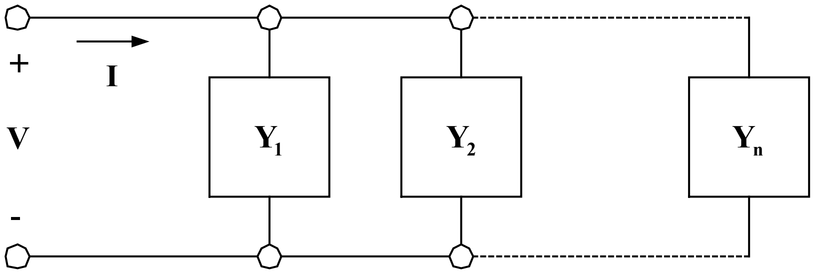
ค่าแอดมิตแตนซ์สมมูลสำหรับการต่อแอดมิตแตนซ์ขนานกันสองตัวคือ

$$\mathbf{Y}_{eq} = \mathbf{Y}_1 + \mathbf{Y}_2$$

จะได้ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลคือ

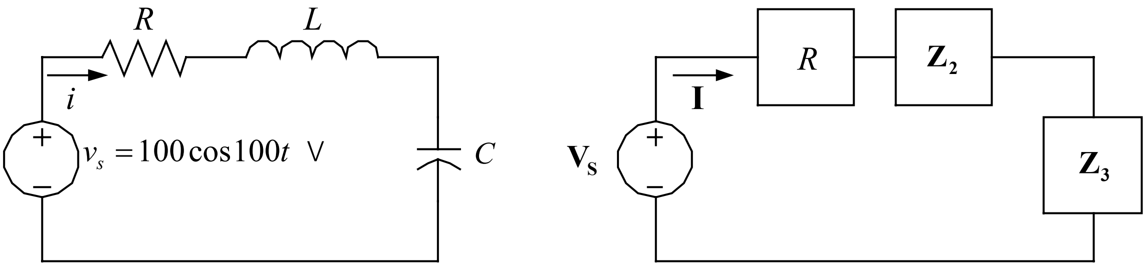
$$\mathbf{Z}_{eq} = \frac{1}{\mathbf{Y}_{eq}} = \frac{1}{\mathbf{Y}_1 + \mathbf{Y}_2} = \frac{\mathbf{Z}_1\mathbf{Z}_2}{\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2} \qquad (9.39)$$

หลักการแบ่งกระแสและแรงดันก็ยังคงสามารถใช้กับเฟสเซอร์ของกระแสและแรงดันได้



รูปที่ 9.9 แอดมิตแตนซ์ต่อแบบขนาน

ตัวอย่าง 9.5 พิจารณาวงจร RLC ดังแสดงในรูป Ex 9.5 (ก) เมื่อ $R = 9\,\Omega$ $L = 10$ mH และ $C = 1$ mF จงหาค่ากระแสในสภาวะคงตัว i โดยใช้เฟสเซอร์



(ก) (ข)

รูปที่ Ex 9.5

วิธีทำ เราเขียนรูปวงจรใหม่ในรูปของเฟสเซอร์ ดังแสดงในรูป Ex 9.5 (ข) และใช้ KVL รอบเมชจะได้

$$R\mathbf{I} + \mathbf{Z}_2\mathbf{I} + \mathbf{Z}_3\mathbf{I} = \mathbf{V}_s$$

เมื่อแทนค่า $\omega = 100$ rad/s $C = 1$ mF และ $L = 10$ mH จะได้

$$\mathbf{Z}_2 = j\omega L = j1$$

$$\mathbf{Z}_3 = \frac{1}{j\omega C} = -j10$$

แทนค่าลงในสมการ KVL จะได้

$$(9 + j1 - j10)\mathbf{I} = \mathbf{V}_s$$

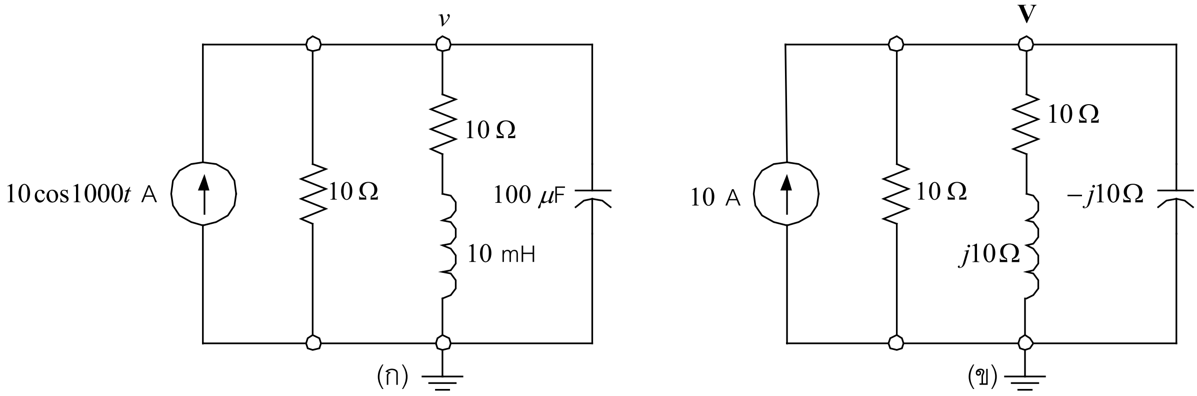
หรือ

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}_s}{(9 - j9)} = \frac{100\angle 0^\circ}{9\sqrt{2}\angle -45^\circ} = 7.86\angle 45^\circ$$

เขียนในรูปโดเมนเวลาที่สภาวะคงตัว

$$i = 7.86\cos(100t + 45^\circ) \text{ A}$$

ตัวอย่าง 9.6 พิจารณาวงจร RLC ดังแสดงในรูป Ex 9.6 (ก) เมื่อ $i_s = 10\cos 1000t$ A $R = 10\ \Omega$ $L = 10$ mH และ $C = 100\ \mu$F จงหาค่าแรงดันในสภาวะคงตัว v โดยใช้เฟสเซอร์



รูปที่ Ex 9.6

วิธีทำ เราเขียนรูปวงจรใหม่ในรูปของเฟสเซอร์ ดังแสดงในรูป Ex 9.6 (ข) และใช้ KCL ที่โนดบนจะได้

$$(\mathbf{Y}_1 + \mathbf{Y}_2 + \mathbf{Y}_3)\mathbf{V} = \mathbf{I}_s$$

แทนค่า $\mathbf{Y}_1$ $\mathbf{Y}_2$ $\mathbf{Y}_3$ และ $\mathbf{I}_s$ ได้

$$\frac{\mathbf{V}}{10} + \frac{\mathbf{V}}{10 + j10} + \frac{\mathbf{V}}{-j10} = 10\angle 0^\circ$$

แก้สมการหาค่าแรงดัน

$$0.1\mathbf{V} + (0.05 - j0.05)\mathbf{V} + j0.1\mathbf{V} = 10$$

$$\mathbf{V} = \frac{10}{0.158\angle 18.4^\circ} = 63.3\angle -18.4^\circ$$

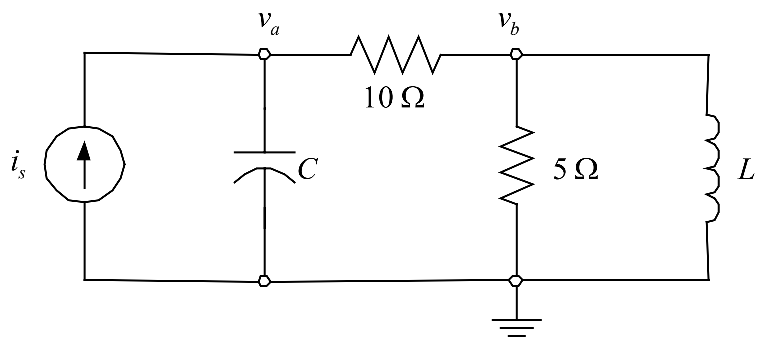
เขียนในรูปโดเมนเวลาที่สภาวะคงตัว

$$v = 63.3\cos(1000t - 18.4^\circ) \text{ V}$$

9.8 การวิเคราะห์วงจรโดยใช้เฟสเซอร์

การวิเคราะห์วงจรในโดเมนความถี่ ใช้ขั้นตอนเช่นเดียวกับวงจรตัวต้านทาน โดยเราจะใช้อิมพีแดนซ์และเฟสเซอร์ของแรงดันและกระแสแทนความต้านทานและฟังก์ชันแรงดันและกระแสในโดเมนเวลา

