บทที่ 19
ไฟฟ้ากระแสสลับ

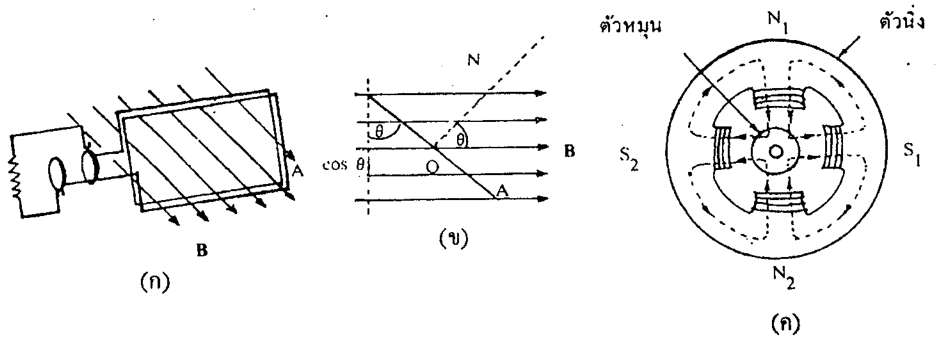
ในปัจจุบัน เป็นที่เข้าใจกันโดยทั่วไปแล้วว่า ไฟฟ้ามีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าสิ่งจำเป็นอย่างอื่น ๆ อันเกี่ยวข้องอยู่กับการดำรงชีพ การอำนวยความสะดวกนานาประการ การผลิตต่าง ๆ และอาจจะนับรวมไปถึงการให้กำเนิดสิ่งอำนวยความบันเทิงอย่างมากมายในยุคนี้ ไฟฟ้าที่เข้าใจกันอยู่แล้ว ก็คือ ไฟฟ้าสถิต และไฟฟ้ากระแส เราได้กล่าวถึงไฟฟ้ากระแสตรงไว้แล้ว จึงจะได้ให้ทำความเข้าใจเกี่ยวกับไฟฟ้ากระแสสลับต่อไป

19.1 เครื่องกำเนิดกระแสสลับ

เครื่องมือที่ก่อกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ คือ *เครื่องกำเนิดกระแสสลับ (alternating current generator หรือ alternator)* ประกอบด้วยขดลวดหมุนอยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูป 19.1 ก. ปลายทั้งสองของขดลวดนี้ต่อกับวงแหวนปลายละอัน วงแหวนแต่ละอันมีแปรงแตะและมีสายไฟฟ้าต่อจากแปรงเพื่อนำเอาไฟฟ้าไปใช้

ในรูป 19.1 ข. แสดงภาพของขดลวดและสนามแม่เหล็กเมื่อมองเข้าไปในแนวตั้งฉาก

ON	=	เส้นปกติของพื้นที่ของขดลวด (ตรงจุดกลาง)
A	=	พื้นที่ของขดลวด
θ	=	มุมที่เส้นปกติกระทำกับแนวสนามแม่เหล็ก
B	=	การเหนี่ยวนำแม่เหล็กของสนามแม่เหล็ก



รูป 19.1 (ก) ขดลวดหมุนอยู่ในสนามแม่เหล็ก (ข) แสดงตำแหน่งของขดลวด ณ ขณะหนึ่ง (ค) แสดงลักษณะและส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดกระแสสลับ

	N	=	จำนวนรอบของขดลวด
	ϕ	=	ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ A = BA cos θ
ถ้า	e	=	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะใด ๆ

$$e = -N\frac{d\phi}{dt} = -N\frac{d}{dt}(BA\cos\theta)$$

$$= NBA\sin\theta\frac{d\theta}{dt}$$

แต่ $\frac{d\theta}{dt}$ = อัตราเร็วเชิงมุม = ω

ดังนั้น $e = NBA\,\omega\sin\theta$

เมื่อการหมุนเป็นไปด้วยอัตราที่สม่ำเสมอ $\omega = \frac{\theta}{t}$ จึงได้

$$\theta = \omega t$$

และ $$e = NBA\,\omega\sin\omega t \qquad (19.1)$$

จะมีค่ามากที่สุดเมื่อ $\sin\omega t = 1$

ให้ E_m = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งมีค่ามากที่สุดนี้ จึงได้

$$E_m = NBA\,\omega$$

ดังนั้น สมการ (19.1) จึงเขียนได้เป็น

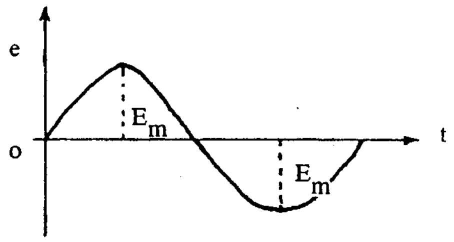
$$e = E_m\sin\omega t \qquad (19.2)$$

19.1 เครื่องกำเนิดกระแสสลับ

ถ้า f = ความถี่เป็นรอบต่อวินาที ได้ $\omega = 2\pi f$ ดังนั้น จึงได้

$$e = E_m \sin 2\pi ft$$

สมการนี้เมื่อเขียนเป็นกราฟ จะได้เป็นรูป 19.2



รูป 19.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา

แรงเคลื่อนไฟฟ้า e จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและมีทิศกลับไปมาอยู่เรื่อย ๆ เป็นผลให้กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น มีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา และมีทิศทางการไหลกลับไปมาสลับกันอยู่ตลอดไป จึงเรียกว่า *ไฟฟ้ากระแสสลับ (alternating current)*

ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีลักษณะดังแสดงอยู่ในรูป 19.1 ค. คือ ประกอบด้วยส่วนนอกซึ่งอยู่กับที่เรียกว่า *ตัวนิ่ง (stator)* มีขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าติดอยู่กับตัวนิ่งนี้ ขั้วแม่เหล็กนี้อาจติดไว้ 1 คู่ คือ ขั้ว N ขั้วหนึ่งและขั้ว S อีกขั้วหนึ่ง หรือ 2 คู่หรือ 3 คู่สุดแต่การสร้าง ในรูปแสดงไว้ 2 คู่ ขั้วแม่เหล็กเหล่านี้จะเรียงสลับกันไป ส่วนขดลวดนั้นพันอยู่รอบ ๆ *ตัวหมุน (rotor)* ซึ่งหมุนอยู่ตรงกลาง

ไฟฟ้า 1 รอบนั้นเกิดจากการที่ขดลวดเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็ก N และ S หนึ่งคู่ ในรูป 19.1 ค. เมื่อลวดเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กของขั้ว N_1S_1 จะได้ไฟฟ้าออกมา 1 รอบ และเมื่อผ่านสนามแม่เหล็กของคู่ N_2S_2 จะได้ไฟฟ้าออกมาอีก 1 รอบ

ดังนั้น ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขั้วแม่เหล็ก NS เพียงคู่เดียว เมื่อขดลวดหรือตัวหมุนไป 1 รอบ จะได้ไฟฟ้าออกมา 1 รอบ

ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขั้วแม่เหล็กสองคู่ดังแสดงในรูป 19.1 ค. เมื่อขดลวดหรือตัวหมุนหมุนไปครบ 1 รอบ จะได้ไฟฟ้าออกมา 2 รอบ

ถ้า f = ความถี่ของไฟฟ้าที่ได้ออกมาเป็นรอบต่อวินาทีหรือ **เฮิร์ทซ์**

rps = จำนวนรอบของการหมุนของตัวหมุนหรือขดลวดในเวลา 1 วินาที

p = จำนวนคู่ของขั้วแม่เหล็ก

ย่อมได้ $f = p \times (\text{rps})$

เช่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องหนึ่งมีขั้วแม่เหล็ก 5 คู่ มีอัตราเร็วในการหมุน 3,600 รอบต่อนาที เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะให้ไฟฟ้าซึ่งมีความถี่เท่ากับ $f = 5 \times (\frac{3600}{60}) = 300$ เฮิร์ทซ์

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งจ่ายไฟฟ้าความถี่สูงใช้วิธีสร้างให้มีขั้วแม่เหล็กมีจำนวนคู่มาก ๆ ตัวหมุนในอัตราธรรมดา ก็สามารถจ่ายไฟฟ้าซึ่งมีความถี่สูงออกมาได้

ต่อไปนี้เมื่อกล่าวถึงไดนาโมกระแสสลับ จะเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์และเขียนแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกจ่ายออกมาด้วยสมการ (19.2) คือ

$$e = E_m \sin \omega t$$

หรือ

$$e = E_m \sin 2\pi f t$$

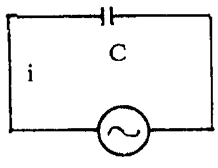
19.2 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดกระแสสลับและส่วนประกอบอีก 3 อย่างคือ

1. ตัวต้านทาน (resistor)
2. ตัวจุ (capacitor)
3. ตัวเหนี่ยวนำ (inductor)

19.2.1 วงจรซึ่งมีตัวจุอย่างเดียว

วงจรรูป 19.3 ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดกระแสสลับซึ่งมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า $e = E_m \sin \omega t$ และตัวจุ ซึ่งมีความจุ (capacitance) เป็น C ฟารัด



$e = E_m \sin \omega t$

รูป 19.3 ตัวจุในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

ให้ i เป็นกระแสไฟฟ้าในขณะใด ๆ (instantaneous current)

q เป็นประจุไฟฟ้าที่ตัวจุ C ในขณะใด ๆ

v_C เป็นความต่างศักย์ของตัวจุ C ในขณะใด ๆ

จะได้

$$v_C = e = E_m \sin \omega t$$

$$\frac{q}{C} = E_m \sin \omega t$$

$$q = CE_m \sin \omega t$$

ดังนั้น $$\frac{dq}{dt} = (\omega C)\, E_m \cos \omega t$$

แต่ $$\frac{dq}{dt} = i$$

จึงได้ $$i = (\omega C)\, E_m \cos \omega t$$

เขียนใหม่เป็น $$i = \frac{E_m}{(\frac{1}{\omega C})} \cos \omega t \qquad (19.3)$$

ปริมาณ $(\frac{1}{\omega C})$ นี้มีชื่อเรียกว่า *ความต้านแห่งการจุ (capacitive reactance)* นิยมเขียนแทนด้วย X_C และมีหน่วยเป็นโอห์ม (ohm) กล่าวคือ

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$ เรียกว่า ความต้านแห่งการจุ

ดังนั้น สมการสุดท้ายจึงกลายเป็น

$$i = \frac{E_m}{X_C} \cos \omega t \qquad (19.4)$$

ปริมาณ $\frac{E_m}{X_C}$ คือ กระแสไฟฟ้าซึ่งมีค่าสูงสุดของวงจรเขียนแทนด้วย I_m

ดังนั้น $i = I_m \cos \omega t$ โดยที่ $I_m = \frac{E_m}{X_C}$

เพื่อที่จะเทียบกับ v_C ซึ่งมีค่าเท่ากับ $e = E_m \sin \omega t$ จึงเขียนสมการสุดท้ายเสียใหม่เป็น $i = I_m \sin (\omega t + \frac{\pi}{2})$

นำความต่างศักย์ v_C และกระแสไฟฟ้าในขณะใด i มาเปรียบเทียบกันคือ

$$v_C = E_m \sin \omega t$$

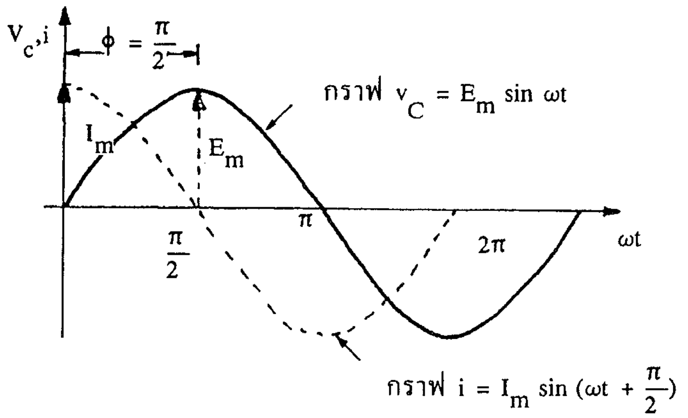
$$i = I_m \sin (\omega t + \frac{\pi}{2}) \qquad (19.5)$$

จะเห็นได้ว่า v_C กับ i มีลักษณะของกราฟเป็นแบบเดียวกัน ผิดกันที่มุม ωt กับ $(\omega t + \frac{\pi}{2})$ เท่านั้น กล่าวคือ กระแสไฟฟ้า i *นำหน้า (lead)* ความต่างศักย์ v_C เป็นมุม $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน หรือความต่างศักย์ v_C *ตามหลัง (lag)* กระแส i เป็นมุม $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน

มุม $\frac{\pi}{2}$ นี้มีชื่อเรียกกันว่า *มุมเฟส (phase angle)* เขียนแทนด้วย ϕ

สรุปได้ว่า มุมเฟส ϕ คือ มุมที่กระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์นำหน้าหรือตามหลังซึ่งกันและกัน นำสมการ $v_C = E_m \sin \omega t$ กับ $i = I_m \sin (\omega t + \frac{\pi}{2})$ มาเขียนเป็นกราฟซ้อนกันโดยใช้แกนนอน

เป็น ωt ร่วมกัน จะได้เป็นรูป 19.4



รูป 19.4 แสดงกระแสไฟฟ้านำหน้าความต่างศักย์เป็นมุม $\frac{\pi}{2}$

19.2.2 วงจรซึ่งมีตัวเหนี่ยวนำอย่างเดียว

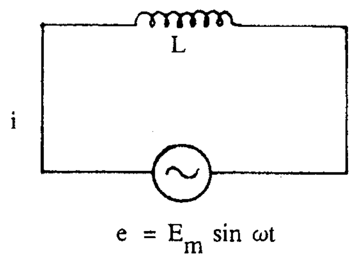
วงจรรูป 19.5 ประกอบด้วยไดนาโมกระแสสลับซึ่งมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็น $e = E_m \sin \omega t$ และตัวเหนี่ยวนำซึ่งมีความเหนี่ยวนำ (inductance) เป็น L เฮนรี

ให้ i = กระแสไฟฟ้าในขณะใด ๆ

v_L = ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวเหนี่ยวนำในขณะใด ๆ

$$= -L\frac{di}{dt}$$

ในวงจรจะได้ $v_L + e = 0$



รูป 19.5 ตัวเหนี่ยวนำในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

แทนค่า v_L และ e ได้

$$L\frac{di}{dt} = E_m \sin \omega t$$

$$di = \frac{E_m}{L} \sin \omega t \, dt$$

$$\int di = \int \frac{E_m}{L} \sin \omega t \, dt$$

$$i = \frac{E_m}{(\omega L)} \left[-\cos \omega t \right] + C$$

สำหรับไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีลักษณะสมมาตร (symmetry) กันทั้งด้านบวกและด้านลบ จะได้ค่าคงที่ $C = 0$

ดังนั้น
$$i = \frac{E_m}{\omega L} \left[-\cos \omega t \right]$$

$$= \frac{E_m}{\omega L} \sin (\omega t - \frac{\pi}{2})$$

ปริมาณ ωL นี้มีชื่อเรียกกันว่า *ความต้านแห่งการเหนี่ยวนำ (inductive reactance)* นิยมเขียนแทนด้วย X_L และมีหน่วยเป็นโอห์ม กล่าวคือ

$X_L = \omega L$ เรียกว่า ความต้านแห่งการเหนี่ยวนำ

ดังนั้น สมการสุดท้ายจึงกลายเป็น

$$i = \frac{E_m}{X_L} \sin (\omega t - \frac{\pi}{2}) \qquad (19.6)$$

ปริมาณ $\frac{E_m}{X_L}$ คือ กระแสไฟฟ้าซึ่งมีค่าสูงสุดของวงจร I_m นั่นเอง ดังนั้น จึงได้

$$i = I_m \sin (\omega t - \frac{\pi}{2}) \qquad (19.7)$$

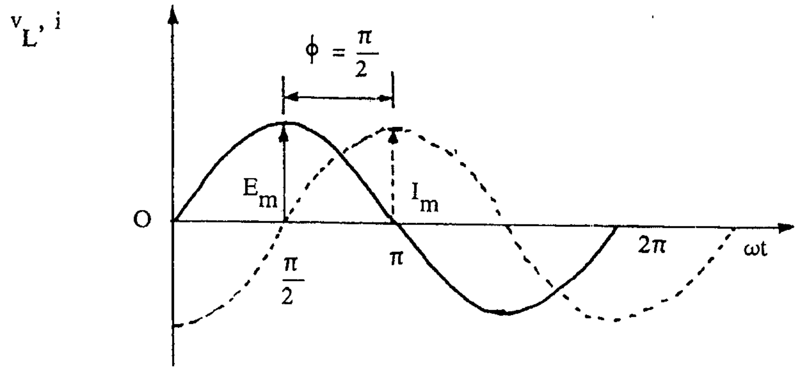
นำความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวเหนี่ยวนำ คือ v_L กับกระแสไฟฟ้า i ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะเดียวกันนั้นมาเทียบกัน คือ

$$v_L = E_m \sin \omega t$$

$$i = I_m \sin (\omega t - \frac{\pi}{2})$$

จะเห็นได้ว่า v_L กับ i มีลักษณะของกราฟเป็นแบบเดียวกัน ผิดกันที่มุม ωt กับ $(\omega t - \frac{\pi}{2})$ เท่านั้น กล่าวคือ กระแสไฟฟ้า i ตามหลังความต่างศักย์ v_L เป็นมุม $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน หรือความต่างศักย์ v_L นำหน้ากระแสไฟฟ้า i เป็นมุม $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน

จำนวนมุม $\frac{\pi}{2}$ นี้ คือ มุมเฟส ϕ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว นั่นเอง กราฟของ v_L กับ i มีลักษณะดังรูป 19.6



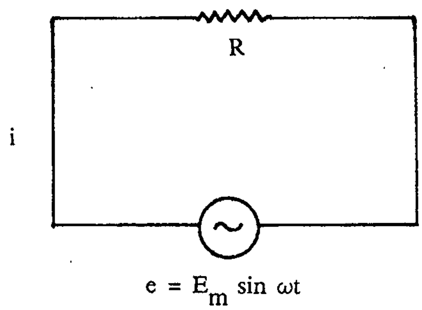
รูป 19.6 ความต่างศักย์นำหน้ากระแสไฟฟ้าเป็นมุม $\frac{\pi}{2}$

19.2.3 วงจรซึ่งมีตัวต้านทานอย่างเดียว

วงจรรูป 19.7 ประกอบด้วยไดนาโมกระแสสลับซึ่งมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็น $e = E_m \sin \omega t$ และตัวต้านทานซึ่งมีความต้านทาน

ให้ i เป็นกระแสไฟฟ้าในขณะใด ๆ

v_R เป็นความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทานในขณะใด ๆ



รูป 19.7 ตัวต้านทานในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

$$v_R = iR$$

$$v_R = e = E_m \sin \omega t$$

$$iR = E_m \sin \omega t$$

ได้

$$i = \frac{E_m}{R} \sin \omega t$$

จำนวน $\frac{E_m}{R}$ คือ กระแสไฟฟ้าซึ่งมีค่าสูงสุดของวงจร I_m คือ

$$\frac{E_m}{R} = I_m$$

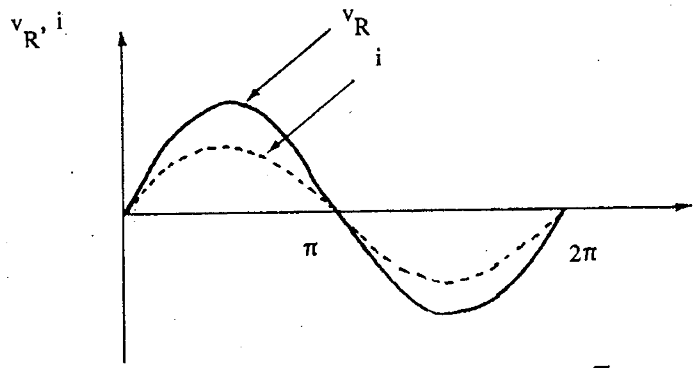
ดังนั้น $$i = I_m \sin \omega t \tag{19.8}$$

นำความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทาน คือ v_R กับกระแสไฟฟ้า i ที่ไหลผ่านตัวต้านทานในขณะเดียวกันนั้นมาเทียบกัน คือ

$$v_R = E_m \sin \omega t$$

$$i = I_m \sin \omega t$$

จะเห็นได้ว่า v_R กับ i มีลักษณะของกราฟเป็นแบบเดียวกันทุกประการ และมุมเฟส $\phi = 0$ หมายความว่า กระแสไฟฟ้า i กับความต่างศักย์ v_R ไปพร้อม ๆ กัน ดังรูป 19.8



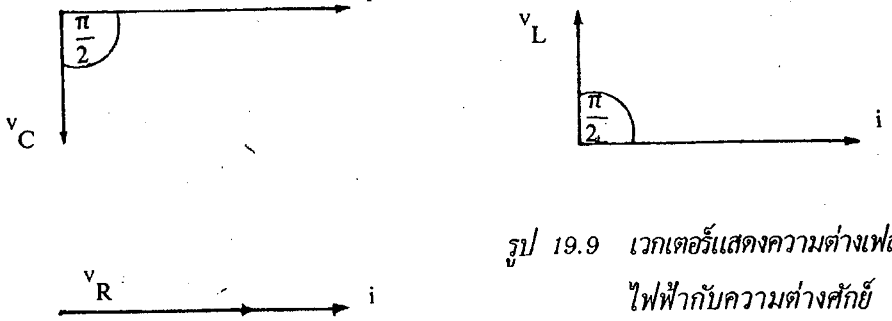
รูป 19.8 กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ซึ่งมีเฟสเหมือนกัน

สรุปได้ว่า i นำหน้า v_C เป็นมุม $\frac{\pi}{2}$

i ตามหลัง v_L เป็นมุม $\frac{\pi}{2}$

i ไปพร้อมกับ v_R

เมื่อนำค่าเหล่านี้มาเขียนแผนภาพแสดงเฟส (phasor diagram) จะมีลักษณะดังรูป 19.9



รูป 19.9 เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์

19.3 สมการทั่วไปของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

ต่อไปนี้เราจะเขียนสมการของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเป็นรูปดังนี้

แรงเคลื่อนไฟฟ้า $e = E_m \sin \omega t$

$i = I_m \sin (\omega t + \phi)$ เมื่อ i นำหน้า e เป็นมุม ϕ

$i = I_m \sin (\omega t - \phi)$ เมื่อ i ตามหลัง e เป็นมุม ϕ

$i = I_m \sin \omega t$ เมื่อ i กับ e ไปพร้อมกัน

19.4 ค่ายังผลของกระแส

ไฟฟ้ากระแสสลับนั้นเป็นไฟฟ้าซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ไม่ว่าจะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า จะเปลี่ยนค่าอยู่เรื่อย ๆ จากค่าศูนย์ถึงค่าสูงสุด คือ E_m หรือ I_m เมื่อให้ไฟฟ้ากระแสสลับทำงาน เช่น ให้เปลี่ยนรูปเป็นความร้อนหรือแสงสว่างหรือเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานกล ค่าของไฟฟ้ากระแสสลับที่จะทำงานดังกล่าวนี้ อาจคิดค่าโดยเฉลี่ยแทนค่าซึ่งเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลานั้นได้ ค่าโดยเฉลี่ยของไฟฟ้ากระแสสลับดังกล่าวนี้มีชื่อเรียกโดยเฉพาะว่า *ค่ายังผล (effective value)* ซึ่งมีคำนิยามโดยกำหนดจากกระแสไฟฟ้า ดังนี้

ค่ายังผลของกระแสไฟฟ้าสลับใด ๆ กำหนดให้เป็นค่าของกระแสไฟฟ้าขนาดสม่ำเสมอ ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนจำนวนเดียวกันในเวลาเท่ากัน เมื่อปล่อยให้ผ่านความต้านทานอันเดียวกัน

กระแสไฟฟ้าสลับมีสมการเป็น $i = I_m \sin \omega t$

ให้ I เป็นค่ายังผลของกระแสไฟฟ้าสลับนี้

ตามคำจำกัดความที่กล่าวแล้ว เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าสลับ $i = I_m \sin \omega t$ ผ่านความต้านทาน R อันหนึ่งในเวลาอันหนึ่ง ต่อจากนั้นก็ปล่อยกระแสไฟฟ้าอันมีค่าเท่ากับค่ายังผล I ผ่านความต้านทาน R ตัวเดียวกันนั้น โดยใช้เวลาเท่ากันทั้งสองครั้งย่อมเกิดความร้อนจำนวนเดียวกัน สมมติให้ H เป็นปริมาณความร้อนดังกล่าวนี้

คิดตอนปล่อยกระแสไฟฟ้าสลับ i ผ่านความต้านทาน R เป็นเวลานานเท่ากับ 1 รอบ คือ T วินาที ในช่วงเวลาสั้น ๆ dt พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น

$$dH = i^2 R dt = (I_m \sin \omega t)^2 R\, dt$$

19.4 ค่ายังผลของกระแส

ในเวลา 1 คาบ

$$\int_o^T dH = \int_o^T I_m^2 R \sin^2 \omega t \, dt$$

$$H = \frac{I_m^2 R}{\omega} \int_o^T \sin^2 \omega t \, d\omega t$$

จาก $\int \sin^2\theta \, d\theta = \frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4}$ จึงได้

$$H = \frac{I_m^2 R}{\omega} \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4} \right]_o^T$$

$$= \frac{I_m^2 R}{\omega} \left[\frac{\omega T}{2} - 0 - 0 + 0 \right], \quad \left(\omega T = \frac{2\pi}{T} \cdot T = 2\pi \right)$$

$$H = \frac{I_m^2 RT}{2}$$

คิดตอนปล่อยกระแสไฟฟ้ามีค่ายังผล I ผ่าน R ตัวเดียวกันในเวลา T อันเดียวกันและเกิดความร้อน H จำนวนเดียวกัน

$$H = I^2 RT$$

จากคำจำกัดความของค่ายังผลของกระแสไฟฟ้าสลับ ปริมาณความร้อนทั้งสองนี้เท่ากัน

$$I^2 RT = \frac{I_m^2 RT}{2}$$

ได้ $$I^2 = \frac{I_m^2}{2}$$

ดังนั้น ค่ายังผล $$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 \, I_m \qquad (19.9)$$

ในทำนองเดียวกัน แรงเคลื่อนไฟฟ้า $e = E_m \sin \omega t$ โดย E_m เป็นค่าสูงสุด จะมีค่ายังผลเป็นรูปเดียวกัน คือ

ถ้า E เป็นค่ายังผลของแรงเคลื่อนไฟฟ้านั้น

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.707\ E_m \tag{19.10}$$

บางครั้งเรียกค่ายังผลว่า *ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (root mean square, rms)*

ตัวอย่าง 19.1 ไฟฟ้ากระแสสลับอันหนึ่งมีสมการของกระแสไฟฟ้าเป็น

$I = 10 \sin (400t - \frac{\pi}{4})$ ในหน่วยแอมแปร์

ให้หา ก. ค่ายังผลของกระแสไฟฟ้า I

ข. ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับนี้

ค. มุมเฟส

วิธีทำ โดยเทียบกับสมการทั่วไปของกระแสไฟฟ้า $I = I_m \sin (\omega t - \phi)$

ค่าของกระแสสูงสุด $I_m = 10$ แอมแปร์

$\omega = 400$ เรเดียนต่อวินาที

มุมเฟส $\phi = \frac{\pi}{4}$ เรเดียน

จึงได้ ก. ค่ายังผลของกระแสไฟฟ้า $I = 0.707\ I_m = 0.707 \times 10$

$= 7.07$ แอมแปร์

ข. จาก $\omega = 2\pi f$ ได้

ความถี่ $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{400}{2\pi} = 63.7$ เฮิร์ทซ์

ค. มุมเฟส $\phi = \frac{\pi}{4}$ เรเดียน โดยกระแสตามความต่างศักย์ *ตอบ*

ค่าของความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสสลับนั้น ในทางปฏิบัติใช้ค่ายังผล และเครื่องวัดไฟฟ้ากระแสสลับ ไม่ว่าจะเป็นโวลต์มิเตอร์หรือแอมมิเตอร์ ก็จะชี้บอกค่าดังกล่าวของความต่างศักย์หรือกระแสไฟฟ้า เช่น ที่พูดกันว่า ไฟบ้านมีความต่างศักย์ 220 โวลต์ เลข 220 โวลต์นี้เป็นค่ายังผลของความต่างศักย์ ซึ่งมีความหมายว่า ความต่างศักย์สูงสุดมีค่าเท่ากับ $\sqrt{2} \times 220 = 311.08$ โวลต์ ดังนั้นต่อไปนี้เมื่อกล่าวถึงกระแสไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้า หรือความต่างศักย์ เราจะหมายถึงค่ายังผลเสมอไป

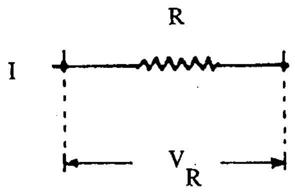
19.5 ความต่างศักย์

ในเรื่องไฟฟ้ากระแสสลับ ความต่างศักย์ระหว่างสองจุดใด ๆ มีวิธีคิดคล้ายกับกระแสตรง คือ ยังคงใช้กฎของโอห์ม คือ

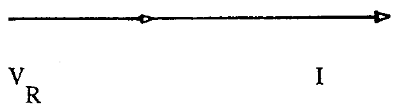
$$\text{ความต่างศักย์} = \text{กระแส} \times \text{ความต้านทาน}$$

มีรายละเอียดดังนี้

19.5.1 ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทาน



(ก)



(ข)

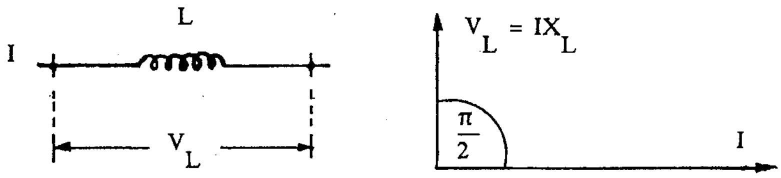
รูป 19.10 (ก) ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทาน
(ข) เวกเตอร์แสดงเฟสของความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า

ในรูป 19.10 รูปบนแสดงภาพของตัวต้านทานซึ่งมีความต้านทาน R โอห์ม กำลังมีกระแสไฟฟ้าสลับ I แอมแปร์ไหลผ่าน ทำให้ปลายทั้งสองของมันมีความต่างศักย์ V_R เกิดขึ้นโดยที่

$$V_R = IR$$

ความต่างศักย์ V_R กับกระแสไฟฟ้า I มีมุมเฟส $\phi = 0$ จึงเขียนรูปเวกเตอร์ของ V_R กับเวกเตอร์ของ I ซ้อนกัน ดังรูปข้างบน

19.5.2 ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวเหนี่ยวนำ



(ก) (ข)

รูป 19.11 (ก) ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวเหนี่ยวนำ
(ข) เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสของความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า

รูป 19.11 รูปบนแสดงตัวเหนี่ยวนำซึ่งมีความเหนี่ยวนำเป็น L เฮนรี กำลังมีกระแสไฟฟ้าสลับ I แอมแปร์ไหลผ่าน ทำให้เกิดมีความต่างศักย์ V_L ขึ้นระหว่างปลายทั้งสองของมัน (ลวดไม่มีความต้านทาน)

ได้กล่าวมาแล้วว่า ความต้านแห่งการเหนี่ยวนำ $X_L = \omega L$

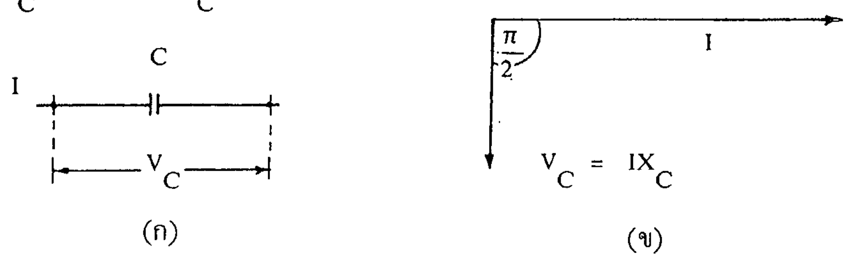
ในกรณีนี้ $V_L \quad = \quad IX_L$

โดยที่ V_L นำหน้ากระแสไฟฟ้า I เป็นมุม $\phi = \frac{\pi}{2}$ เรเดียนตามที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงเขียนเวกเตอร์ของ V_L ตั้งฉากกับเวกเตอร์ของ I ดังรูปข้างล่าง ซึ่งมีความหมายว่า V_L นำ I เป็นมุม $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน

19.5.3 ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวจุ

ตัวจุซึ่งมีความจุเป็น C ฟารัด มีไฟฟ้ากระแสสลับ I แอมแปร์ผ่าน ทำให้เกิดมีความต่างศักย์ V_C ขึ้นระหว่างปลายทั้งสองดังรูป 19.12 รูปล่าง ได้กล่าวมาแล้วว่า ความต้านแห่งการจุ $X_C = \frac{1}{\omega C}$

ในกรณีนี้ $V_C \quad = \quad IX_C$



รูป 19.12 (ก) ความต่างศักย์ระหว่างตัวจุ
(ข) เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสของความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า

โดยที่ V_C ตามหลัง I เป็นมุม $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น ดังนั้น จึงเขียนรูปเวกเตอร์ V_C ตามหลังเวกเตอร์ I เป็นมุม $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน

19.6 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมี R L และ C

ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับมี R L และ C ต่อกันอยู่ โดยอาจเป็นการต่อแบบอนุกรม ขนาน หรือผสมก็ได้ การคำนวณก็ยังคงใช้หลักที่กล่าวมาแล้วนั่นเอง โดยพิจารณาเป็นขั้น ๆ ไป

19.6.1 การต่อ R L C แบบอนุกรม

ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวจุต่ออนุกรมกันดังรูป 19.13 มีหลักสำคัญคือ

1. R L และ C มีกระแส I ตัวเดียวกัน

2. ความต่างศักย์รวม V มีค่าเท่ากับเวกเตอร์ลัพธ์ของเวกเตอร์ V_R V_L และ V_C เช่นเดียวกับที่แล้วมา