เนื่องจากสามารถใช้กฎของโอห์มได้ เราใช้ความสัมพันธ์ $\mathbf{V}=\mathbf{ZI}$ สำหรับองค์ประกอบวงจรแล้วใช้วิธีวิเคราะห์โนดหรือเมชต่อไป



รูปที่ 9.10 วงจรตัวอย่าง ต้องการหาค่าแรงดันโนด v_a และ v_b

ตัวอย่างวิธีการใช้การวิเคราะห์โนดในโดเมนความถี่ พิจารณาวงจรในรูปที่ 9.10 เมื่อ $i_s = I_m \cos\omega t$ A สำหรับค่า ω L และ C ใดๆ เราสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุได้ เช่น $\mathrm{C}=100\,\mu\mathrm{F}$ $\mathrm{L}=5\,\mathrm{mH}$ $\omega=1000$ rad/s จะได้

$$\mathbf{Z}_1 = \frac{1}{j\omega C} = -j10$$

และ

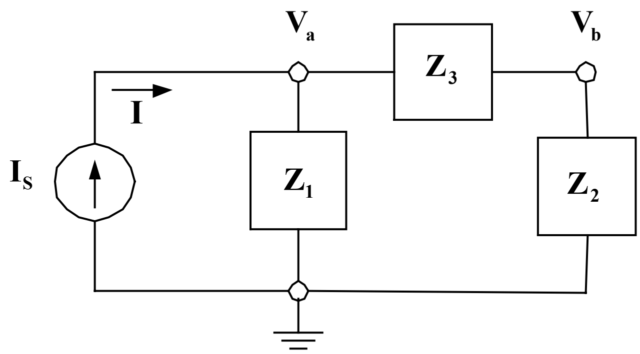
$$Z_L = j\omega L = j5$$

เขียนวงจรใหม่ดังในรูปที่ 9.11 โดยใช้เฟสเซอร์ หาค่าอิมพีแดนซ์ $\mathbf{Z}_2$ จากการต่อขนานกันของตัวเหนี่ยวนำและความต้านทาน $5\,\Omega$ โดยจะหาค่าแอดมิดแตนซ์ก่อน

$$\mathbf{Y}_2 = \frac{1}{5} + \frac{1}{j\omega L} = \frac{1}{5}(1-j)$$

และ

$$\mathbf{Z}_3 = 10$$



รูปที่ 9.11 วงจรสมมูลของวงจรในรูปที่ 9.10 ในรูปเฟสเซอร์

ใช้ KCL ที่โนด a จะได้

$$\frac{\mathbf{V}_a}{\mathbf{Z}_1}+\frac{\mathbf{V}_a-\mathbf{V}_b}{\mathbf{Z}_3}=\mathbf{I}_s$$

และ KCL ที่โนด b จะได้

$$\frac{\mathbf{V}_b-\mathbf{V}_a}{\mathbf{Z}_3}+\frac{\mathbf{V}_b}{\mathbf{Z}_2}=0$$

เรียบเรียงสมการทั้งสองใหม่

$$\begin{aligned}(\mathbf{Y}_1+\mathbf{Y}_3)\mathbf{V}_a+(-\mathbf{Y}_3)\mathbf{V}_b&=\mathbf{I}_s\\(-\mathbf{Y}_3)\mathbf{V}_a+(\mathbf{Y}_2+\mathbf{Y}_3)\mathbf{V}_b&=0\end{aligned} \tag{9.40}$$

หรือเขียนในรูปแอดมิดแตนซ์เมตริกซ์ (Admittance Matrix, Y) ได้

$$\underbrace{\begin{bmatrix}(\mathbf{Y}_1+\mathbf{Y}_3) & -\mathbf{Y}_3\\ -\mathbf{Y}_3 & \mathbf{Y}_2+\mathbf{Y}_3\end{bmatrix}}_{\mathbf{Y}\,\text{matrix}}\begin{bmatrix}\mathbf{V}_a\\ \mathbf{V}_b\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathbf{I}_s\\ 0\end{bmatrix}$$

ซึ่งสามารถแก้สมการหาค่าเฟสเซอร์ $\mathbf{V}_a$ และ $\mathbf{V}_b$ ได้ เช่น ถ้าให้ $I_m=10$ A

$$\mathbf{I}_s=I_m\angle 0^\circ$$

ใช้กฎของเครมเมอร์หาค่า $\mathbf{V}_a$

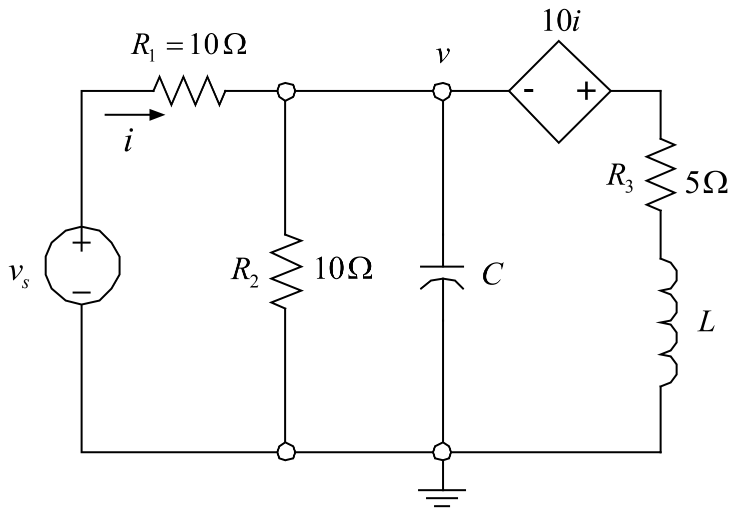
$$\begin{aligned}\mathbf{V}_a&=\frac{100(3-2j)}{4+j}\\&=\frac{100(3-2j)(4-j)}{17}\\&=\frac{100}{17}(10-11j)\\&=87.5\angle-47.7^\circ\end{aligned}$$

เขียนในรูปโดเมนเวลาที่สภาวะคงตัว

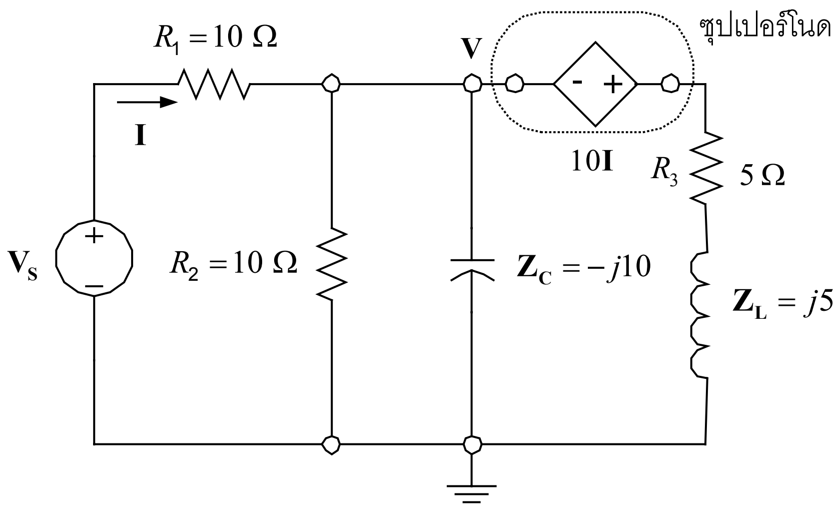
$$v_a=87.5\cos(1000t-47.7^\circ)\ \text{V}$$

จากตัวอย่างนี้จะเห็นได้ว่า แนวทางการวิเคราะห์วงจรโดยวิธีโนดสามารถนำมาใช้ได้ โดยเราจะใช้ค่าอิมพีแดนซ์และแอดมิดแตนซ์ เฟสเซอร์ของกระแสและแรงดัน เขียนสมการโนดในรูปเฟสเซอร์ แก้สมการหาค่าเฟสเซอร์ของแรงดันโนดที่ต้องการ จากนั้นจึงแปลงกลับมาอยู่ในรูปโดเมนเวลาที่สภาวะคงตัว

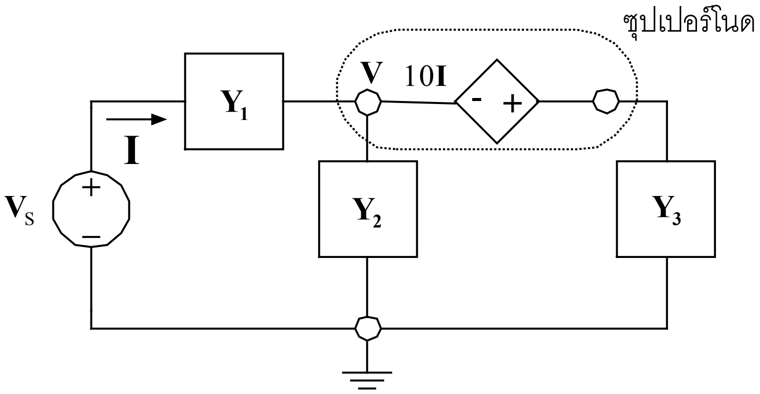
ตัวอย่าง 9.7 พิจารณาวงจร RLC ดังแสดงในรูป Ex 9.7 (ก) เมื่อ $v_s=10\cos\omega t$ V $L=0.5$ H และ $C=10$ mF จงหาค่าแรงดันโนด v ในสภาวะคงตัวโดยใช้เฟสเซอร์



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ Ex 9.7

วิธีทำ เราเขียนรูปวงจรใหม่ในรูปของเฟสเซอร์ ดังแสดงในรูป Ex 9.7 (ข) โดยที่

$$\mathbf{Z}_L = j\omega L = j5$$
$$\mathbf{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} = -j10$$
$$\mathbf{Z}_3 = R_3 + \mathbf{Z}_L = 5 + j5$$

และหาค่าแอดมิดแตนซ์ทั้งสาม ดังแสดงในรูป Ex 9.7 (ค)

$$\mathbf{Y}_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{10}$$
$$\mathbf{Y}_2 = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{\mathbf{Z}_C} = \frac{1}{10}(1+j)$$
$$\mathbf{Y}_3 = \frac{1}{\mathbf{Z}_3} = \frac{1}{50}(5-j5)$$

สังเกตว่ามีโนดพิเศษหรือซุปเปอร์โนดเกิดขึ้น ใช้ KCL ที่ซุปเปอร์โนดจะได้

$$\mathbf{Y}_1(\mathbf{V}-\mathbf{V}_s) + \mathbf{Y}_2\mathbf{V} + \mathbf{Y}_3\left[\mathbf{V} + 10\mathbf{Y}_1(\mathbf{V}_s - \mathbf{V})\right] = 0$$

เรียบเรียงใหม่

$$(\mathbf{Y}_1 + \mathbf{Y}_2 + \mathbf{Y}_3 - 10\mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_3)\mathbf{V} = (\mathbf{Y}_1 - 10\mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_3)\mathbf{V}_s$$

แก้สมการหาค่าเฟสเซอร์ของแรงดันโนด

$$\mathbf{V} = \frac{(\mathbf{Y}_1 - 10\mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_3)\mathbf{V}_s}{(\mathbf{Y}_1 + \mathbf{Y}_2 + \mathbf{Y}_3 - 10\mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_3)}$$

แทนค่า

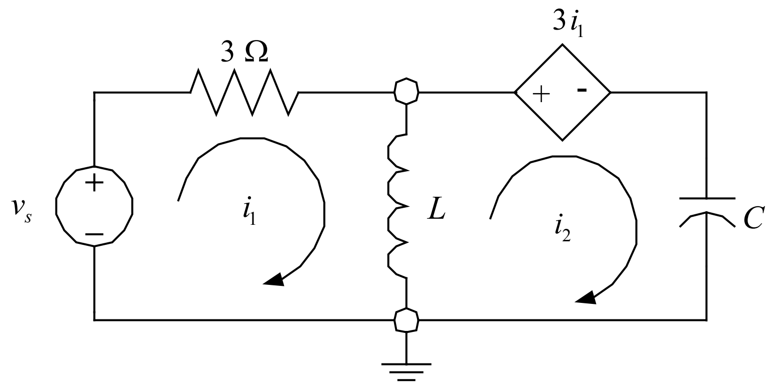
$$\mathbf{V} = \frac{(\mathbf{Y}_1 - 10\mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_3)10\angle 0^\circ}{(\mathbf{Y}_1 + \mathbf{Y}_2 + \mathbf{Y}_3 - 10\mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_3)}$$
$$= \frac{10j}{2+j} = \frac{10}{\sqrt{5}}\angle 63.4^\circ$$

เขียนในรูปโดเมนเวลาที่สภาวะคงตัว

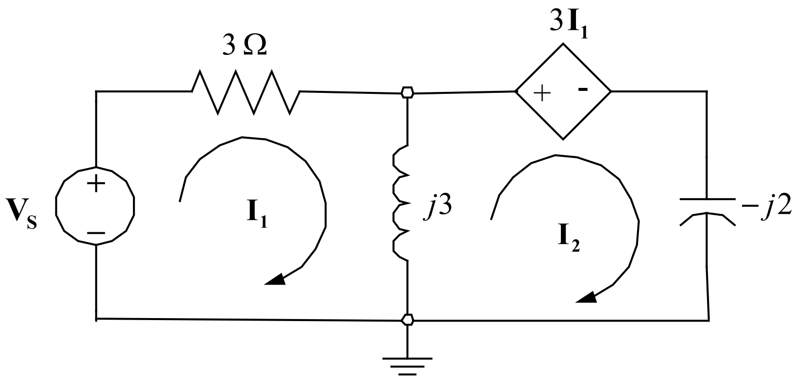
$$v = \frac{10}{\sqrt{5}}\cos(10t + 63.4^\circ)\ \text{V}$$

การวิเคราะห์เมชในโดเมนความถี่ ก็สามารถทำได้ในทำนองเดียวกันดังจะแสดงในตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง 9.8 พิจารณาวงจร RLC ดังแสดงในรูป Ex 9.8 (ก) เมื่อ $v_s = 10\sqrt{2}\cos(\omega t + 45^\circ)$ V $\omega = 100$ rad/s $L = 30$ mH และ $C = 5$ mF จงหาค่ากระแส i_1 ในสภาวะคงตัวโดยใช้เฟสเซอร์



(ก)



(ข)