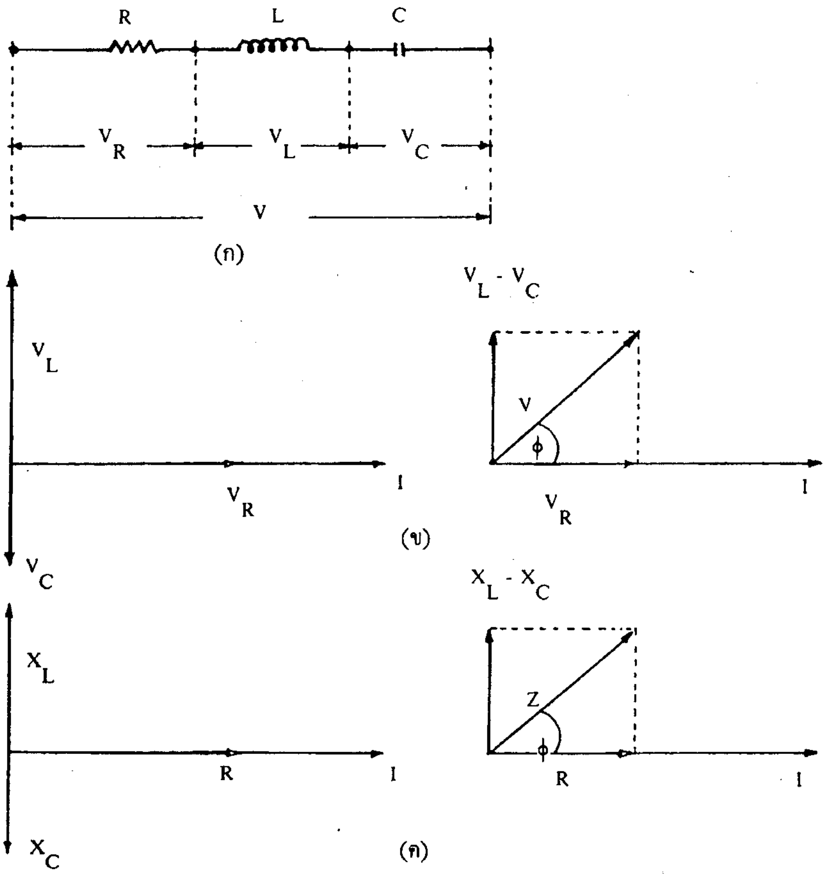
$$X_L = \omega L \text{ และ } X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$V_R = IR \text{ (ทับกับ I)}$$

$$V_L = IX_L \text{ (นำหน้า I เป็นมุม } \frac{\pi}{2} \text{)}$$

$$V_C = IX_C \text{ (ตามหลัง I เป็นมุม } \frac{\pi}{2} \text{)}$$

ผลรวมของ R X_L และ X_C มีชื่อเรียกว่า *ความขัด (impedance)* และเขียนด้วยอักษร Z



รูป 19.13 (ก) R L *และ* C *ต่อกันแบบอนุกรม*

(ข) เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสของกระแสความต่างศักย์

(ค) เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสของ R X_c X_L *และกระแส*

$$V = IZ$$

$$V = \sqrt{(V_R)^2 + (V_L - V_C)^2} \quad \text{เมื่อ} \quad V_L > V_C$$

$$IZ = \sqrt{(IR)^2 + (IX_L - IX_C)^2}$$

ในสมการสุดท้ายนั้นตัดกระแสไฟฟ้า I ออกได้หมด เหลือ

$$Z = \sqrt{(R)^2 + (X_L - X_C)^2} \qquad (19.11)$$

สมการสุดท้ายนี้ ทำให้สามารถเขียนแผนภาพแสดงเฟสได้ดังรูป 19.13 ค. ค่าของมุมเฟส ϕ อาจหาได้จากรูปคือ

จากรูป 19.13 ข. $\tan\phi = \dfrac{V_L - V_C}{V_R}$

จากรูป 19.13 ค. $\tan\phi = \dfrac{X_L - X_C}{R}$

ได้ค่าของ $\tan\phi$ เท่ากัน

อาจพิสูจน์ได้ว่า $\tan\phi = \dfrac{V_L - V_C}{V_R} = \dfrac{IX_L - IX_C}{IR} = \dfrac{X_L - X_C}{R}$

ตัวอย่าง 19.2 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับวงหนึ่งประกอบด้วย ตัวต้านทาน 600 โอห์ม ตัวเหนี่ยวนำขนาด 0.2 เฮนรี และตัวจุขนาด 1 ไมโครฟารัด ต่อกันอย่างอนุกรมเรียงกันไปตามลำดับ ดังรูป 19.14 กำหนดให้ ω = 1,000 เรเดียนต่อวินาที และมีกระแสไฟฟ้า 0.1 แอมแปร์ ให้หา

ก. ความต้านแห่งการเหนี่ยวนำและความต้านแห่งการจุ

ข. ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวจุแต่ละอัน

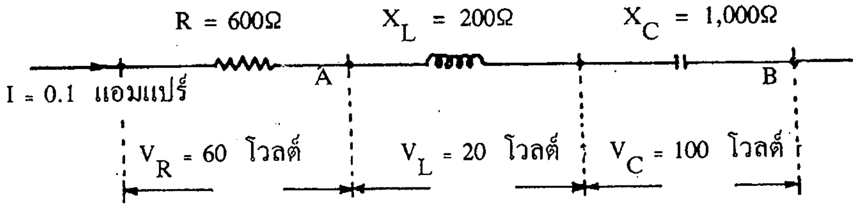
ค. ความต่างศักย์รวมทั้งหมด และมุมเฟส

วิธีทำ

ก. ความต้านแห่งการเหนี่ยวนำ $X_L = \omega L = 1{,}000 \times 0.2 = 200$ โอห์ม ความต้านแห่งการจุ

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{1{,}000(1 \times 10^{-6})} = 1{,}000 \text{ โอห์ม}$$

ข. R L และ C ต่ออนุกรมกันดังรูปมีหลักสำคัญว่า การต่ออนุกรมกันจะต้องมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเป็นอันเดียวกัน คือ 0.1 แอมแปร์ที่กำหนดให้มา



รูป 19.14 วงจรไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย R L และ C

ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวต้านทาน $V_R = IR = 0.1 \times 600$

$= 60$ โวลต์

ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวเหนี่ยวนำ $V_L = IX_L = 0.1 \times 200$

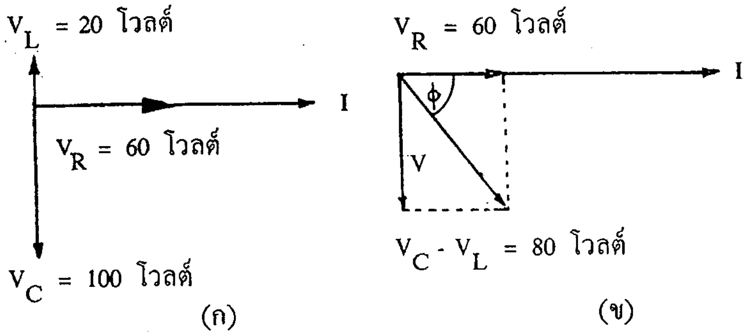
$= 20$ โวลต์

ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวจุ $V_C = IX_C = 0.1 \times 1{,}000$

$= 100$ โวลต์

ค. ได้กล่าวมาแล้วว่า V_R ทับกับ I V_L นำหน้า I เป็นมุม $\frac{\pi}{2}$ และ V_C ตามหลัง I เป็นมุม $\frac{\pi}{2}$

ดังนั้น เวกเตอร์ V_R V_L V_C และกระแสไฟฟ้า I จึงมีลักษณะดังแสดงในรูป 19.15 ก.



รูป 19.15 (ก) เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสของ V_R V_L V_C *และ*

(ข) เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสของ V *และ* I

เมื่อรวมเวกเตอร์ V_R V_L และ V_C เข้าด้วยกัน จะได้เป็นเวกเตอร์รวม V ดังแสดงในรูป ข.

$$V = \sqrt{(V_R)^2 + (V_C - V_L)^2} = \sqrt{(60)^2 + (80)^2} = 100 \text{ โวลต์}$$

มุมเฟส ϕ หาได้จากรูป ข. ดังนี้

$$\tan\phi = \frac{V_C - V_L}{V_R} = \frac{80}{60} = \frac{4}{3}$$

$$\phi = \tan^{-1}\left[\frac{4}{3}\right] \text{ หรือ } 53.13° \text{ นำ } V$$

โดยกระแสไฟฟ้า I นำหน้าความต่างศักย์รวม V เป็น $\phi = \tan^{-1}\left[\frac{4}{3}\right]$ จึงอาจเขียนสมการของความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าได้ดังนี้

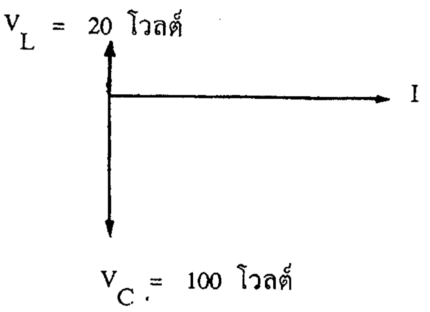
ความต่างศักย์ $v = V_m \sin 1{,}000\,t$

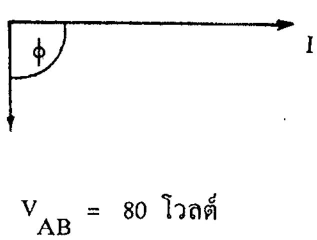
กระแสไฟฟ้า $i = I_m \sin\left(1{,}000\,t + \tan^{-1}\left[\frac{4}{3}\right]\right)$

โดยที่ $V_m = \sqrt{2}V = 1.414 \times 100 = 141.4$ โวลต์

และ $I_m = \sqrt{2}I = 1.414 \times 0.1 = 0.1414$ แอมแปร์

เพื่อความเข้าใจที่ดียิ่งขึ้น จะหาค่าความต่างศักย์รวมระหว่างจุด AB ในรูป 19.14 ระหว่างจุด A และจุด B ความต่างศักย์มีเพียง V_L และ V_C เท่านั้น ส่วน V_R ไม่





รูป 19.16 เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสของความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า

เกี่ยวข้อง ดังนั้น การหาค่า V_{AB} จึงคิดจาก V_L และ V_C เท่านั้น รูปเวกเตอร์แสดงเฟสจึงเป็นดังแสดงในรูป 19.16

$V_{AB} = V_C - V_L = 100 - 20 = 80$ โวลต์ และตามหลัง I เป็นมุม $\phi = \frac{\pi}{2}$ เรเดียน

ตัวอย่าง 19.3 ตัวต้านทานขนาด 40 โอห์ม ขดลวดเหนี่ยวนำขนาด 0.04 เฮนรี และตัวจุขนาด 40 ไมโครฟารัด ต่อกันอย่างอนุกรม และต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีความต่างศักย์ 220 โวลต์ และความถี่ตามมุม 500 เรเดียนต่อวินาที ให้หาค่าของกระแสไฟฟ้า มุมเฟสระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ทั้งหมด และความต่างศักย์ระหว่างปลายของแต่ละอัน

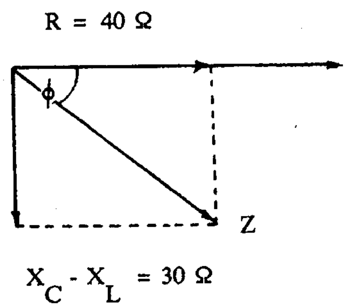
วิธีทำ $R = 40$ โอห์ม

$$X_L = \omega L = 500 \times 0.04 = 20 \text{ โอห์ม}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{500 \times (40 \times 10^{-6})} = 50 \text{ โอห์ม}$$

$$Z = \sqrt{(R^2) + (X_C - X_L)^2} = \sqrt{(40)^2 + (30)^2}$$

$$= 50 \text{ โอห์ม}$$



รูป 19.17 เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสของความขัดและกระแสไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้า $I = \frac{V}{Z} = \frac{220}{50} = 4.4$ แอมแปร์

$$\tan\phi = \frac{X_C - X_L}{R} = \frac{30}{40}, \quad \phi = \tan^{-1}\left[\frac{3}{4}\right], \text{ I นำ V}$$

$$V_R = IR = 4.4 \times 40 = 176 \text{ โวลต์}$$

$$V_L = IX_L = 4.4 \times 20 = 88 \text{ โวลต์}$$

$$V_C = IX_C = 4.4 \times 50 = 220 \text{ โวลต์}$$ *ตอบ*

หมายเหตุ ตรวจสอบคำตอบได้จาก

$$V = \sqrt{(V_R)^2 + (V_C - V_L)^2} = \sqrt{(176)^2 + (220 - 88)^2} = \sqrt{(176)^2 + (132)^2}$$

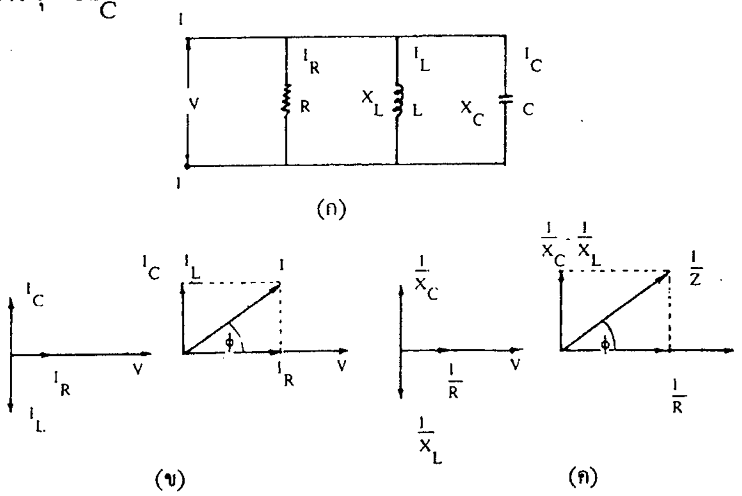
$= 220$ โวลต์ เป็นการถูกต้อง

19.6.2 การต่อ R L C แบบขนาน

ตัวต้านทาน R โอห์ม ตัวเหนี่ยวนำ L เฮนรี และตัวจุ C ฟารัด ต่อขนานกันดังรูป 19.18 ก. และต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับ

$$V = \text{ความต่างศักย์}$$

ตัวเหนี่ยวนำมีความต้านแห่งการเหนี่ยวนำ X_L
ตัวจุมีความต้านแห่งการจุ X_C



รูป 19.18 (ก) R L C *ต่อกันแบบขนาน (ข) เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ (ค) เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสของความต่างศักย์และส่วนกลับของ* R X_L X_C

R L และ C แต่ละตัวมีความต่างศักย์ V อันเดียวกัน

กระแสที่ผ่าน R $\quad I_R = \frac{V}{R}$ (ทับกับ V)

กระแสที่ผ่าน L $\quad I_L = \frac{V}{X_L}$ (ตาม V 90°)

กระแสที่ผ่าน C $\quad I_C = \frac{V}{X_C}$ (นำ V 90°)

ให้ $\quad Z =$ ความขัดของ R X_L และ X_C

กระแสรวม $\quad I = \frac{V}{Z}$

จากรูป ข. ได้

$$I = \sqrt{(I_R)^2 + (I_C - I_L)^2}$$

สมมติว่า I_C มากกว่า I_L

$$\tan\phi = \frac{I_C - I_L}{I_R}$$

แทนค่า $\quad \frac{V}{Z} = \sqrt{(\frac{V}{R})^2 + (\frac{V}{X_C} - \frac{V}{X_L})^2}$

เอา V ตัวร่วมออกได้ $\quad \frac{1}{Z} = \sqrt{(\frac{1}{R})^2 + (\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L})^2} \qquad (19.12)$

สมการสุดท้ายนี้เขียนเป็นรูปได้ดังแสดงในรูป ค.