รูปที่ Ex 9.8

วิธีทำ เราเขียนรูปวงจรใหม่ในรูปของเฟสเซอร์ ดังแสดงในรูป Ex 9.8 (ข) โดยที่

$$\mathbf{Z}_L = j\omega L = j3$$

$$\mathbf{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} = -j2$$

$$\mathbf{V}_s = 10\sqrt{2}\angle 45^\circ = 10 + j10$$

เขียน KVL ที่ เมช 1 และเมช 2

$$(3+j3)\mathbf{I}_1 - j3\mathbf{I}_2 = \mathbf{V}_s$$

$$(3-j3)\mathbf{I}_1 + (j3-j2)\mathbf{I}_2 = 0$$

แก้สมการหาค่าเฟสเซอร์ $\mathbf{I}_1$ โดยใช้กฎของเครมเมอร์

$$\mathbf{I}_1 = \frac{(10+j10)j}{\Delta}$$

เมื่อ ค่าดีเทอมิแนนท์

$$\Delta = (3+j3)(j) + j3(3-j3) = 6+12j$$

ดังนั้นจะได้

$$\mathbf{I}_1 = \frac{(10+j10)j}{6+12j} = 1.05\angle 71.6^\circ$$

เขียนในรูปโดเมนเวลาที่สภาวะคงตัว

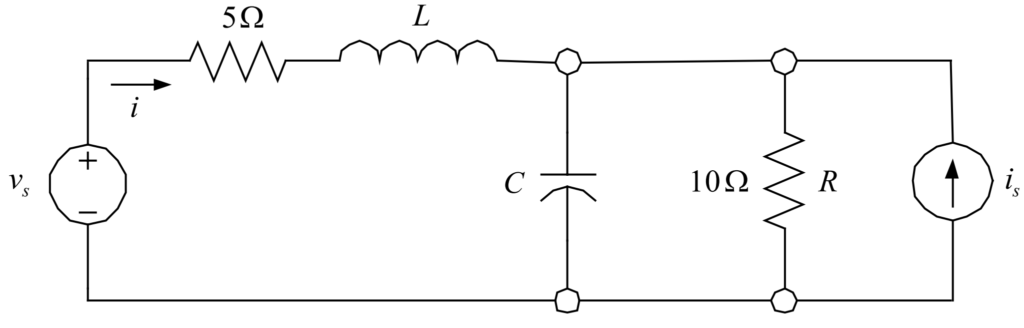
$$i_1 = 1.05\cos(100t + 71.6^\circ) \text{ A}$$

เนื่องจากวงจรที่เราศึกษาเป็นวงจรเชิงเส้น ดังนั้นหลักการซุปเปอร์โพสิชันและวิธีการแปลงแหล่งจ่าย รวมทั้งวงจรสมมูลเทวินินและวงจรสมมูลนอร์ตันในรูปของแหล่งจ่ายสมมูลและอิมพีแดนซ์หรือแอดมิดแตนซ์สมมูล ยังคงใช้ได้ในโดเมนความถี่

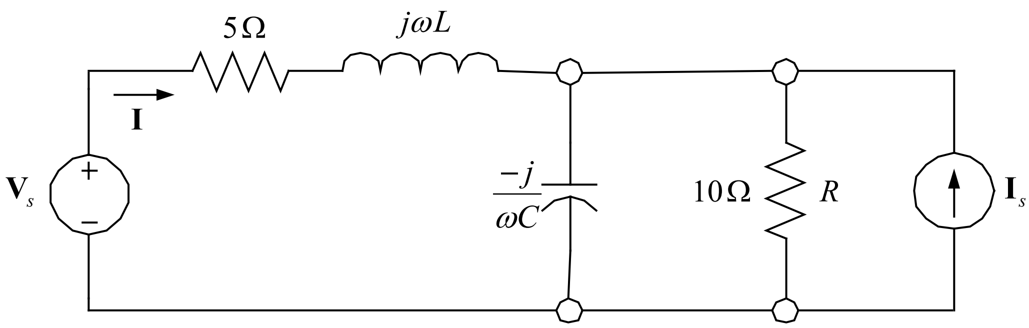
เริ่มจากหลักการซุปเปอร์โพสิชันอาจกล่าวได้ดังนี้ สำหรับวงจรเชิงเส้นใดๆ ที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายอิสระตั้งแต่สองแหล่งจ่ายขึ้นไป ค่ากระแสหรือแรงดันใดๆในวงจรสามารถคำนวณได้จากผลรวมพีชคณิตของกระแสหรือแรงดันที่ได้จากการป้อนแหล่งจ่ายทีละแหล่งจ่าย

ถ้าวงจรเชิงเส้นถูกกระตุ้นด้วยแหล่งจ่ายแบบไซนูซอยด์ที่มีความถี่ ω เดียวกันหลายแหล่งจ่าย เราอาจใช้หลักการซุปเปอร์โพสิชันในกรณีนี้ได้ หากแหล่งจ่ายแบบไซนูซอยด์แต่ละแหล่งจ่ายมีความถี่ ω คนละความถี่ เราต้องใช้หลักการซุปเปอร์โพสิชันในการรวมผลแรงดันหรือกระแสในวงจร โดยที่วงจรจะมีค่าอิมพีแดนซ์หรือแอดมิดแตนซ์ค่าหนึ่งสำหรับความถี่หนึ่ง และอีกค่าหนึ่งสำหรับอีกความถี่หนึ่ง เราจะหาค่าผลตอบสนองในรูปของเฟสเซอร์ที่แต่ละความถี่ แปลงเป็นโดเมนเวลาแล้วรวมผลจากแต่ละความถี่เข้าด้วยกันใน สังเกตว่าเราจะรวมผลในโดเมนเวลาไม่ใช่การรวมเฟสเซอร์หรือการรวมในโดเมนความถี่

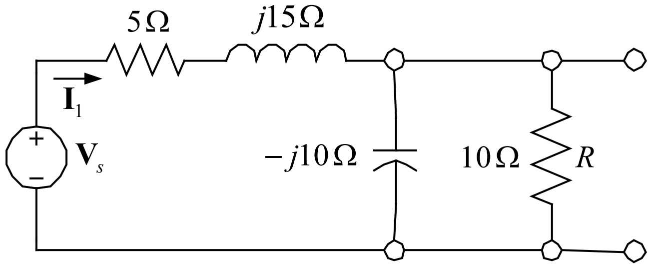
ตัวอย่าง 9.9 พิจารณาวงจร RLC ดังแสดงในรูป Ex 9.9 (ก) เมื่อ $v_s = 10\cos 10t$ V $i_s = 3$ A $L = 1.5$ H และ $C = 10$ mF จงหาค่ากระแส i ในสภาวะคงตัวโดยใช้เฟสเซอร์และหลักการซุปเปอร์โพสิชัน



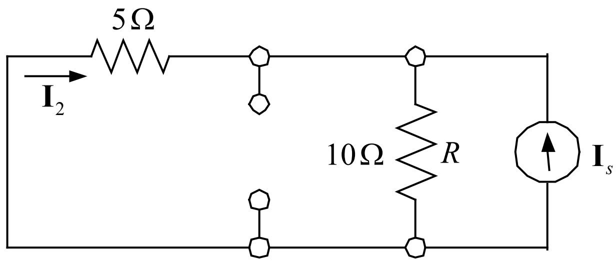
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ Ex 9.9

วิธีทำ เราเขียนรูปวงจรใหม่ในรูปของเฟสเซอร์ โดยที่

$$\mathbf{V}_s = 10\angle 0^\circ$$
$$\mathbf{I}_s = 3\angle 0^\circ$$

หาค่าเฟสเซอร์ของกระแส $\mathbf{I}_1$ ซึ่งเกิดจากแหล่งจ่ายแรงดัน เราทำให้แหล่งจ่ายกระแสไม่มีผลต่อวงจรโดยการแทนแหล่งจ่ายกระแสด้วยเปิดวงจร ดังแสดงในรูป Ex 9.9 (ค)

$$\mathbf{I}_1 = \frac{\mathbf{V}_s}{5 + j\omega L + \mathbf{Z}_p}$$

แทนค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุ

$$\mathbf{Z}_p = \frac{\mathbf{Z}_C R}{R + \mathbf{Z}_C} = 5(1 - j)$$

และ $\omega L = 15$ แล้วแก้สมการหาค่า

$$\mathbf{I}_1 = \frac{10\angle 0^\circ}{5 + j15 + (5 - j5)}$$
$$= \frac{10}{10 + j10} = \frac{10}{\sqrt{200}}\angle -45^\circ$$

เขียน $\mathbf{I}_1$ ในรูปโดเมนเวลาที่สภาวะคงตัว

$$i_1 = 0.71\cos(10t - 45^\circ) \text{ A}$$

ต่อมาพิจารณาผลจากแหล่งจ่ายกระแส หาค่าเฟสเซอร์ของกระแส $\mathbf{I}_2$ โดยทำการลัดวงจรแหล่งจ่ายแรงดัน ดังแสดงในรูป Ex 9.9 (ง)