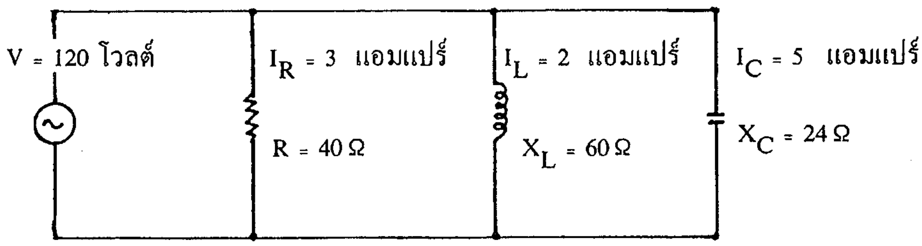
ตัวอย่าง 19.4 ตัวต้านทานขนาด 40 โอห์ม ตัวเหนี่ยวนำและตัวจุต่อกันอย่างขนานอยู่ระหว่างสองจุดซึ่งมีความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ 120 โวลต์ ความต้านแห่งการเหนี่ยวนำมีค่า 60 โอห์ม และความต้านแห่งการจุมีค่า 24 โอห์ม

ให้หา ก. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำและตัวจุ

ข. กระแสไฟฟ้ารวม

ค. เขียนกราฟเปรียบเทียบระหว่างกระแสไฟฟ้ารวมกับความต่างศักย์

วิธีทำ ก. รูป 19.19 แสดงภาพของวงจรตามโจทย์ เนื่องจากเป็นการต่อขนาน ดังนั้นตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวจุจึงต่างก็มีความต่างศักย์ 120 โวลต์ อันเดียวกัน



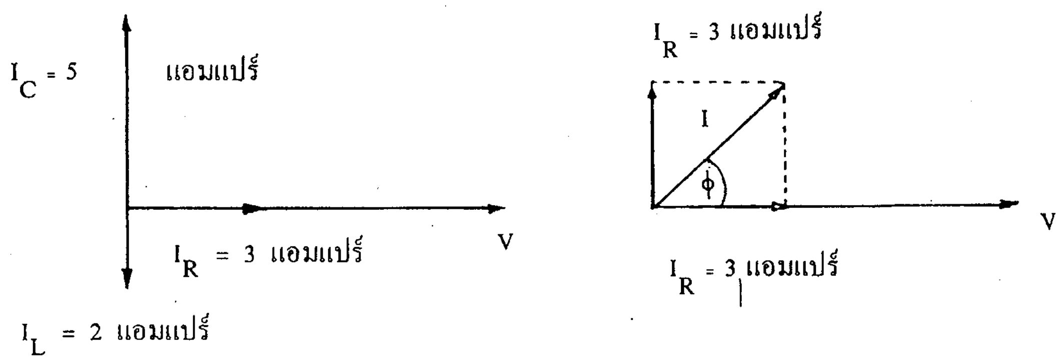
รูป 19.19 วงจรไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย R L C *ซึ่งต่อกันอย่างขนาน*

กระแสที่ผ่านตัวต้านทาน $I_R = \frac{V}{R} = \frac{120}{40} = 3$ แอมแปร์ มีเวกเตอร์ซ้อนกับ V

กระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ $I_L = \frac{V}{X_L} = \frac{120}{60} = 2$ แอมแปร์ มีเวกเตอร์

ตามหลัง V $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน

กระแสที่ผ่านตัวจุ $I_C = \frac{V}{X_C} = \frac{120}{24} = 5$ แอมแปร์ มีเวกเตอร์นำหน้า V $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน



รูป 19.20 เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสของความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ารวม

ข. ให้ I = กระแสไฟฟ้ารวมทั้งหมด กระแสรวม I นี้จะเป็นกระแสรวมของกระแส I_R I_L และ I_C โดยรวมแบบเวกเตอร์ ตามรูป 19.20

$$I = \sqrt{(I_R)^2 + (I_C - I_L)^2} = \sqrt{(3)^2 + (5-2)^2}$$

$$= 3\sqrt{2} \text{ แอมแปร์}$$

$$\tan\phi = \frac{I_C - I_L}{I_R} = 1$$

ดังนั้น $\phi = \frac{\pi}{4}$ เรเดียน $(= 45^\circ)$

ดังนั้น กระแสไฟฟ้ารวมมีค่า $3\sqrt{2}$ แอมแปร์

ค. จากรูป 19.20 จะเห็นว่า กระแสรวม I นำหน้าความต่างศักย์ V เป็นมุม $\phi = \frac{\pi}{4}$ เรเดียน จึงเขียนได้ว่า

$$v = V_m \sin \omega t$$

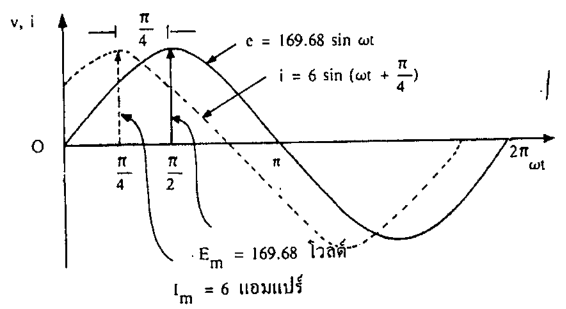
$$i = I_m \sin (\omega t + \frac{\pi}{4})$$

โดย $V_m = \sqrt{2}V = \sqrt{2} \times 120 = 169.68$ โวลต์

และ $I_m = \sqrt{2}I = \sqrt{2} \times 3\sqrt{2} = 6$ แอมแปร์

ดังนั้น สมการของความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ารวมจึงเป็น

$v = 169.68 \sin \omega t$ และ $i = 6 \sin (\omega t + \frac{\pi}{4})$ มีรูปของกราฟเปรียบเทียบกันดังแสดงในรูป 19.21

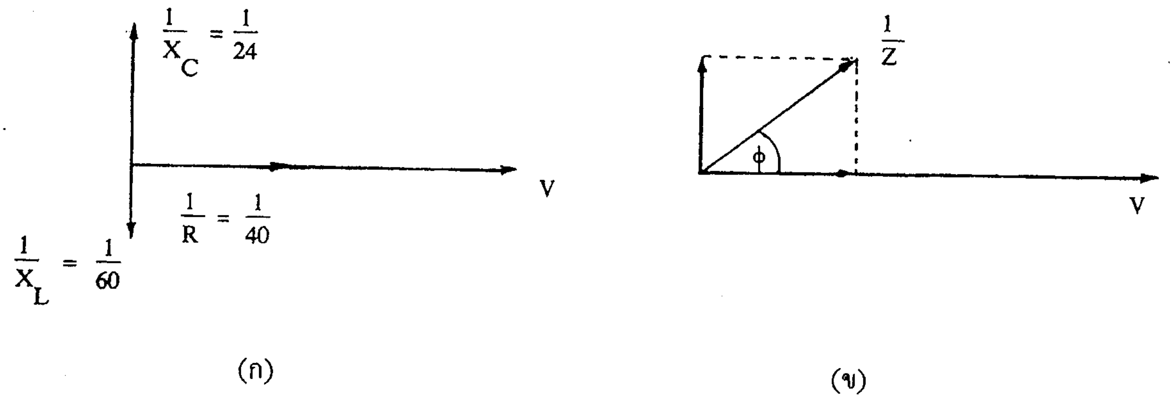


รูป 19.21 กราฟแสดงกระแสไฟฟ้านำหน้าความต่างศักย์

ในตัวอย่าง 19.4 ที่แสดง R L และ C ต่อขนานกันซึ่งทำมาแล้วนี้ ตอนข้อ ข. ที่ให้หากระแสไฟฟ้ารวม แทนที่จะหาจาก I_R I_L และ I_C รวมกันตามแบบเวกเตอร์อย่างที่ทำแล้วนั้น อาจทำได้อีกวิธีหนึ่ง โดยหาค่าความขัด Z แล้วหา I จาก $I = \frac{V}{Z}$ ดังนี้

หา Z จากรูปเวกเตอร์ที่แสดงไว้ในรูป 19.22 ($R = 40$ โอห์ม $X_L = 60$ โอห์ม $X_C = 24$ โอห์ม)

$$\frac{1}{Z} = \sqrt{\left(\frac{1}{40}\right)^2 + \left(\frac{1}{24} - \frac{1}{60}\right)^2} = \frac{\sqrt{2}}{40}$$



รูป 19.22 (ก) (ข) เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสของความต่างศักย์และส่วนกลับของ R, X_C, X_L

ความขัด $Z = \frac{40}{\sqrt{2}} = 20\sqrt{2}$ โอห์ม

กระแสไฟฟ้ารวม $I = \frac{V}{Z} = \frac{120}{20\sqrt{2}} = 3\sqrt{2}$ แอมแปร์

ตรงกับที่ทำมาแล้ว แสดงว่าเป็นการถูกต้องทั้งหมด

สรุปได้ว่า สำหรับ R L และ C ซึ่งต่ออนุกรมกัน $Z = \sqrt{(R)^2 + (X_L - X_C)^2}$ จะเขียน X_L กับ X_C สลับกันเป็น $Z = \sqrt{(R)^2 + (X_C - X_L)^2}$ ก็จะได้ค่าอันเดียวกัน เพราะการยกกำลังสองของ วงเล็บหลังทำให้มีเครื่องหมายเป็นบวกเสมอ

ทำนองเดียวกัน สำหรับ R L และ C ซึ่งต่อขนานกัน

สมการ $\frac{1}{Z} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2}$ ซึ่งก็อาจเขียนได้เป็น

$$\frac{1}{Z} = \sqrt{(\frac{1}{R})^2 + (\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C})^2}$$ ค่าของ Z จะออกมาเป็นอย่างเดียวกัน

สมการที่ควรจำได้เขียนเปรียบเทียบกันไว้อีก คือ

เมื่อต่ออนุกรม $$Z = \sqrt{(R)^2 + (X_L - X_C)^2}$$

เมื่อต่อขนาน $$\frac{1}{Z} = \sqrt{(\frac{1}{R})^2 + (\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C})^2}$$

ตัวอย่าง 19.5 ตัวต้านทานขนาด 2 โอห์มกับตัวเหนี่ยวนำอันหนึ่งต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งทำให้ตัวเหนี่ยวนำมีความต้านเป็น 4 โอห์ม ให้หาค่าความขัด เมื่อทั้งสองตัวนั้นต่อกันในแบบ

ก. อนุกรม ข. ขนาน

วิธีทำ ก. เมื่อต่ออนุกรมกัน

$$Z = \sqrt{(R)^2 + (X_L)^2}$$

$$= \sqrt{(2)^2 + (4)^2} = 2\sqrt{5}$$

$$= 4.47 \text{ โอห์ม}$$

ข. เมื่อต่อขนาน

$$\frac{1}{Z} = \sqrt{(\frac{1}{R})^2 + (\frac{1}{X_L})^2}$$

$$= \sqrt{(\frac{1}{2})^2 + (\frac{1}{4})^2} = \frac{\sqrt{5}}{4}$$

$$Z = \frac{4}{\sqrt{5}} = 1.79 \text{ โอห์ม}$$

19.6.3 การต่อ R L C แบบผสม

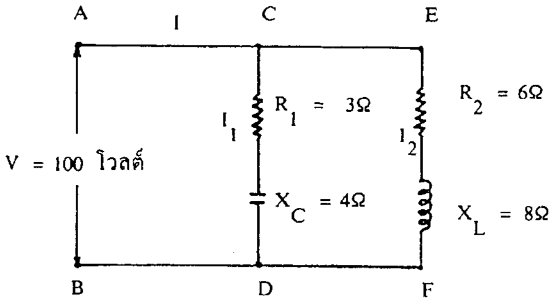
คำนวณโดยอาศัยหลักการต่อแบบอนุกรมและแบบขนานผสมกัน ดังวงจรไฟฟ้าในรูป 19.23 ตามตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง 19.6 ตัวต้านทาน R_1 = 3 โอห์ม R_2 = 6 โอห์ม ตัวจุและตัวเหนี่ยวนำ ต่อแบบผสมกันดังแสดงในรูป 19.23 ปลาย AB ต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีความต่างศักย์ 100 โวลต์ ทำให้ตัวจุมี X_C = 4 โอห์ม และตัวเหนี่ยวนำมี X_L = 8 โอห์ม ให้หาค่าของ

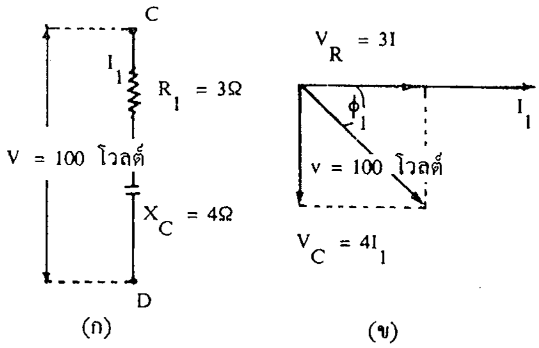
ก. กระแสไฟฟ้า I_1, I_2 และกระแสรวม I

ข. มุมเฟสระหว่างกระแสไฟฟ้ารวม I กับ ความต่างศักย์ 100 โวลต์

ค. ความขัดระหว่างจุด AB



รูป 19.23 วงจรไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย R L C ต่อกันแบบผสม



รูป 19.24 (ก) แสดงส่วนหนึ่งของวงจรไฟฟ้า (ข) เวกเตอร์แสดงความต่างเฟส

วิธีทำ ก. *คิดสาย CD* ซึ่งมี R_1 และ X_C ต่ออนุกรมกัน คิดแบบอนุกรมจากรูป 19.24 ได้

$$V = \sqrt{(V_R)^2 + (V_C)^2}$$

แทนค่า

$$100 = \sqrt{(3I_1)^2 + (4I_1)^2}$$

$$= I_1 \times 5$$

$$I_1 = \frac{100}{5} = 20 \text{ แอมแปร์}$$

(นำ V เป็นมุม ϕ_1)

$$\sin\phi_1 = \frac{4I_1}{V} = \frac{4 \times 20}{100} = 0.8$$

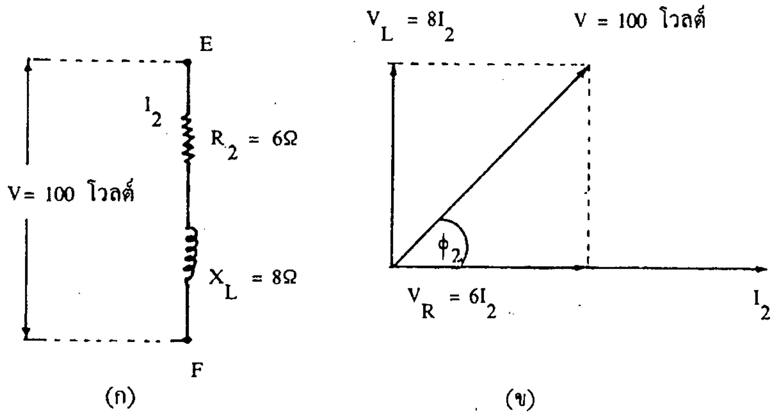
$$\cos\phi_1 = \frac{3I_1}{V} = \frac{3 \times 20}{100} = 0.6$$

คิดสาย EF ซึ่งมี R_2 และ X_L ต่ออนุกรมกัน จากรูป 19.25 ได้

$$V = \sqrt{(V_R)^2 + (V_L)^2}$$

แทนค่า $$100 = \sqrt{(6I_2)^2 + (8I_2)^2}$$

$$= I_2 \times 10$$



รูป 19.25 (ก) แสดงส่วนหนึ่งของวงจรไฟฟ้า
(ข) เวกเตอร์แสดงความต่างเฟส

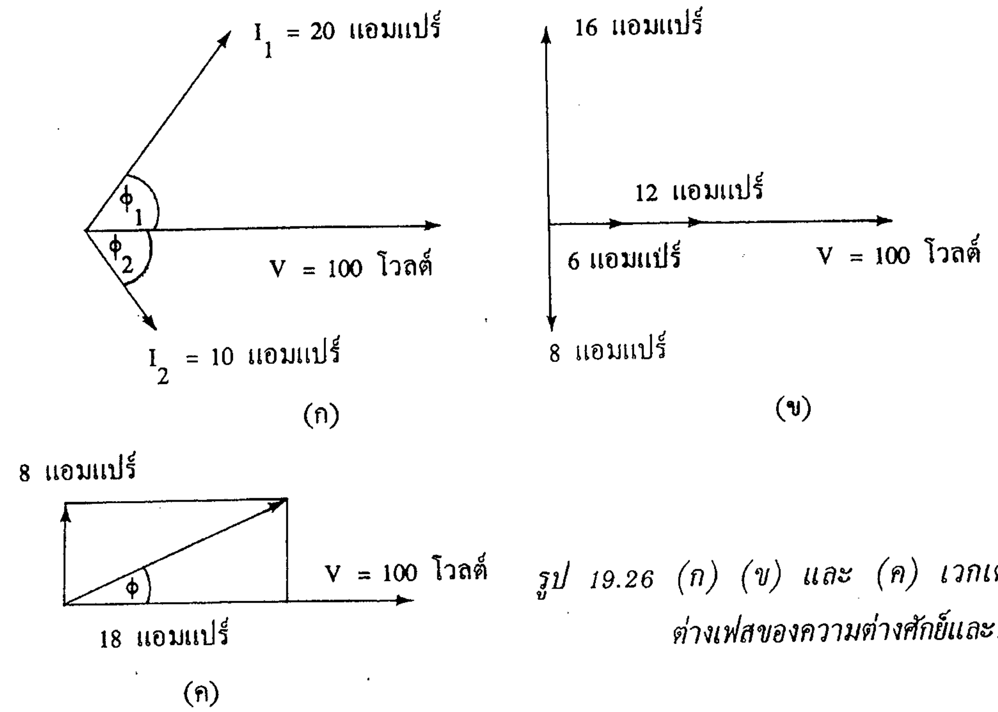
ดังนั้น $$I_2 = \frac{100}{10} = 10 \text{ แอมแปร์ (ตาม V เป็นมุม } \phi_2)$$

$$\sin \phi_2 = \frac{8I_2}{V} = \frac{8 \times 10}{100} = 0.8$$

$$\cos \phi_2 = \frac{6I_2}{V} = \frac{6 \times 10}{100} = 0.6$$

คิดรวมสาย CD ซึ่งมีกระแส $I_1 = 20$ แอมแปร์ กับสาย EF ซึ่งมีกระแส $I_2 = 10$ แอมแปร์ ต่อขนานกัน ทั้งสองสายนี้มีความต่างศักย์ V = 100 โวลต์ร่วมกัน ดังนั้น นำเวกเตอร์ $I_1 = 20$ แอมแปร์ เวกเตอร์ $I_2 = 10$ แอมแปร์ และความต่างศักย์ V = 100 โวลต์ มาเขียนเป็นเวกเตอร์รวมกัน จะได้ดังแสดงในรูป 19.26

ส่วนประกอบของ I_1 ไปในแกนตั้ง $I_1 \sin \phi_1 = 20 \times 0.8 = 16$ แอมแปร์



รูป 19.26 (ก) (ข) และ (ค) เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสของความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า

ส่วนประกอบของ I_1 ไปในแกนนอน $I_1 \cos \phi_1 = 20 \times 0.6 = 12$ แอมแปร์

ส่วนประกอบ I_2 ไปในแกนตั้ง $I_2 \sin \phi_2 = 10 \times 0.8 = 8$ แอมแปร์

ส่วนประกอบของ I_2 ไปในแกนนอน $I_2 \cos \phi_2 = 10 \times 0.6 = 6$ แอมแปร์

กระแสรวมในแกนตั้ง $= 16 - 8 = 8$ แอมแปร์

กระแสรวมในแกนนอน $= 12 + 6 = 18$ แอมแปร์

กระแสรวม $I = \sqrt{(8)^2 + (18)^2} = 19.7$

ข. $\tan \phi = \frac{8}{18} = \frac{4}{9}$

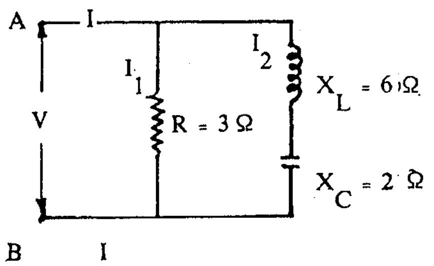
ดังนั้น $\phi = \tan^{-1}\left[\frac{4}{9}\right]$ (I นำหน้า V)

ค. จาก $V = IZ$

แทนค่าได้ $100 = 19.7\,Z$

ดังนั้น ความขัดระหว่างจุด AB $= Z = \frac{100}{19.7} = 5.03$ โอห์ม *ตอบ*

ตัวอย่าง 19.7 ตัวต้านทานขนาด 3 โอห์ม ตัวเหนี่ยวนำและตัวจุต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับดังรูป 19.27 ทำให้ $X_L = 6$ โอห์ม และ $X_C = 2$ โอห์ม จงหาค่าของความขัดระหว่างจุด AB



รูป 19.27 วงจรไฟฟ้าต่อกันแบบผสม

วิธีทำ

ให้ I_1 = กระแสในสายที่มี R

I_2 = กระแสในสายที่มี L และ C

I = กระแสรวม

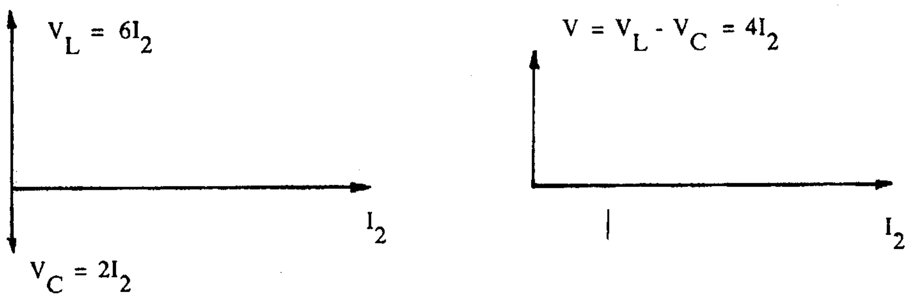
V = ความต่างศักย์ระหว่างจุด

คิดสายที่มี R $\quad I_1 = \frac{V}{R} = \frac{V}{3}$ (ทับกับ V)

คิดสายที่มี L และ C

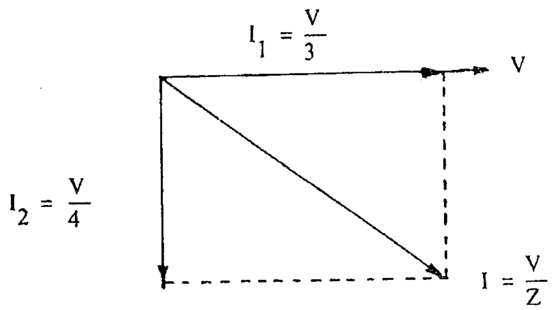
$$V = V_L - V_C = 6\,I_2 - 2\,I_2 = 4\,I_2$$

$I_2 = \frac{V}{4}$ (ตามหลัง V เป็นมุม $\frac{\pi}{2}$ ดูรูป 19.28)



รูป 19.28 เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์

คิดรวมหมดทั้งสองสายมี V เป็นแกนร่วมของ I_1 และ I_2 ดังรูป 19.29



รูป 19.29 เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสของกระแสรวมและความต่างศักย์

$$I = \sqrt{(I_1)^2 + (I_2)^2}$$

$$I = \frac{V}{Z}$$

$$\frac{V}{Z} = \sqrt{\left(\frac{V}{3}\right)^2 + \left(\frac{V}{4}\right)^2} = V\sqrt{\frac{1}{9} + \frac{1}{16}} = \frac{5}{12}V$$

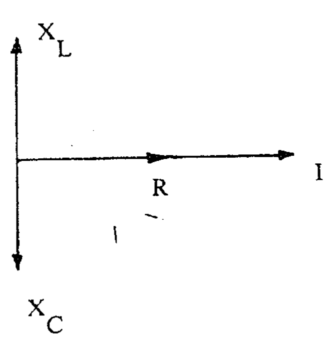
ดังนั้น ความขัด $Z = \frac{12}{5} = 2.4$ โอห์ม *ตอบ*

19.7 อภินาทในวงจรไฟฟ้า

โดยทั่วไปแล้ว อภินาท (resonance) บอกถึงปรากฏการณ์ที่มีการเสริมกันหรือแม้แต่ขัดกัน ที่มีผลมากที่สุดสำหรับภาวะหนึ่ง ๆ เมื่อเทียบกับภาวะข้างเคียง ดังรายละเอียดบางส่วนได้กล่าวมาแล้ว และที่จะกล่าวต่อไปอีกในส่วนที่เป็นฟิสิกส์ยุคใหม่ สำหรับในวงจรไฟฟ้าในส่วนนี้จะแบ่งการพิจารณาเป็นอย่าง ๆ ไป

19.7.1 อภินาทในวงจร R L C ที่ต่ออนุกรม

เมื่อ R L และ C ต่ออนุกรมกัน และต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับ เวกเตอร์ของ R X_L และ



รูป 19.30 เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสของ R X_L X_C และ I

X_C มีดังแสดงในรูป 19.30 ความขัด Z ของสิ่งทั้งสามนี้ คือ เวกเตอร์รวมของเวกเตอร์ R X_L และ X_C ซึ่งมีค่า ดังนี้

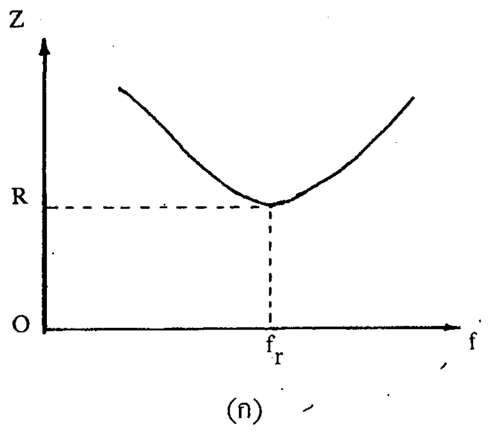
$$Z = \sqrt{(R)^2 + (X_L - X_C)^2}$$

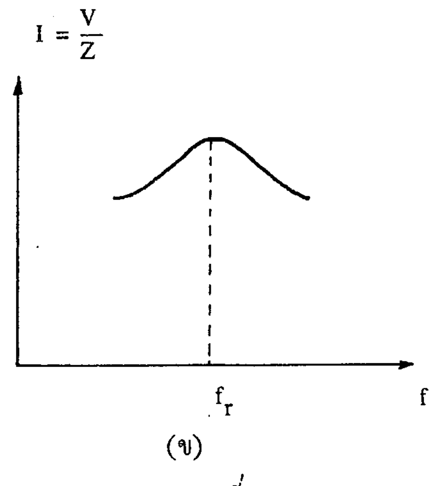
โดยที่

$$X_L = \omega L = 2\pi fL$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$$

ในกรณีที่ R L และ C ต่ออนุกรมกัน และต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งมีความต่างศักย์ V คงที่ แต่ความถี่เปลี่ยนค่าได้ การเปลี่ยนความถี่ย่อมทำให้ค่าของ X_L และ X_C เปลี่ยนตามไป ส่วนค่า R ไม่แปรตามความถี่ ดังนั้น ค่าของ Z ก็จะเปลี่ยนตามไปด้วย กระแสไฟฟ้า I ที่ไหลผ่าน R L C ก็จะเปลี่ยนตามไปเช่นกัน เพราะการเปลี่ยนค่าของ Z และ I ตามความถี่ f มีแสดงในรูป 19.31 เมื่อ f มีค่าต่ำ Z มีค่ามาก I มีค่าน้อย เมื่อ f มีค่ามากขึ้น และ Z มีค่าน้อยลง I มีค่ามากขึ้นที่ความถี่อันหนึ่ง คือ f_r ในรูป Z มีค่าน้อยที่สุด ตอนนี้กระแส I มีค่ามากที่สุด เมื่อ f มีค่ามากกว่า f_r Z กลับมีค่ามากขึ้น และ I กลับลดลงดังแสดงในรูป 19.31ข. ที่ความถี่ f_r ซึ่ง Z มีค่าน้อยที่สุด และ I มีค่ามากที่สุดนี้ เรียกว่า *เกิดอภินาท (resonance)* ขึ้นในวงจรไฟฟ้านั้น และ f_r เรียกว่า *ความถี่อภินาท (resonance frequency)* พิจารณาจาก $Z = \sqrt{(R)^2 + (X_L - X_C)^2}$ จะเห็นว่า ขณะที่เกิดอภินาทนั้น Z จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อ





รูป 19.31 (ก) กราฟแสดงการเปลี่ยนค่าของความขัดกับความถี่
(ข) กราฟแสดงการเปลี่ยนค่าของกระแสกับความถี่

$$X_L = X_C \tag{19.13}$$

หรือ $Z = R$

เขียนได้ว่า $\omega_r L = \frac{1}{\omega_r C}$

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

หรือ $$f_r = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}} \tag{19.14}$$

โดย L เป็นเฮนรี

C เป็นฟารัด

ω_r เป็นเรเดียนต่อวินาที

f_r เป็นเฮิร์ทซ์

ตัวอย่าง 19.8 ตัวจุขนาด $6\frac{2}{3}$ ไมโครฟารัดต่อเป็นอนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำ และต่อกับเครื่องทำไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า 1.2 โวลต์คงที่ แต่ความถี่เปลี่ยนค่าได้ เมื่อความถี่มีค่า 5×10^4 เรเดียนต่อวินาที กระแสไฟฟ้ามีค่าสูงที่สุดซึ่งเท่ากับ 0.2 แอมแปร์

ก. จงหาค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำนั้น

ข. จงหาค่าของกระแสไฟฟ้า เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่า

วิธีทำ สิ่งแรกที่จะต้องเข้าใจในโจทย์ข้อนี้ก็คือ ขดลวดเหนี่ยวนำนั้นทำจากเส้นลวด โดยนำเส้นลวดมาขดเป็นวงเรียงกันไป ตามลำดับ ภายในเนื้อของเส้นลวดนั้นย่อมมีความต้านทานได้ ความต้านทานภายในเนื้อเส้นลวดของขดลวดเหนี่ยวนำนั้น จึงต่อเป็นแบบอนุกรมกับความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำนั้น

ดังนั้น ในโจทย์ข้อนี้ จึงมี R L และ C ต่อกันในแบบอนุกรมตามโจทย์ กระแสมากที่สุด $I = 0.2$ แอมแปร์ เกิดตอนอภินาท ดังนั้น $\omega_r = 5 \times 10^4$ เรเดียนต่อวินาที

ก. ขณะเกิดอภินาท

$$Z = R$$

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{R}$$

แทนค่าได้ $0.2 = \frac{1.2}{R}$

ความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ $R = 6$ โอห์ม

จาก $\omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC}}$

แทนค่า $5 \times 10^4 = \sqrt{\frac{1}{L \times \frac{20}{3} \times 10^{-6}}}$

ดังนั้น ความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำนั้น $L = 6 \times 10^{-5}$ เฮนรี *ตอบ*

ข. เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่า

$$\omega = 3\omega_r = 3 \times 5 \times 10^4 = 15 \times 10^4 \text{ เรเดียนต่อวินาที}$$

$$X_L = \omega L = (15 \times 10^4)(6 \times 10^{-5}) = 9 \text{ โอห์ม}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{(15 \times 10^4) \times (\frac{20}{3} \times 10^{-6})} = 1 \text{ โอห์ม}$$

ความขัดใหม่ $Z = \sqrt{(R)^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(6)^2 + (9 - 1)^2} = 10$ โอห์ม

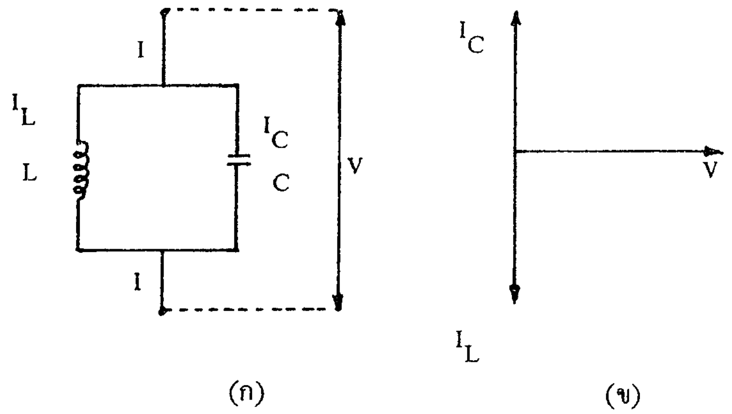
กระแสไฟฟ้าใหม่ $I = \frac{V}{Z} = \frac{1.2}{10} = 0.12$ แอมแปร์ *ตอบ*

19.7.2 อภินาทในวงจร L C ที่ต่อขนาน

ตัวเหนี่ยวนำกับตัวจุซึ่งต่อขนานกันอยู่ และต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีความต่างศักย์เป็น V ดังแสดงในรูป อาจเกิดอภินาทขึ้นได้ ภาวะของการเกิดอภินาทแบบนี้คือ กระแสไฟฟ้า I_L กับ I_C มีค่าเท่ากันคือ

$I_L = I_C$ ดังนั้น $I = 0$

หรือ $\frac{V}{X_L} = \frac{V}{X_C}$



รูป 19.32 (ก) L C *ต่อกันอย่างขนาน*
(ข) *เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์*

ได้ $$X_L = X_C$$

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

ดังนั้น $$\omega_r = 2\pi f_r = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

สมการที่ได้จะเหมือนกับแบบต่ออนุกรมที่ได้กล่าวมาแล้ว ขณะที่เกิดอภินาทแบบขนานนี้ กระแสไฟฟ้ารวม $I = I_C - I_L = 0$ ซึ่งตรงข้ามกับแบบอนุกรมเพราะได้กระแสน้อยที่สุด

19.8 กำลังของไฟฟ้ากระแสสลับ

กำลังของไฟฟ้ากระแสสลับในขณะใด ๆ มีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้าในขณะนั้น ๆ

ถ้า v = ความต่างศักย์ในขณะใด = $V_m \sin \theta$

i = กระแสไฟฟ้าในขณะนั้น = $I_m \sin(\theta + \phi)$

p = กำลังในขณะใด (instantaneous power)

จึงได้ $$p = vi$$

$$= \left[V_m \sin\theta\right]\left[I_m \sin(\theta+\phi)\right]$$

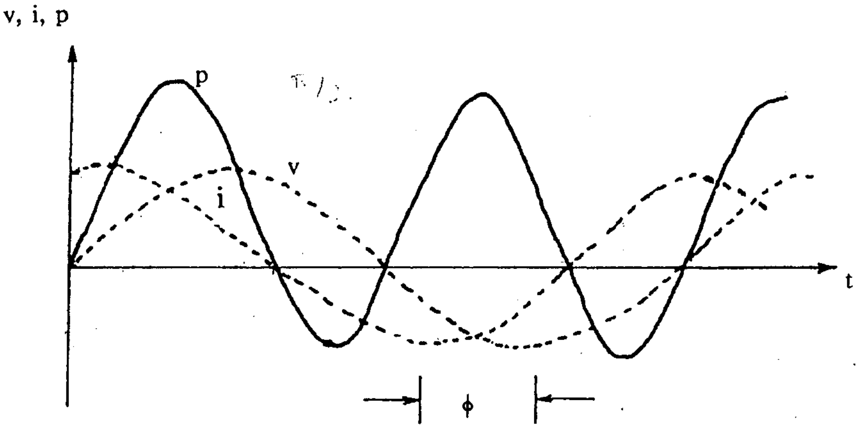
$$= \frac{1}{2} V_m I_m \left[\cos\phi - \cos(2\theta+\phi)\right]$$

[เพราะ $2 \sin A \sin B = \cos(B - A) - \cos(B + A)$]

เนื่องจาก $\frac{1}{2} V_m I_m \quad = \quad \frac{V_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad = \quad VI$

ดังนั้น

$$p \quad = \quad VI \left[\cos \phi - \cos (2\theta + \phi) \right]$$



รูป 19.33 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ v, i, p *กับเวลา*

ในรูป 19.33 แสดงกราฟของ v i และ p โดย p = vi จะเห็นได้ว่า กำลังจะมีค่าไม่คงที่ เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ตามเวลา t