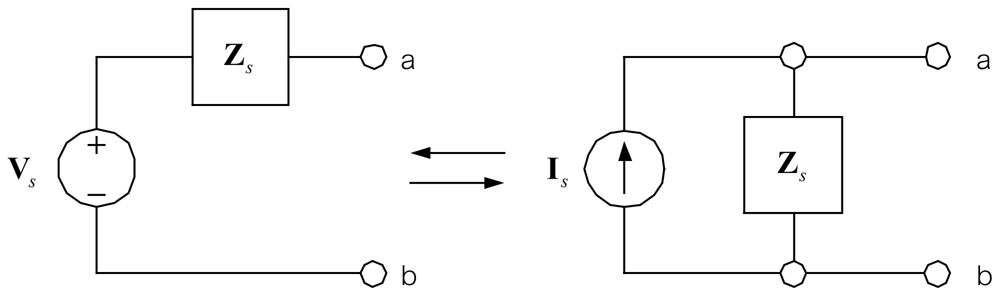
$$\mathbf{I}_2 = -\frac{10}{15}(3) = -2 \text{ A}$$

เขียน $\mathbf{I}_2$ ในรูปโดเมนเวลาที่สภาวะคงตัว ได้ $i_2 = -2$ A

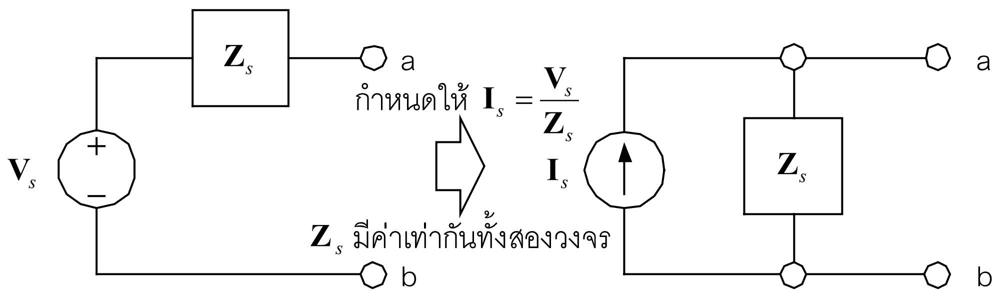
ใช้หลักการการซุปเปอร์โพสิชันหากระแสรวมในโดเมนเวลา $i = i_1 + i_2$

$$i = 0.71\cos(10t - 45^\circ) - 2 \text{ A}$$

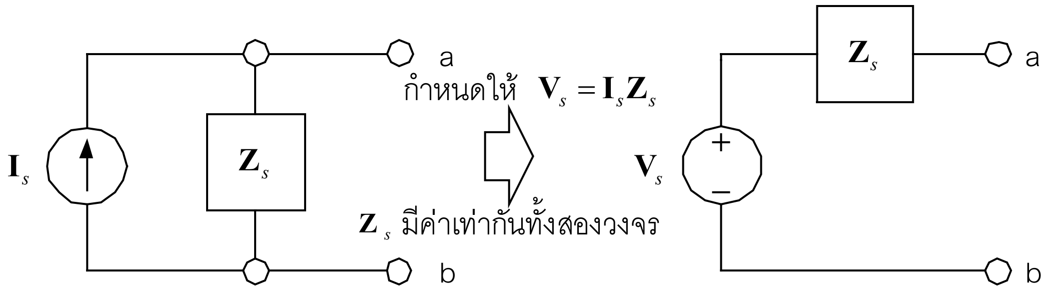
พิจารณาการแปลงแหล่งจ่ายสำหรับโดเมนความถี่ วิธีการที่ได้ศึกษาในวงจรตัวต้านทานสามารถนำมาใช้ได้เช่นเดิม โดยที่การแปลงแหล่งจ่ายจะเกี่ยวกับการแปลงไปมาระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันอนุกรมกับอิมพีแดนซ์กับแหล่งจ่ายกระแสขนานกับอิมพีแดนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 9.12 และวิธีการแปลงได้สรุปไว้ในรูปที่ 9.13



รูปที่ 9.12 แหล่งจ่ายสมมูล



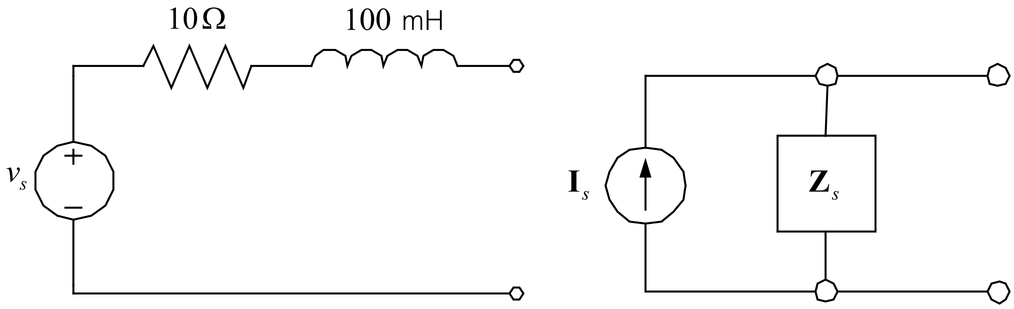
(ก) การแปลงแหล่งจ่ายแรงดันเป็นแหล่งจ่ายกระแส



(ข) การแปลงแหล่งจ่ายกระแสเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน

รูปที่ 9.13 สรุปวิธีการแปลงแหล่งจ่าย

ตัวอย่าง 9.10 พิจารณาวงจรดังแสดงในรูป Ex 9.10 (ก) ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันอนุกรมกับตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ เมื่อ $v_s = 10\cos(100t + 45^\circ)$ V จงหาเฟสเซอร์ของแหล่งจ่ายกระแสสมมูล



(ก) (ข)

รูปที่ Ex 9.10

วิธีทำ จากวงจร

$$\mathbf{Z}_s = 10 + j10$$
$$\mathbf{V}_s = 10\angle 45^\circ$$

เราหาเฟสเซอร์ของแหล่งจ่ายกระแสได้

$$\begin{aligned}\mathbf{I}_s &= \frac{10\angle 45^\circ}{\sqrt{200}\angle 45^\circ} \\ &= \frac{10}{\sqrt{200}}\angle 0^\circ\end{aligned}$$

ได้วงจรสมมูลดังแสดงในรูป Ex 9.10 (ข)

ทฤษฎีบทเทวินินและนอร์ตันก็สามารถนำมาใช้ในโดเมนความถี่ได้เช่นเดียวกัน โดยในการหาวงจรสมมูลเทวินินคือการหาเฟสเซอร์ของแรงดันเทวินิน $\mathbf{V}_t$ อนุกรมกับอิมพีแดนซ์สมมูล $\mathbf{Z}_t$ ดังแสดงในรูปที่ 9.14 โดยมีขั้นตอนสรุปได้ดังนี้

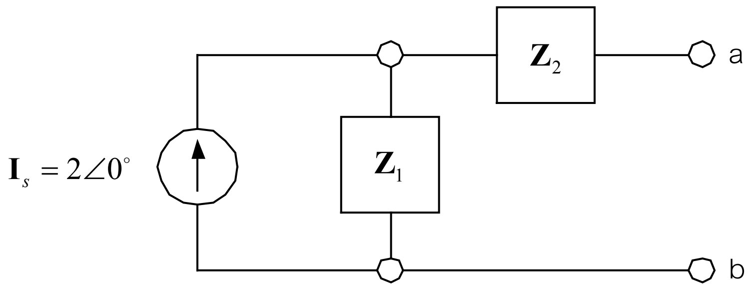
1. แบ่งวงจรส่วนที่ต้องการหาวงจรสมมูล
2. หาค่าเฟสเซอร์ของแรงดันเทวินิน $\mathbf{V}_t = \mathbf{V}_{oc}$ ซึ่งก็คือแรงดันเปิดวงจรที่ขั้วที่พิจารณา
3. หาค่าอิมพีแดนซ์สมมูล $\mathbf{Z}_t$ โดย

(ก) ทำให้แหล่งจ่ายอิสระทั้งหมดไม่ส่งผลต่อวงจร จากนั้นลดรูปอิมพีแดนซ์จนได้ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล

(ข) ถ้าวงจรมีแหล่งจ่ายขึ้นกับตัวแปรอื่น หาค่ากระแสลัดวงจร $\mathbf{I}_{sc}$ และจะได้อิมพีแดนซ์สมมูล $\mathbf{Z}_t = \dfrac{\mathbf{V}_{oc}}{\mathbf{I}_{sc}}$

(ค) ทำให้แหล่งจ่ายอิสระทั้งหมดไม่ส่งผลต่อวงจร ต่อแหล่งจ่ายแรงดันหรือแหล่งจ่ายกระแสทดสอบ หาค่าเฟสเซอร์ $\mathbf{V}$ และ $\mathbf{I}$ จะได้อิมพีแดนซ์สมมูล $\mathbf{Z}_t = \dfrac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}}$

ตัวอย่าง 9.11 พิจารณาวงจรดังแสดงในรูป Ex 9.11 เมื่อ $\mathbf{Z}_1 = 1 + j \quad \mathbf{Z}_2 = -j$ จงหาวงจรสมมูลเทวินินของวงจรนี้



รูปที่ Ex 9.11

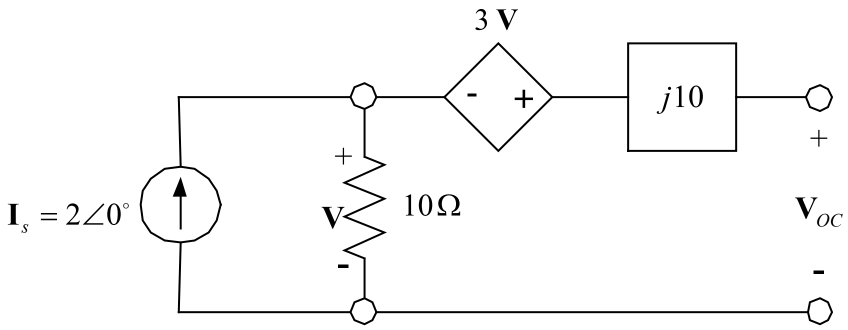
วิธีทำ จากวงจรแรงดันเปิดวงจร

$$\mathbf{V}_{OC} = \mathbf{I}_s \mathbf{Z}_1 = 2\sqrt{2}\angle 45^\circ$$

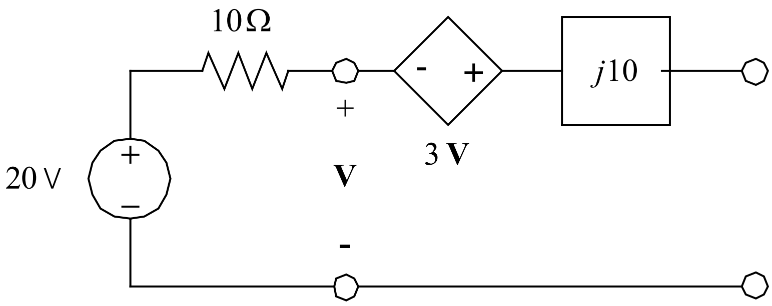
ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลได้จากการทำให้แหล่งจ่ายกระแสอิสระไม่ส่งผลต่อวงจรคือแทนด้วยเปิดวงจร จากนั้นลดรูปอิมพีแดนซ์จะได้

$$\mathbf{Z}_t = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 = 1\,\Omega$$

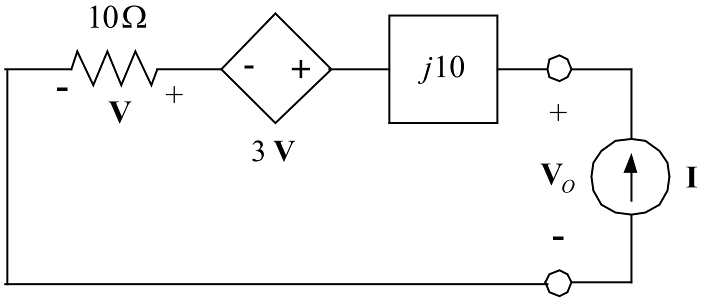
ตัวอย่าง 9.12 พิจารณาวงจรดังแสดงในรูป Ex 9.12 (ก) จงหาวงจรสมมูลเทวินินในรูปเฟสเซอร์ของวงจรนี้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ Ex 9.12

วิธีทำ จากวงจรหาค่าแรงดันสมมูลเทวินิน $\mathbf{V}_t = \mathbf{V}_{oc}$ โดยค่าแรงดัน

$$\mathbf{V} = 10\mathbf{I}_s = 20\angle 0^\circ$$

ดังนั้น

$$\mathbf{V}_{OC} = 3\mathbf{V} + \mathbf{V} = 80\angle 0^\circ$$

ทำการแปลงแหล่งจ่ายกระแสขนานกับตัวต้านทาน $10\,\Omega$ ในรูป Ex 9.12 (ก) เป็นแหล่งจ่ายแรงดันอนุกรมกับตัวต้านทาน $10\,\Omega$ ได้ดังแสดงในรูป Ex 9.12 (ข) ทำให้แหล่งจ่ายแรงดันอิสระไม่ส่งผลต่อวงจรคือแทนด้วยปิดวงจร และต่อแหล่งจ่ายกระแสทดสอบดังแสดงในรูป Ex 9.12 (ค) ใช้ KVL จะได้

$$\mathbf{V}_o = j10\mathbf{I} + 4\mathbf{V} = (j10 + 40)\mathbf{I}$$

ดังนั้น

$$\mathbf{Z}_t = 40 + j10\,\Omega$$

การหาวงจรสมมูลนอร์ตันคือการหาเฟสเซอร์ของกระแสนอร์ตัน $\mathbf{I}_N$ ขนานกับอิมพีแดนซ์สมมูล $\mathbf{Z}_t$ ดังแสดงในรูปที่ 9.15 โดยมีขั้นตอนสรุปได้ดังนี้

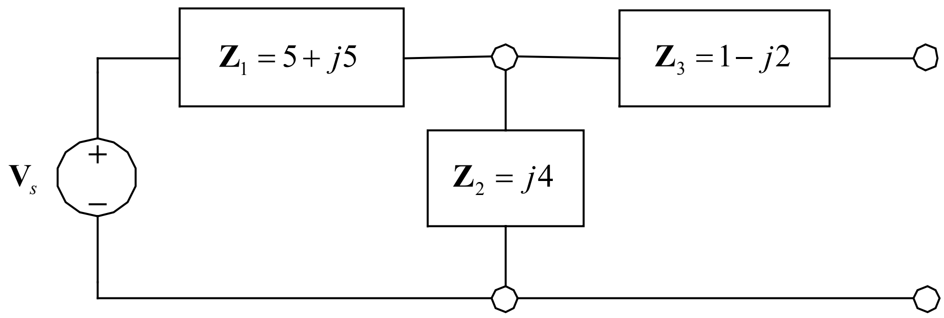
1. แบ่งวงจรส่วนที่ต้องการหาวงจรสมมูล
2. หาค่าเฟสเซอร์ของกระแสนอร์ตัน $\mathbf{I}_N = \mathbf{I}_{sc}$ ซึ่งก็คือกระแสลัดวงจรที่ขั้วที่พิจารณา
3. หาค่าอิมพีแดนซ์สมมูล $\mathbf{Z}_t$ โดย

(ก) ทำให้แหล่งจ่ายอิสระทั้งหมดไม่ส่งผลต่อวงจร จากนั้นลดรูปอิมพีแดนซ์จนได้ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล

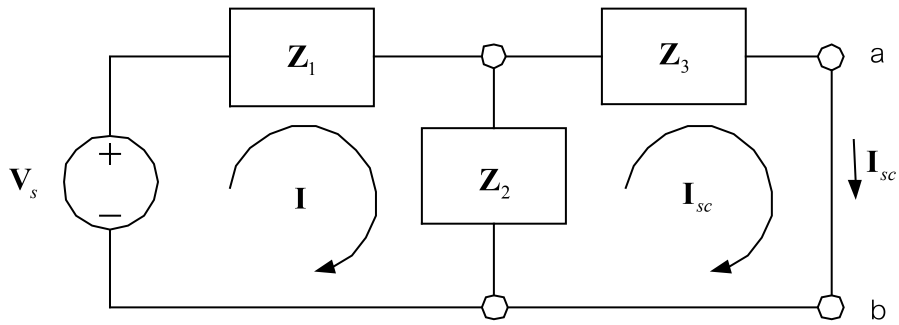
(ข) ถ้าวงจรมีแหล่งจ่ายขึ้นกับตัวแปรอื่น หาค่ากระแสลัดวงจร $\mathbf{I}_{sc}$ และจะได้อิมพีแดนซ์สมมูล $\mathbf{Z}_t = \dfrac{\mathbf{V}_{oc}}{\mathbf{I}_{sc}}$

(ค) ทำให้แหล่งจ่ายอิสระทั้งหมดไม่ส่งผลต่อวงจร ต่อแหล่งจ่ายแรงดันหรือแหล่งจ่ายกระแสทดสอบ หาค่าเฟสเซอร์ $\mathbf{V}$ และ $\mathbf{I}$ จะได้อิมพีแดนซ์สมมูล $\mathbf{Z}_t = \dfrac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}}$

ตัวอย่าง 9.13 พิจารณาวงจรดังแสดงในรูป Ex 9.13 (ก) จงหาวงจรสมมูลนอร์ตันในรูปเฟสเซอร์ของวงจรนี้ กำหนด $\mathbf{V}_s = 100\angle 0°$



(ก)



(ข)

รูปที่ Ex 9.13

วิธีทำ จากวงจรหาค่าอิมพีแดนซ์สมมูล $\mathbf{Z}_t$

$$\mathbf{Z}_t = \mathbf{Z}_3 + \frac{\mathbf{Z}_1\mathbf{Z}_2}{\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2}$$

แทนค่า $\mathbf{Z}_1$ $\mathbf{Z}_2$ และ $\mathbf{Z}_3$

$$\mathbf{Z}_t = (1-j2)+\frac{(5+j5)(j4)}{(5+j5)+(j4)}$$
$$=(1-j2)+\frac{20}{53}(2+j7)$$
$$=\frac{93}{53}+j\frac{34}{53}=\frac{1}{53}\left(93+j34\right)$$

หาค่ากระแสลัดวงจรที่ขั้ว a - b ดังแสดงในรูป Ex 9.13 (ข) ใช้ KVL เขียนสมการของสองเมช

$$(\mathbf{Z}_1+\mathbf{Z}_2)\mathbf{I}+(-\mathbf{Z}_2)\mathbf{I}_{sc}=\mathbf{V}_s$$
$$(-\mathbf{Z}_2)\mathbf{I}+(\mathbf{Z}_2+\mathbf{Z}_3)\mathbf{I}_{sc}=0$$

ใช้กฎของเครมเมอร์หาค่า $\mathbf{I}_{sc}=\mathbf{I}_N$

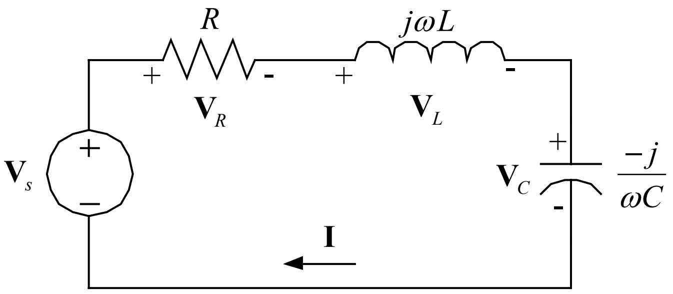
$$\mathbf{I}_{sc}=\frac{\mathbf{Z}_2\mathbf{V}_s}{(\mathbf{Z}_1+\mathbf{Z}_2)(\mathbf{Z}_2+\mathbf{Z}_3)-\mathbf{Z}_2^2}$$

แทนค่า $\mathbf{Z}_1$ $\mathbf{Z}_2$ $\mathbf{Z}_3$ และ $\mathbf{V}_s=100\angle 0°$

$$\mathbf{I}_{sc}=\frac{(j4)100}{(5+j9)(1+j2)-(-16)}$$
$$=\frac{j400}{3+j19}=\frac{400}{370}\left(19+j3\right) \text{ A}$$

9.9 การเขียนผังเฟสเซอร์

เฟสเซอร์คือตัวแทนของกระแสหรือแรงดันในโดเมนเวลา โดยทั่วไปเฟสเซอร์จะเป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งสามารถเขียนบนระนาบเชิงซ้อนได้เรียกว่าผังเฟสเซอร์ (Phasor Diagram)



รูปที่ 9.16 วงจร RLC

พิจารณาวงจร RLC ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ของแต่ละองค์ประกอบดังแสดงในรูปที่ 9.16 เนื่องจากกระแส $\mathbf{I}$ ไหลผ่านองค์ประกอบทั้งหมดเท่ากัน ดังนั้นเราจะใช้เฟสเซอร์ของกระแส $\mathbf{I}$ เป็นเฟสเซอร์อ้างอิง

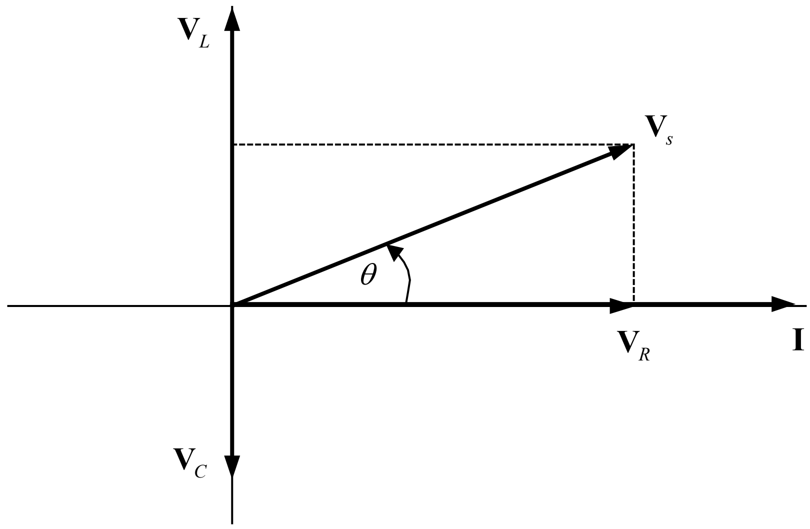
$$\mathbf{I}=I\angle 0°$$

และจะได้เฟสเซอร์ของแรงดันดังนี้

$$\mathbf{V}_R = R\mathbf{I} = RI\angle 0^\circ$$
$$\mathbf{V}_L = j\omega L\mathbf{I} = \omega LI\angle 90^\circ$$
$$\mathbf{V}_C = \frac{-j}{\omega C}\mathbf{I} = \frac{I}{\omega C}\angle -90^\circ$$

เขียนผังเฟสเซอร์ได้ดังในรูปที่ 9.17 และสังเกตว่า KVL ต้องการให้ผลรวมของแรงดัน

$$\mathbf{V}_s = \mathbf{V}_R + \mathbf{V}_L + \mathbf{V}_C$$



รูปที่ 9.17 ผังเฟสเซอร์ของวงจร RLC ในรูปที่ 9.16

จากผังเฟสเซอร์ในรูปที่ 9.17 จะเห็นว่ากระแสและแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานมีเฟสตรงกัน ในขณะที่แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะนำหน้ากระแสอยู่ 90° และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจะตามหลังกระแสอยู่ 90° สำหรับค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุค่าหนึ่ง จะมีความถี่ ω ที่ทำให้ขนาดเฟสเซอร์ของแรงดันเท่ากัน

$$|\mathbf{V}_L| = |\mathbf{V}_C|$$

ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

หรือที่ค่าความถี่

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} \rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