กำลังที่ใช้ไปจริง ๆ ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับนั้นจะเป็นกำลังเฉลี่ย (average power) ซึ่งหาได้โดยหาค่าเฉลี่ยดังนี้

ถ้า $P \quad = \quad$ กำลังเฉลี่ย

$$P \quad = \quad \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{2\pi} p d\theta$$ เมื่อคิดเฉลี่ยจาก 1 รอบ

แทนค่ากำลัง p จากที่ทำมาแล้วจะได้

เนื่องจาก $\int \cos(2\theta+\phi)\, d\theta \quad = \quad \frac{1}{2}\int \cos(2\theta+\phi)\, d(2\theta+\phi)$

$$= \frac{1}{2}\sin(2\theta+\phi)$$

จะได้ $\quad P \quad = \quad \frac{VI}{2\pi}\left\{\cos\phi\,[\theta]_o^{2\pi} - \frac{1}{2}\sin\left[\,2\theta+\phi\,\right]_o^{2\pi}\right\}$

$$= \frac{VI}{2\pi}\,(2\pi\cos\phi)$$

$$= VI\cos\phi$$

ดังนั้น $\quad P \quad = \quad VI\cos\phi \qquad (19.15)$

กำลังเฉลี่ย P นี้มีชื่อเรียกกันเป็นอีกอย่างหนึ่งว่า *กำลังกัมมันต์ (active power)* และต่อไปนี้ เมื่อพูดถึงกำลังในไฟฟ้ากระแสสลับ เราจะหมายถึงกำลังเฉลี่ย P นี้เสมอ ในสูตรนี้

V = ค่ายังผลของแรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือความต่างศักย์

I = ค่ายังผลของกระแสไฟฟ้า

ϕ = มุมเฟส

สำหรับ VI จะเรียกว่า *กำลังปรากฏ (apparent power)* และค่าของ $\cos\phi$ มีชื่อเรียกว่า *ตัวประกอบกำลัง (power factor)* เพราะเป็นตัวคูณ VI ซึ่งจะทำให้กำลัง P มีค่ามากก็ได้ น้อยก็ได้ ตัวประกอบกำลังนี้มีค่าจาก 0 ถึง 1 ($\cos 90^\circ = 0$ และ $\cos 0^\circ = 1$) ดังนั้น สำหรับ VI ค่าหนึ่ง ๆ ถ้า $\phi = 90^\circ$(ในกรณีที่วงจรเป็นชนิดเหนี่ยวนำล้วน หรือชนิดจุล้วน) กำลัง P จะเท่ากับศูนย์ ถ้า $\phi = 0^\circ$ กำลังไฟฟ้าที่ใช้จะมีค่ามากที่สุด (เท่ากับ VI)

สำหรับตัวจุมี $\phi = 90^\circ$ ดังนั้น กำลังไฟฟ้าที่มันใช้

$$P \quad = \quad VI\cos 90^\circ \quad = \quad 0$$

ตัวเหนี่ยวนำซึ่งไม่มีความต้านทานเลย $\phi = 90^\circ$ กำลังไฟฟ้าที่ใช้

$$P = VI \cos 90^\circ = 0$$

สำหรับตัวต้านทาน (R) มี $\phi = 0$ จะใช้กำลังไฟฟ้า

$$P = VI \cos 0 = VI$$

จึงสรุปได้ว่า ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมี R L และ C ต่อกันอยู่ ไม่ว่าจะต่อกันในแบบใด กำลังไฟฟ้าจะใช้ที่ R เท่านั้น ดังนั้น เมื่อจะคิดกำลัง ก็คิดเฉพาะที่ R เท่านั้นเอง คือ

$$P = VI \cos \phi = VI \cos 0 = VI$$

$$= (IR)I = I^2R$$

หรือ

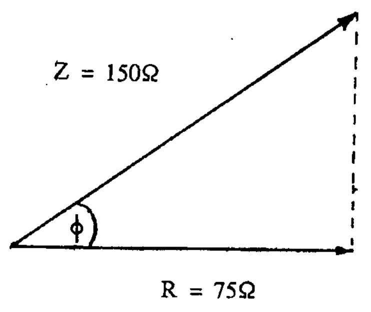
$$= V\left(\frac{V}{R}\right) = \frac{V^2}{R}$$

ดูตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง 19.9 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับประกอบด้วย R L และ C ต่ออนุกรมกันอยู่ระหว่างสองจุดซึ่งมีความต่างศักย์ 120 โวลต์ วงจรนี้มีความต้านทาน 75 โอห์ม และความขัด 150 โอห์ม ให้หากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในวงจรนี้

วิธีทำ

วิธีที่ 1 ทำแบบคิดรวม เนื่องจากเป็นวงจรต่ออนุกรม จึงมีเวกเตอร์ของ R และ Z ดังรูป 19.34



รูป 19.34 เวกเตอร์แสดงความต่างเฟส

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{120}{150} = \frac{4}{5} = 0.8 \text{ แอมแปร์}$$

กำลังที่ใช้ $\quad P = VI \cos \phi$

$$= \quad 120 \times 0.8 \times \frac{75}{150}$$

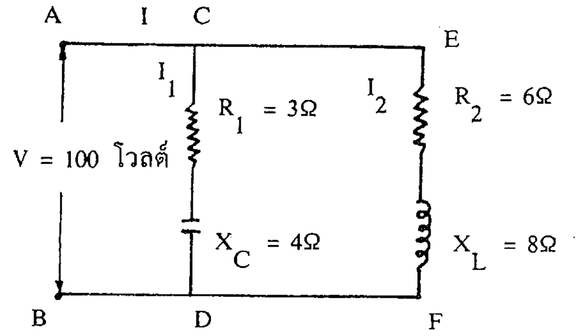
$$= \quad 48 \text{ วัตต์}$$

วิธีที่ 2 คิดเฉพาะที่ R เท่านั้น เพราะกำลังไฟฟ้าถูกใช้ที่ R เพียงอย่างเดียว

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ $P = I^2R = (0.8)^2 \times 75 = 48$ วัตต์ *ตอบ*

ตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นว่า การคิดกำลังจากความต้านทานอย่างที่ทำในวิธีที่ 2 สะดวกกว่าคิดรวมอย่างที่ทำในวิธีที่ 1 แม้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มี R L และ C ต่อกันในแบบผสม การคิดหากำลังไฟฟ้าก็อาจทำได้โดยแยกคิดเฉพาะที่ R ส่วนที่ L และ C นั้นไม่ใช้กำลัง ถ้ามี R หลายตัว ก็คิดหากำลังจาก R แต่ละตัวโดยเฉพาะ แล้วนำมารวมกันเป็นกำลังไฟฟ้ารวมที่ใช้ทั้งหมด ดูตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง 19.10 ตัวต้านทาน $R_1 = 3$ โอห์ม $R_2 = 6$ โอห์ม ตัวจุและตัวเหนี่ยวนำต่อกันในแบบผสมดังแสดงในรูป 19.35 ปลาย AB ต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีความต่างศักย์ 100 โวลต์ ทำให้ตัวจุมี $X_C = 4$ โอห์ม และตัวเหนี่ยวนำมี $X_L = 8$ โอห์ม ให้หาค่าของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด



รูป 19.35 วงจรไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย R L *และ* C

วิธีทำ โจทย์นี้ได้ทำมาแล้วในตัวอย่างของการต่อ R L และ C แบบผสม ผิดกันแต่ที่ในตอนนั้นให้หาค่าของกระแสไฟฟ้าและมุมเฟสเท่านั้น แต่ในตอนนี้จะหากำลังไฟฟ้า

วิธีที่ 1 ทำโดยคิดรวมทั้งหมดโดยพิจารณาจากกำลังที่ใช้ทั้งหมด $P = VI \cos \phi$ ใช้ค่าของกระแสไฟฟ้ารวม I และ ϕ ที่ทำไว้แล้วในตอนต้นนั้นซึ่งได้

กระแสรวม $I = 19.7$ แอมแปร์

$$\cos \phi = \frac{18}{I} = \frac{18}{19.7} \quad \text{(จากรูป 19.26)}$$

กำลังที่ใช้ทั้งหมด $P = VI\cos\phi = 100 \times 19.7 \times \frac{18}{19.7} = 1,800$ วัตต์

วิธีนี้ถ้าทำจากเริ่มต้นทุกอย่างโดยไม่ยกตัวเลขมาอ้างแบบนี้ จะยาวมาก

วิธีที่ 2 คิดในสาย CD มี $R_1 = 3$ โอห์ม และ $X_C = 4$ โอห์ม ต่ออนุกรมกัน

ความขัดของสายนี้ $Z_1 = \sqrt{(3)^2 + (4)^2} = 5$ โอห์ม

กระแสไฟฟ้าในสายนี้ $I_1 = \frac{V}{Z_1} = \frac{100}{5} = 20$ แอมแปร์

กำลังซึ่งใช้ที่ R_1 คือ $P_1 = I_1^2 R_1 = (20)^2 \times 3 = 1,200$ วัตต์

คิดในสาย EF มี $R_2 = 6$ โอห์ม และ $X_L = 8$ โอห์ม ต่ออนุกรมกัน ดังนั้น

ความขัดของสายนี้ $Z_2 = \sqrt{(6)^2 + (8)^2} = 10$ โอห์ม

กระแสไฟฟ้าในสายนี้ $I_2 = \frac{V}{Z_2} = \frac{100}{10} = 10$ แอมแปร์

กำลังซึ่งใช้ที่ R_2 คือ $P_2 = I_2^2 R_2 = (10)^2 \times 6 = 600$ วัตต์

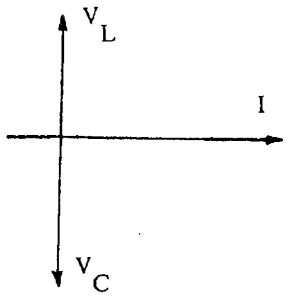
กำลังซึ่งใช้ที่ $X_L = V_2 I_2 \cos 90^\circ = 0$

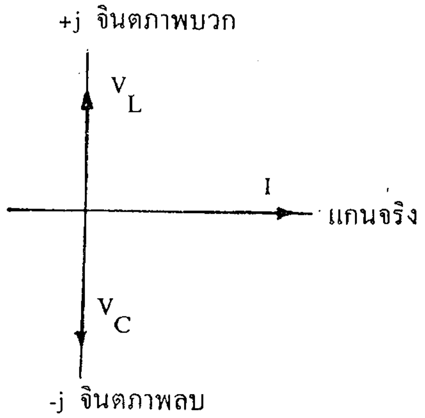
ดังนั้น กำลังไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด $= P_1 + 0 + P_2 + 0 = 1,200 + 600$

$= 1,800$ วัตต์ *ตอบ*

19.9 การใช้ปริมาณเชิงซ้อนในไฟฟ้ากระแสสลับ

ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์และกระแสในตัวเหนี่ยวนำและตัวจุมีความต่างเฟสกันอยู่ 90° เมื่อนำค่าเหล่านี้มาเขียนเป็นแผนภาพแสดงเฟส (phasor diagram) จะได้ทิศดังแสดงในแผนภาพ รูปที่ 19.36 จะเห็นว่าถ้าเขียน I ซึ่งเป็นกระแสผ่านวงจรให้อยู่ในแนวแกน X ความต่างศักย์ V_L จะอยู่ในแนว





รูป 19.36 แผนภาพแสดงเฟส

รูป 19.37 แผนภาพแสดง I V_L และ V_C ในระนาบเชิงซ้อน

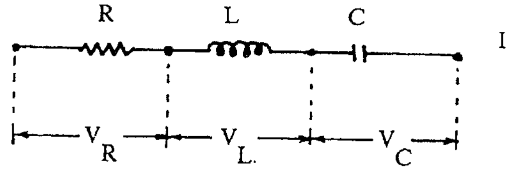
แกน +Y และความต่างศักย์บนตัวจุ V_C จะอยู่ตามแนวแกน -Y ทิศของ V_L และ V_C จะมีทิศเป็นอย่างอื่นไม่ได้ ถ้า I อยู่ในแนว +X

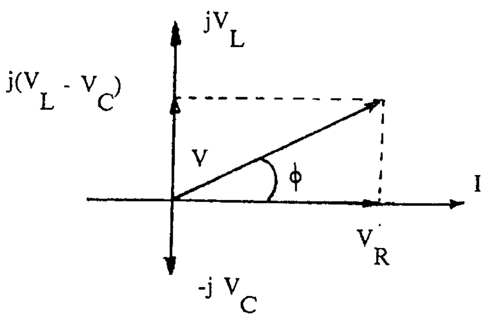
ด้วยลักษณะสำคัญนี้ จึงได้นำหลักของจำนวนเชิงซ้อน (complex number) มาใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ โดยให้กระแสอยู่ตามแกนจริง (real axis) และ V_L อยู่ในแนวแกนจินตภาพบวก (imaginary axis) คือ +j และ V_C อยู่ในแนวแกนจินตภาพลบคือ -j ดังรูปที่ 19.37

การหาขนาดและเฟสจะหาได้ตามวิธีของเลขเชิงซ้อน เพื่อให้ทราบว่า V_L และ V_C มีทิศเป็น +j และ -j ตามลำดับ จึงต้องกำกับด้วย +j และ -j ไว้ด้วยในการคำนวณ

19.9.1 วงจร R L C ต่อแบบอนุกรม

เมื่อมีกระแส I ผ่านวงจร จะเกิดความต่างศักย์เป็น V_R V_L และ V_C บนตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวจุ ตามลำดับ ดังรูป 19.38 เมื่อเทียบค่า $V_{รวม}$ ของวงจรทั้งหมดตามหลักของจำนวนเชิงซ้อน จะได้ความต่างศักย์รวม





รูป 19.38 ความต่างศักย์บนวงจรอนุกรม

รูป 19.39 แผนภาพแสดงเฟสในระนาบเชิงซ้อน

$$V = V_R + jV_L - jV_C \tag{19.16}$$

หรือ
$$V = V_R + j(V_L - V_C) \tag{19.17}$$

ให้สังเกตด้วยว่า V_R เป็นจำนวนจริง เพราะ V_R กับ I มีเฟสเดียวกัน เขียนแผนภาพแสดงเฟสของสมการ (19.16) และ (19.17) ในระนาบเชิงซ้อน (complex plane) จะได้ดังรูป 19.39

ขนาดของรูป V จะเท่ากับกรณฑ์ที่สองของผลบวกของกำลังของส่วนจริงและส่วนจินตภาพคือ

$$|V| = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2} \tag{19.18}$$

เฟส (ϕ) ของ V เทียบกับแกนจริงตามสมการ (20.17) จะได้

$$\phi = \tan^{-1}\left[\frac{\text{ส่วนจินตภาพ (imaginary part)}}{\text{ส่วนจริง (real part)}}\right]$$

นั่นคือ
$$\phi = \tan^{-1}\left[\frac{(V_L - V_C)}{V_R}\right] \tag{19.19}$$

ให้สังเกตด้วยว่า ϕ เป็นบวกเมื่อ $V_L > V_C$ และ ϕ เป็นลบเมื่อ $V_L < V_C$ ค่าของ ϕ มีตั้งแต่ $+90^\circ$ ถึง -90°

ตัวอย่าง 19.11 จงหาขนาดและเฟสของความต่างศักย์รวมของวงจรอนุกรมของตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวจุ เมื่อ $R = 2\Omega$, $X_L = 3\Omega$ และ $X_C = 4\Omega$ โดยมีกระแสไฟฟ้าในวงจร 1 แอมแปร์

วิธีทำ
$$V_R = 2 \times 1 = 2 \text{ โวลต์}$$

$$V_L = 3 \times 1 = 3 \text{ โวลต์}$$

$$V_C = 4 \times 1 = 4 \text{ โวลต์}$$

จาก
$$V = V_R + j(V_L - V_C)$$

แทนค่า V_R V_L และ V_C จะได้

$$V = 2 + j(3 - 4) = (2 - j) \text{ โวลต์}$$

หาขนาดได้คือ $|V| = \sqrt{2^2 + 1^2} = \sqrt{5}$ โวลต์

เฟสของ V เมื่อเทียบกับแกนจริง

$$\phi = \tan^{-1}\left[-\frac{1}{2}\right]$$

$$= -26.5^{\circ}$$

นั่นคือ V มีเฟสตามหลัง I หรือ V_R เป็นมุม 26.5° *ตอบ*

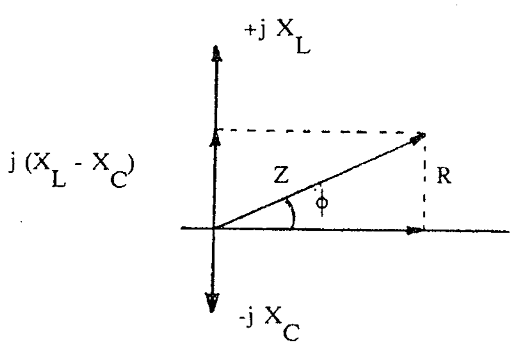
เนื่องจากกระแส I ผ่านวงจรอนุกรมของ R L C ความต่างศักย์บน R L C จะคำนวณความต่างศักย์ได้จากผลคูณของกระแส j กับความต้านทานหรือความต้าน ดังนั้นสมการของ V จึงเขียนได้เป็น

$$V = IZ = IR + jIX_L - jIX_C$$

หรือ
$$Z = R + jX_L - jX_C \qquad (19.20)$$

เมื่อ Z = ความขัดของวงจร

นำสมการ (19.20) มาเขียนในระนาบเชิงซ้อน โดยให้ R มีเฟสอยู่ในแนวแกนจริง จะได้ผลดังรูป 19.40



รูป 19.40 แผนภาพของความขัด

เฟสของ X_L อยู่ตามแนวแกนจินตภาพบวก X_C อยู่ตามแนวแกนจินตภาพลบ

จากสมการ (19.20) ขนาดของ Z คือ

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \tag{19.21}$$

หาเฟสของ Z เมื่อเทียบกับ R หรือแกนเลขจริงจาก

$$\phi = \tan^{-1}\left[\frac{(X_L - X_C)}{R}\right] \tag{19.22}$$

ตัวอย่าง 19.12 วงจรอนุกรมของตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวจุซึ่งมีค่า $R = 2\Omega$ $X_L = 3\Omega$ และ $X_C = 4\Omega$ จงหาความขัดของวงจร และเฟสของความขัด

วิธีทำ สมการของความขัดของวงจรอนุกรม R L C เขียนได้เป็น

$$Z = R + jX_L - jX_C$$

$$= 2 + j3 - j4 = 2-j$$

หรือ $$|Z| = \sqrt{2^2 + 1^2} = \sqrt{5} \text{ โอห์ม}$$ *ตอบ*

เฟสของ Z เทียบกับ R คือ

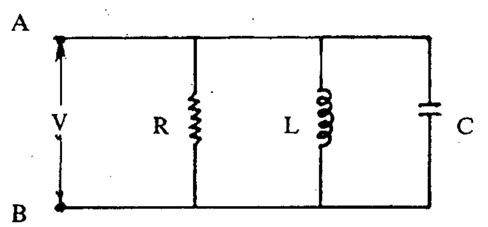
$$\phi = \tan^{-1}\left[\frac{X_L - X_C}{R}\right]$$

$$= \tan^{-1}\left[-\frac{1}{2}\right]$$

$$= -26.5^\circ$$

นั่นคือ Z มีเฟสตามหลัง R เป็นมุม 26.5° *ตอบ*

19.9.2 วงจร R L C ต่อแบบขนาน

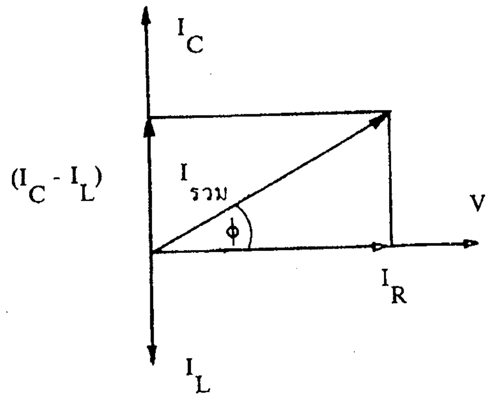


รูป 19.41 R L C *ต่อแบบขนาน*

เมื่อต่อความต่างศักย์ V ระหว่างจุด AB วงจรดังรูป 19.41 จะมีกระแสผ่าน R L และ C ที่มีเฟสดังนี้

กระแส I_R ผ่าน R จะมีเฟสตรงกับ V

กระแส I_L ผ่าน L มีเฟสตามหลัง V เป็นมุม 90° และกระแส I_C ผ่าน C จะมีเฟสนำหน้า V เป็นมุม 90° เมื่อเขียนแผนภาพของเฟสเชิงซ้อนของกระแสเหล่านี้ตามวิธีของจำนวนเชิงซ้อนจะได้ผลดังแสดงในรูป 19.42



รูป 19.42 แผนภาพของกระแสในวงจร R L C ต่อแบบขนาน

เมื่อเขียนค่ากระแสรวม I ของวงจรตามหลักของจำนวนเชิงซ้อน จะได้

$$I = I_R + jI_C - jI_L$$

$$= I_R + j(I_C - I_L) \qquad (19.23)$$

ขนาดของ I หาได้จาก

$$|I| = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2} \qquad (19.24)$$

ความต่างเฟสของ I เทียบกับ I_R หรือ V คือ

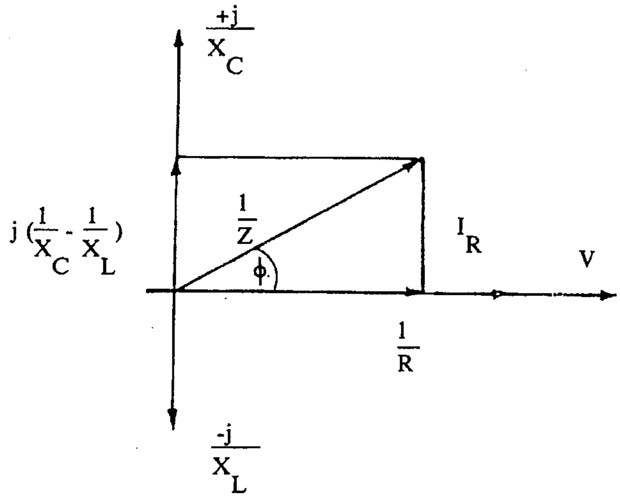
มุม ϕ มีค่าอยู่ระหว่าง $+90^\circ \rightarrow 0 \rightarrow -90^\circ$

สมการของความขัดของวงจร R L C ต่อแบบขนานจะหาได้จากสมการ (19.23) โดยอาศัยความสัมพันธ์ตามกฎของโอห์ม $I = \frac{V}{R}$ และเขียนได้ดังนี้

$$\frac{V}{Z} = \frac{V}{R} + j\frac{V}{X_C} - j\frac{V}{X_L}$$

หรือ $$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + j\left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right) \qquad (19.25)$$

เมื่อนำสมการ (19.25) มาเขียนในระนาบเชิงซ้อน จะได้ผลดังแสดงในแผนภาพของรูป 19.43



รูป 19.43 แผนภาพแสดงเฟสของความขัดของวงจร R L C ต่อแบบขนาน

ขนาดของ $\frac{1}{Z}$ คำนวณได้จาก

$$\left|\frac{1}{Z}\right| = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2} \qquad (19.26)$$

ความต่างเฟสของ $\frac{1}{Z}$ เทียบกับ $\frac{1}{R}$ คือ

$$\phi = \tan^{-1}\left[\frac{\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}}{\frac{1}{R}}\right] \qquad (19.27)$$

มุม ϕ มีค่าอยู่ระหว่าง $+90 \rightarrow 0 \rightarrow -90^\circ$

การหาความต่างเฟสของความขัด Z ของวงจรอาจหาได้จากการเปลี่ยนเครื่องหมายของความต่างเฟสของ $\frac{1}{Z}$ ให้เป็นตรงกันข้าม เช่น เมื่อความต่างเฟสของ $\frac{1}{Z}$ เขียนได้ว่า

$$\phi_{\frac{1}{Z}} = \tan^{-1}\left[\frac{\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}}{1/R}\right]$$

ความต่างเฟสของ Z จะเขียนได้เป็น

$$\phi_Z = \tan^{-1}\left[\frac{-(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L})}{1/R}\right] \qquad (19.28)$$

จะไม่พิสูจน์วิธีการนี้ ณ ที่นี้ ผู้ที่สนใจอาจศึกษาได้จากเรื่องการเขียนแผนภาพแสดงเฟสแบบเชิงขั้ว (polar) จากตำราวิชาไฟฟ้ากระแสสลับขั้นก้าวหน้าทั่วไป

ตัวอย่าง 19.13 วงจร R L C ต่อแบบขนานมีค่า $R = 40\Omega$ $X_L = 60\Omega$ และ $X_C = 24\Omega$

ก. จงคำนวณค่าความขัดของวงจร Z และเฟสของ Z

ข. เมื่อต่อความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ 120 โวลต์เข้ากับวงจร จงคำนวณค่ากระแสรวมและเฟสของกระแสรวม

วิธีทำ ก. ความขัดของวงจร R L C ต่อแบบขนานหาได้จาก

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + j\left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)$$

$$= \frac{1}{40} + j\left(\frac{1}{24} - \frac{1}{60}\right)$$

$$= \frac{1}{40} + \frac{j}{40} = \frac{1}{40}(1 + j) \text{ ต่อโอห์ม}$$

$$Z = \frac{40}{1 + j} = 20(1 - j)$$

และ $|Z| = 20\sqrt{2}$ โอห์ม

คำนวณเฟสของ Z เมื่อเทียบกับแกนจริง จะได้

$$\phi = \tan^{-1}[-1] = -45^\circ$$ *ตอบ*

ข. เมื่อต่อความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ 120 โวลต์ กับวงจร ค่า I จะได้ว่า

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{120}{20(1-j)} = 3(1 + j) \text{ แอมแปร์}$$

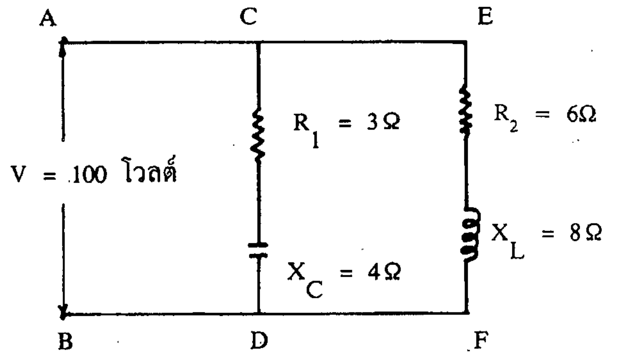
หรือ $|I| = 3\sqrt{1^2 + 1^2} = 3\sqrt{2}$ แอมแปร์

เฟสของ I เมื่อเทียบกับ $\frac{1}{R}$ หรือแนวแกนจริง จะได้ว่า

$$\phi = \tan^{-1}\left[+1\right] = 45^\circ$$ *ตอบ*

19.9.3 วงจร R L C ต่อแบบผสม

โดยอาศัยหลักการของวงจรที่ต่ออย่างอนุกรมและการต่ออย่างขนาน จะสามารถวิเคราะห์วงจรที่ต่อกันแบบผสมได้ จากวงจรที่กำหนดให้ ดังรูป 19.44



รูป 19.44 วงจร R L C ต่อแบบผสม

ก. คำนวณความขัดของแขนง CD เขียนเป็น Z_1 ได้

$$Z_1 = R_1 - jX_C = 3 - j4$$

หรือ

$$|Z| = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ โอห์ม}$$

กระแสผ่านแขนง CD เขียนว่า I_1 หาได้จาก

$$I_1 = \frac{V}{Z} = \frac{100}{3 - j4} = 4(3 + j4)$$

$$|I_1| = 4\sqrt{3^2 + 4^2} = 20 \text{ แอมแปร์}$$

เฟสของ I_1 เทียบกับ V หาได้จาก

$$\phi_1 = \tan^{-1}\left[\frac{4}{3}\right] = 53^\circ$$

นั่นคือ I_1 มีเฟสนำหน้า V เป็นมุม 53°

ข. คำนวณเกี่ยวกับแขนง EF ทำนองเดียวกับแขนง CD

ได้ $Z_2 = 6 + j8$ หรือ $|Z_2| = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10\,\Omega$

$$I_2 = \frac{100}{6 + j8} = (6 - j8), \quad |I_2| = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10 \text{ แอมแปร์}$$

$$\phi_2 = \tan^{-1}\left[-\frac{8}{6}\right] = -53^\circ$$

นั่นคือ I_2 มีเฟสตามหลัง V เป็นมุม 53°

ค. I หาได้จากผลบวกของ I_1 และ I_2

$$I = 4(3 + j4) + (6 - j8) = 18 + j8$$

ขนาดของ I คือ $|I| = \sqrt{18^2 + 8^2} = 19.7$ แอมแปร์

เฟสของ I เมื่อเทียบกับ V คำนวณได้จาก

$$\phi = \tan^{-1}\left[\frac{8}{18}\right] = 24^\circ$$

นั่นคือ I มีเฟสนำหน้า V เป็นมุม 24°

ง. ความขัดรวมของวงจร หาได้ 2 วิธีคือ

1. จาก V หารด้วย $I_{\text{รวม}}$

$$Z = \frac{100}{18 + j8} = \frac{50}{9 + j4} = \frac{50}{97}(9 - j$$

$$|Z| = 5.07 \text{ โอห์ม}$$

และ 2. จาก Z_1 ขนานกับ Z_2 จะได้

$$Z = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{(3 - j4)(6 + j8)}{3 - j4 + 6 + j8}$$

$$= \frac{50}{9 + j4}$$

$$|Z| = 5.07 \text{ โอห์ม}$$

ซึ่งได้ผลตรงกัน

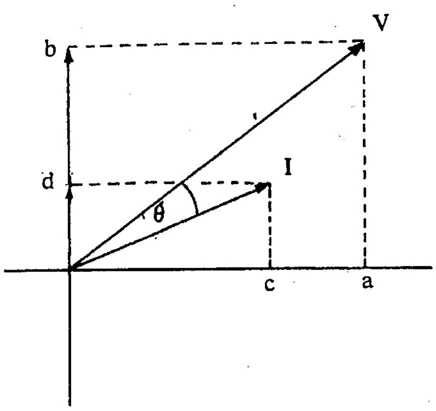
19.9.4 การคำนวณกำลังไฟฟ้ากระแสสลับด้วยวิธีจำนวนเชิงซ้อน

จำนวนกำลังไฟฟ้าได้จากผลคูณของความต่างศักย์กับกระแสที่ทำให้เกิดความต่างศักย์นั้น เมื่อ V และ I อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน เช่น เมื่อ $V = a + jb$ และ $I = c + jd$ การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจะเอา V คูณ I ตรง ๆ ไม่ได้ เพราะจะได้ผลไม่ถูกต้องกับที่เป็นจริง ให้พิจารณาแผนภาพแสดงเฟสของ V และ I ซึ่งเขียนในระนาบเชิงซ้อน ดังรูป 19.45 จากสมการ (19.15) กำลังไฟฟ้าเมื่อคิดจากส่วนประกอบของ V และ I คูณกันจะได้

$$P = ac\cos 0^\circ + bd\cos 0^\circ + ad\cos 90^\circ + bc\cos 90^\circ$$

$$= ac + bd \qquad (19.29)$$

ถ้าเราทดลองนำ V และ I มาคูณกันตรง ๆ และหาภาคจริงจะได้



รูป 19.45 แผนภาพแสดงเฟสของความต่างศักย์และกระแส

$$\mathrm{Re}\, VI = \mathrm{Re}\,(a + jb)(c + jd) = \mathrm{Re}\left[ac - bd + j(bc + ad)\right]$$

$$= ac - bd \qquad (\text{เมื่อ } j = \sqrt{-1}\ ,\ j^2 = -1)$$

จะเห็นว่า ได้ผลแตกต่างไปจากสมการ (19.29) เพื่อจะให้ได้ผลถูกต้อง ใช้วิธีเปลี่ยนค่า V หรือ I ตัวใดตัวหนึ่งเป็นคอนจุเกต (conjugate) ของตัวเอง แล้วหาผลคูณจะได้เป็นกำลังไฟฟ้า เช่น เมื่อเปลี่ยน V เป็นคอนจุเกตของตัวเองได้เป็น $V^* = a - jb$ และ $I = c + jd$

จะได้ $\quad \text{Re}\, IV^* = \text{Re}\,(a - jb)(c + jd)$

$$= ac + bd = P$$

ตรงกับค่ากำลังไฟฟ้าที่เป็นจริง สรุปได้ว่า ถ้า V และ I อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน กำลังงานไฟฟ้า

$$P = \text{Re}\, IV^* \tag{19.30}$$

ตัวอย่าง 19.14 จงคำนวณหากำลังไฟฟ้าในวงจรที่มี $V = 100 + j50$ โวลต์ และ $I = 2 - j$ แอมแปร์

วิธีทำ เปลี่ยน V ให้เป็นคอนจุเกตของตัวเอง

ได้เป็น $\quad V^* = 100 - j50$

ดังนั้น กำลังไฟฟ้า $\quad P = \text{Re}\, IV^* = \text{Re}\,(2 - j)(100 - j50)$

$$= 200 - 50$$

$$= 150 \text{ วัตต์}$$

ตอบ

19.9.5 คำนวณความถี่อภินาทของวงจรด้วยวิธีเลขเชิงซ้อน

วงจรที่ประกอบด้วย L และ C จะมี R ด้วยหรือไม่ก็ตาม มีความถี่ธรรมชาติหรือความถี่อภินาทประจำตัว จะคำนวณหาได้ด้วยวิธีจำนวนเชิงซ้อน โดยอาศัยหลักสำคัญที่ว่าที่ความถี่อภินาทของวงจร ค่าความขัดรวมของวงจรจะเป็นจำนวนจริงซึ่งหมายความว่าเทอมที่เป็นจำนวนจินตภาพของความขัดของวงจรจะต้องเป็นศูนย์ ซึ่งทำความต่างเฟสของความต่างศักย์และกระแสเป็นศูนย์ด้วย