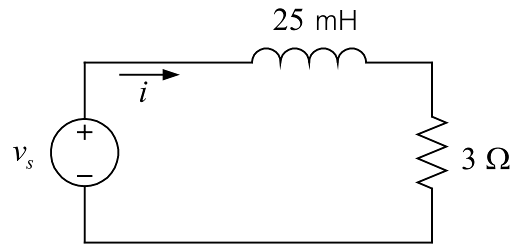
ที่ความถี่นี้ขนาดของเฟสเซอร์ของแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะเท่ากันและชี้ในทิศทางตรงข้าม ดังนั้นจะหักล้างกันพอดี เหลือแต่แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานหรือ

$$\mathbf{V}_s = \mathbf{V}_R$$

ซึ่ง $\mathbf{V}_s$ และ $\mathbf{V}_R$ จะมีเฟสตรงกัน เราเรียกเงื่อนไขแบบนี้ว่าเกิดการเรโซแนนซ์ (Resonance) ขึ้นในวงจร

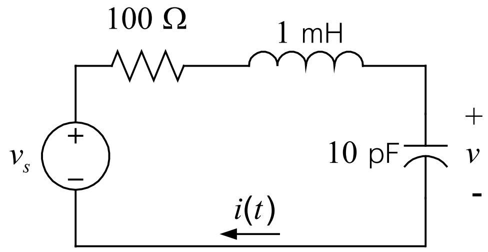
9.10 แบบฝึกหัดท้ายบท

1. จงหาผลตอบสนองกระตุ้น i สำหรับวงจร RL ในรูป P9.1 เมื่อ $v_s(t) = 10\cos 300t$ V



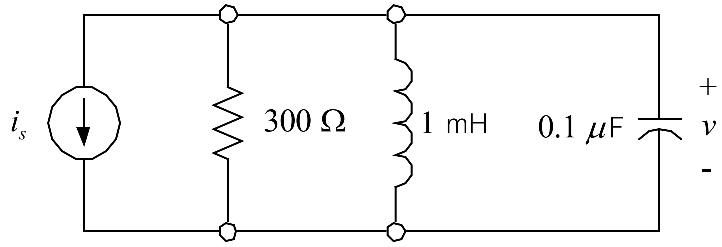
รูปที่ P 9.1

2. จงหาค่ากระแส $i(t)$ สำหรับวงจร RLC ในรูป P9.2 เมื่อ $v_s(t) = 0.1\cos(10^7 t + 90°)$ V



รูปที่ P 9.2

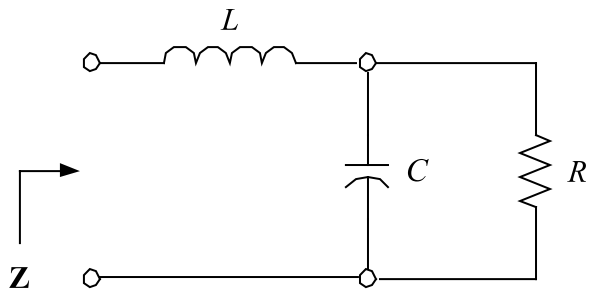
3. จงหาค่าแรงดัน $v(t)$ สำหรับวงจร RLC ในรูป P9.3 เมื่อ $i_s(t) = 5\cos(10^5 t - 120°)$ V



รูปที่ P 9.3

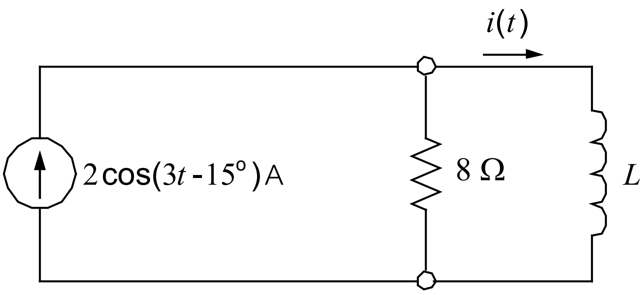
4. แรงดันรวม v เกิดจากการต่ออนุกรมของแรงดัน v_1 และ v_2 นั่นคือ $v = v_1 + v_2$ ถ้า $v_1 = 150\cos(377t - \pi/6)$ V และ $\mathbf{V}_2 = 200\angle 60°$ V จงหาค่าแรงดันรวม v

5. พิจารณาวงจร RLC ในรูป P9.5 เมื่อ $R = 10\ \text{k}\Omega$ และความถี่ $f = 10$ kHz จงหาค่าความเหนี่ยวนำ L และค่าความจุ C ที่จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ $\mathbf{Z} = 100 + j0\ \Omega$



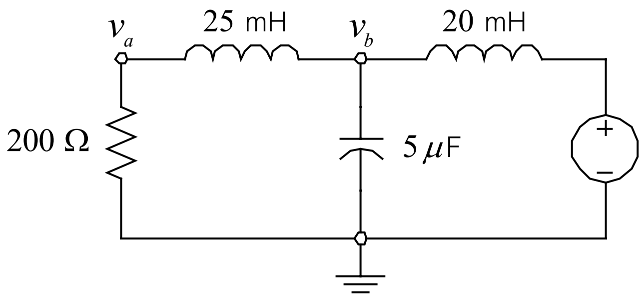
รูปที่ P 9.5

6. จากวงจร RLC ในรูป P9.6 จงหาค่าคงที่ B และค่าความเหนี่ยวนำ L เมื่อ $i(t) = B\cos(3t - 51.87°)$ A



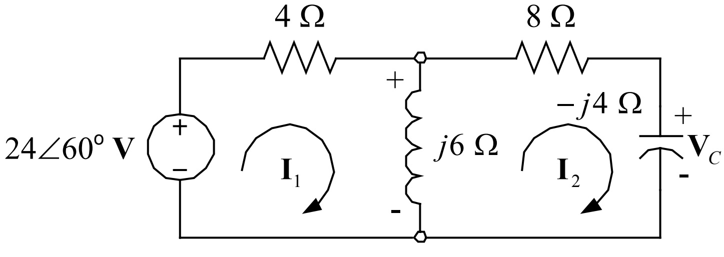
รูปที่ P 9.6

7. จากวงจร RLC ในรูป P9.7 จงหาค่าแรงดันโนดทั้งสองคือ $v_a(t)$ และ $v_b(t)$ เมื่อ $v_s(t) = 1.2\cos 4000t$ V



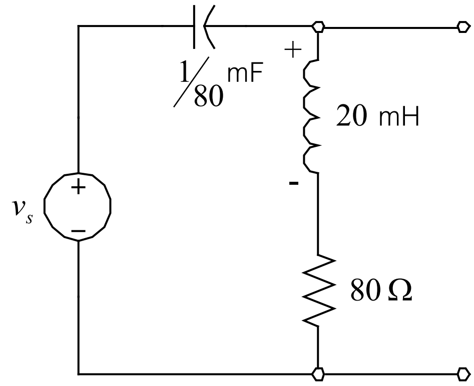
รูปที่ P 9.7

8. จากวงจร RLC ในรูป P9.8 จงหาค่าเฟสเซอร์ของกระแสเมช $\mathbf{I}_1$ $\mathbf{I}_2$ แรงดัน $\mathbf{V}_L$ และ $\mathbf{V}_C$ โดยใช้ KVL และการวิเคราะห์เมช



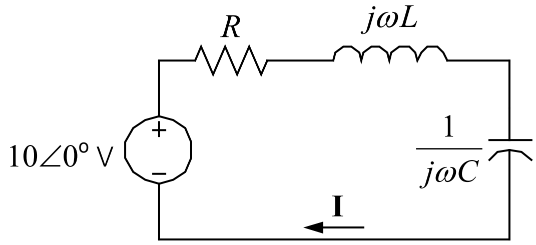
รูปที่ P 9.8

9. จงหาวงจรสมมูลเทวินินของวงจรในรูป P9.9 เมื่อ $v_s(t) = 5\cos(4000t - 30°)$ V



รูปที่ P 9.9

10. พิจารณาวงจร RLC ในรูป P9.10 เมื่อ $R = 10\ \Omega$ $C = 100\ \mu$F $L = 1$ mH และ $\omega = 10^3$ rad/s จงหาค่าเฟสเซอร์ของกระแส $\mathbf{I}$ และเขียนกราฟผังเฟสเซอร์ของกระแสและแรงดันต่างๆ



รูปที่ P 9.10