ที่ความถี่ใด ๆ $\quad Z = R + jX \qquad (19.31)$

ที่ความถี่อภินาท $\quad Z = R$

และ $\quad jX = 0 \qquad (19.32)$

จากข้อแม้ที่ว่า jX ต้องเป็นศูนย์นี้ทำให้สามารถคำนวณหาค่าความถี่อภินาทของวงจรได้

19.9 การใช้ปริมาณเชิงซ้อนในไฟฟ้ากระแสสลับ

การหาความถี่อภินาทของวงจร R L C แบบต่าง ๆ อาจแสดงได้ดังต่อไปนี้

ก. ความถี่อภินาทของวงจร R L C ต่อแบบอนุกรม

ความขัดของวงจร $Z = R + j(X_L - X_C)$

ที่ความถี่อภินาท f_r, $Z = R, \quad j(X_L - X_C) = 0$

ได้ $X_L = X_C$

ดังนั้น $$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

ข. ความถี่อภินาท f_r ของวงจร R L C ต่อแบบขนาน

ความขัดของวงจรขนาน $\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + j\left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)$

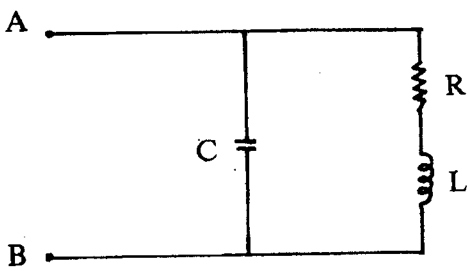
ที่ความถี่อภินาท f_r $Z = R$

$$j\left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_C}\right) = 0$$

$$X_C = X_L$$

ดังนั้น $$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

ค. ความถี่อภินาทของวงจร R L C ต่อแบบผสม ดังรูป 19.46



รูป 19.46 วงจร R L C ต่อแบบผสม

ความขัดของวงจรคิดได้จากความขัดของสองแขนงรวมกันแบบขนาน คือ

$$Z = \frac{-jX_C(R + jX_L)}{-jX_C + R + jX_L}$$

$$= \frac{X_C X_L - jRX_C}{R + j(X_L - X_C)}$$

คูณทั้งเศษและส่วนด้วย $R - j(X_L - X_C)$ จะได้

$$Z = \frac{(X_C X_L - jRX_C)\left[R - j(X_L - X_C)\right]}{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

ที่ความถี่อภินาท f_r เทอมจินตภาพของ Z เป็นศูนย์

นั่นคือ $-jR^2X_C - jX_LX_C(X_L - X_C) = 0$

$$\text{ดังนั้น} \quad R^2 = X_L(X_C - X_L)$$

$$= \omega L\left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)$$

$$= \frac{L}{C} - \omega^2 L^2$$

$$\text{หรือ} \quad \omega^2 = \frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}$$

ถ้าเขียน $\omega_o^2 = \frac{1}{LC}$ = ความถี่อภินาท (เชิงมุม) ของวงจรเมื่อ $R = 0$

$$\omega = \sqrt{\omega_o^2 - \frac{R^2}{L^2}}$$

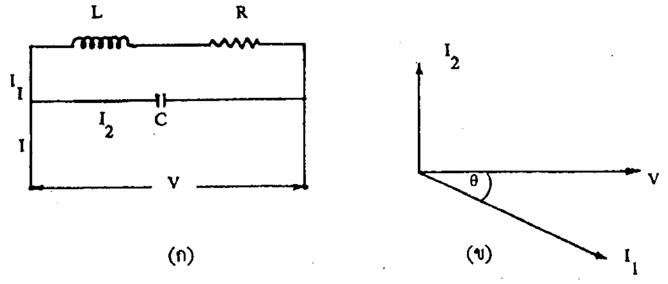
$$\text{หรือ} \quad f_r = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\omega_o^2 - \frac{R^2}{L^2}} \qquad (19.33)$$

19.10 อุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับ

เนื่องจากไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นไฟฟ้ากระแสที่จ่ายไปตามบ้านเรือนและหน่วยใช้พลังงานอื่น ๆ ทั่วไป จึงควรจะทราบถึงอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องบ้างพอสมควร ที่ยกมาอธิบายไว้นี้เป็นเพียงตัวอย่างอันพบเห็นเสมอ ๆ ที่น่าจะทำความเข้าใจได้ในหลักการ

19.10 อุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับ

19.10.1 หลอดเรืองแสง

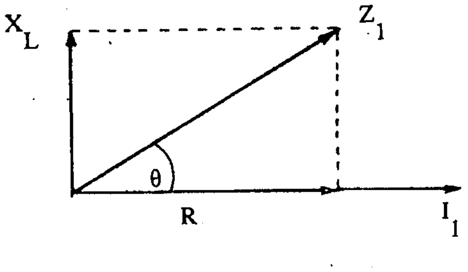


รูป 19.47 (ก) วงจรไฟฟ้าของหลอดเรืองแสง
(ข) เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสของกระแสและความต่างศักย์

รูป 19.47 ก. แสดงวงจรของหลอดเรืองแสง (fluorescent) R เป็นความต้านทานของตัวหลอด L เป็นความเหนี่ยวนำของบาลลาสท์ที่ต่ออนุกรมกับตัวหลอด C เป็นตัวจุซึ่งโรงไฟฟ้าขอให้ต่อไว้เพื่อลดกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า ถ้าไม่ต่อ C หลอดไฟสว่าง กินกระแสไฟฟ้าเท่ากับ $I_1 = \dfrac{V}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$ หลอดกินกำลังไฟฟ้าเท่ากับ I_1^2R กระแสไฟฟ้า I_1 นี้จะต้องวิ่งผ่านสายเมนของโรงไฟฟ้า ถ้าต่อ C หลอดกินกระแส I_1 และกำลัง I_1^2R เท่าเดิม ตัวจุ C กินกระแสไฟฟ้า $I_2 = \dfrac{V}{X_C}$ กระแส I_1 และ I_2 มีเวกเตอร์แสดงเฟสดังแสดงในรูป 19.47 ข. ทำให้กระแสรวม I มีค่าน้อยกว่า I_1 (ลองเขียนรูปเอง) ดังนั้น กระแส I ซึ่งผ่านสายส่งของโรงไฟฟ้าจึงมีค่าลดลงจากเมื่อไม่ต่อ C

หมายเหตุ ฝ่ายผู้ใช้ จะต่อตัวจุหรือไม่ก็ตามจะเสียค่าไฟเท่าเดิม แต่ต้องจ่ายเงินค่าซื้อตัวจุ ฝ่ายโรงไฟฟ้า ถ้าไม่ต่อ C ต้องจ่ายกระแสไฟฟ้ารวม I มาก ถ้าต่อ C จ่ายกระแสไฟฟ้ารวม I น้อยลง

โดยการคิดส่วนประกอบของ I_1 และ I_2 จะหากระแสไฟฟ้ารวมได้



รูป 19.48 เวกเตอร์แสดงความต่างเฟสของความขัดและกระแส

$$I = \sqrt{(I_1 \cos\theta)^2 + (I_2 - I_1 \sin\theta)^2}$$

$$= \sqrt{(\frac{V}{Z_1}\cos\theta)^2 + (\frac{V}{X_C} - \frac{V}{Z_1}\sin\theta)^2}$$

กระแสรวม I มีค่าน้อยที่สุดเมื่อ

$$(\frac{V}{X_C} - \frac{V}{Z_1}\sin\theta)^2 = 0$$

และโดยอาศัยเวกเตอร์แสดงความต่างเฟสตามรูป 19.48 จะได้

$$X_C = \frac{Z_1}{\sin\theta} = \frac{Z_1}{X_L} Z_1 = \frac{Z_1^2}{X_L} = \frac{R^2 + X_L^2}{X_L}$$

คือ $$\frac{1}{\omega C} = \frac{R^2 + \omega^2 L^2}{\omega L}$$

ดังนั้น ตัวจุซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้ารวม I มีค่าน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ

$$C = \frac{L}{R^2 + \omega^2 L^2} \qquad (19.34)$$

เมื่อใช้ค่า C นี้แล้วจะได้กระแสไฟฟ้ารวม I ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ

$$I_{min} = \frac{V}{Z_1}\cos\theta = \frac{V}{Z_1}\frac{R}{Z_1} = \frac{VR}{R^2 + \omega^2 L^2}$$

ทดลองเทียบ I_{min} นี้กับกระแส I_1 ได้

$$\frac{I_{min}}{I_1} = \frac{VR}{(R^2 + \omega^2 L^2)} \cdot \frac{\sqrt{R^2 + X_L^2}}{V} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

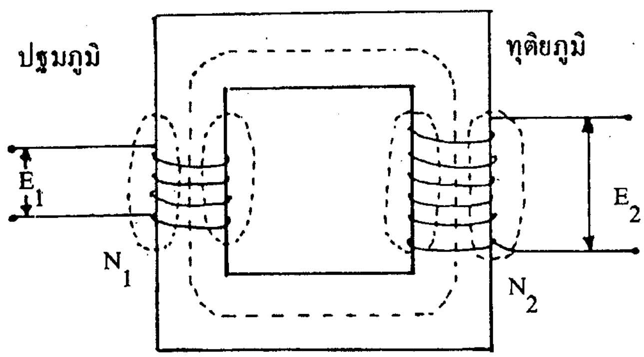
แสดงว่าเมื่อใช้ค่า C ที่เหมาะ กระแสรวม I_{min} มีค่าน้อยกว่า I_1

ในทางปฏิบัติพบว่า ในกรณีหลอดเรืองแสงขนาด 40 วัตต์ เมื่อใช้ C ที่เหมาะสมตามสมการ

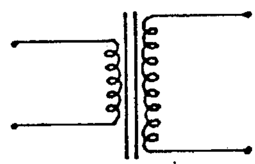
(19.34) ซึ่งหาค่าได้ประมาณ 4.7 ไมโครฟารัด ทำให้กระแสจากโรงไฟฟ้าลดจาก 0.4 แอมแปร์ลงเหลือ 0.2 แอมแปร์ (ไฟฟ้า 220 โวลต์) คือ ลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง

19.10.2 หม้อแปลง

หม้อแปลง (transformer) เป็นเครื่องมือทางไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับให้สูงขึ้นหรือต่ำกว่าเดิม โดยใช้หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า เครื่องมือชนิดนี้ประกอบด้วยขดลวดสองขด พันอยู่บนแกนเหล็กอันเดียวกันดังแสดงในรูป 19.49 ก. เมื่อปล่อยไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปในขดลวดขดหนึ่ง จะทำให้เกิดมีฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งแปรค่าตลอดเวลาเกิดขึ้นในแกนเหล็กนั้น การแปรค่าของฟลักซ์แม่เหล็กดังกล่าวนี้ก็จะไปเกิดการแปรค่าฟลักซ์ในขดลวดอีกขดหนึ่งด้วย ทำให้เกิดมีไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดขดที่สองนี้ ดังนั้น จึงบอกได้ว่า กำลังไฟฟ้าถ่ายทอดจากขดลวดอันแรกซึ่งเรียกว่า *ขดลวดปฐมภูมิ (primary)* ไปยังขดลวดอันที่สองซึ่งเรียกว่า *ขดลวดทุติยภูมิ (secondary)* หม้อแปลงไฟฟ้านี้โดยทั่วไปนิยมเขียนเป็นรูปง่าย ๆ แทนรูปจริง ดังรูป 19.49 ข.



(ก)



(ข)

รูป 19.49 (ก) และ (ข) แสดงขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดปฐมภูมินั้น ไม่ได้ไปสู่ขดลวดทุติยภูมิทั้งหมด มีบางส่วนอยู่ในขดลวดปฐมภูมินั้น ส่วนใหญ่จะไปสู่ขดลวดทุติยภูมิ ฟลักซ์แม่เหล็กที่เชื่อมโยงขดลวดทั้งสอง (ผ่านขดลวดทั้งสอง) เรียกว่า *ฟลักซ์รวม (mutual flux)* ส่วนฟลักซ์แม่เหล็กที่วนอยู่เฉพาะในขดลวดขดใดขดหนึ่ง เรียกว่า *ฟลักซ์รั่วไหล (leakage flux)*

กำลังไฟฟ้าที่ส่งจากขดลวดปฐมภูมิไปยังขดลวดทุติยภูมินั้นบางส่วนถูกใช้ไปในการกลายเป็นความร้อนในขดลวดทั้งสองและในเนื้อแกนเหล็ก คือ เกิดความล้า (hysterysis) และมีกระแสวน (eddy current) เกิดขึ้น ดังนั้น กำลังไฟฟ้าที่ส่งออกไปจากขดลวดทุติยภูมิจึงน้อยกว่าที่ได้รับเข้ามาทางปฐมภูมิ แต่น้อยกว่ากันไม่มากนัก ผลเสียเนื่องจากความล้า ก็อาจลดลงได้ โดยการเลือกใช้แกนเหล็กที่มีวงแห่งความล้า (hysterysis loop) เล็ก ๆ และผลเสียเนื่องจากกระแสวน ก็อาจลดลงได้ โดยใช้แกนเหล็กที่เป็นแผ่นบางหลายแผ่นซ้อนกัน โดยวิธีดังกล่าวนี้ ทำให้สามารถสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพขนาด 90 ถึง 99 เปอร์เซ็นต์ได้

ในเบื้องต้นนี้จะเรียนเฉพาะกรณีที่ไม่มีการเสียกำลังไฟฟ้าและไม่มีฟลักซ์สูญเปล่าเลย ดังนั้น อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก $\frac{d\phi}{dt}$ ในขดลวดทั้งสองจึงเป็นอย่างเดียวกัน

นั่นคือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อรอบในขดลวดแต่ละขด $= \frac{d\phi}{dt}$

ถ้า N_1 เป็นจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ

N_2 เป็นจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ

E_1 เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของขดลวดปฐมภูมิ

E_2 เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของขดลวดทุติยภูมิ

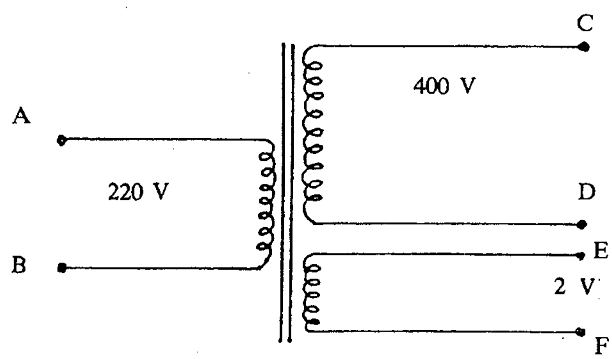
ย่อมได้ $E_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt}$ และ $E_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt}$

จึงได้
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad (19.34)$$

ถ้า N_2 มากกว่า N_1 ค่าของ E_2 มาก E_1 ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ออกมาทางขดลวดทุติยภูมิมากกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าทางขดลวดปฐมภูมิ แบบนี้เรียกว่า *หม้อแปลงขึ้น (step up transformer)*

ถ้า N_2 น้อยกว่า N_1 ค่าของ E_2 น้อยกว่า E_1 ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ออกมาทางขดลวดทุติยภูมิ น้อยกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าทางขดลวดปฐมภูมิ แบบนี้เรียกว่า *หม้อแปลงลง (step down transformer)*

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในทางอิเลกโทรนิกส์นั้น มักมีหม้อแปลงขึ้นและหม้อแปลงลงรวมอยู่ในเครื่องเดียวกัน ดังแสดงในรูป 19.50



รูป 19.50 แสดงขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นทั้งแบบแปลงขึ้นและแปลงลง

19.10 อุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับ

AB เป็นปลายขดลวดปฐมภูมิที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าป้อนเข้ามา 220 โวลต์

CD เป็นปลายขดลวดทุติยภูมิที่แบบแปลงขึ้น มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าออกมา 400 โวลต์ (จำนวนรอบขดลวดมาก)

EF เป็นปลายขดลวดทุติยภูมิอีกขดหนึ่ง แต่เป็นแบบแปลงลง (จำนวนรอบขดลวดน้อย) มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าออกมา 2 โวลต์

แรงเคลื่อนไฟฟ้า 400 โวลต์จะถูกนำไปใช้ในส่วนหนึ่งของวงจร และแรงเคลื่อนไฟฟ้า 2 โวลต์จะถูกนำไปใช้ในอีกส่วนหนึ่งของวงจร

แบบฝึกหัด 19

19.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเครื่องหนึ่งมีสมการของแรงเคลื่อนไฟฟ้า ดังนี้

$$e = 157 \sin 314\, t$$

ก. จงหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดและความถี่

ข. ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้มีลวดพันไว้ 1,000 รอบ และพื้นที่ของขดลวดเท่ากับ 0.001 ตารางเมตร จงหาค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก B ของสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น

19.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเครื่องหนึ่งมีความถี่ 60 เฮิร์ทซ์ ที่อัตราการหมุน 1,200 รอบต่อนาที ให้หาจำนวนขั้วของแม่เหล็กในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องนั้น

19.3 ก. ตัวเหนี่ยวนำขนาด 5 เฮนรี จะมีความต้านทานเท่ากับ 4,000 โอห์ม ที่ความถี่เท่าใด

ข. ตัวจุขนาด 5 ไมโครฟารัดจะมีความต้านค่าเดียวกับข้อบนนั้นที่ความถี่เท่าใด

19.4 ก. ให้หาค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำขนาด 10 เฮนรีที่ความถี่ 60 เฮิร์ทซ์ และ 600 เฮิร์ทซ์

ข. ให้หาค่าความต้านของตัวจุขนาด 10 ไมโครฟารัดที่ความถี่เดียวกันกับข้อ ก.

ค. ที่ความถี่เท่าใด ตัวเหนี่ยวนำในข้อ ก. และตัวจุในข้อ ข. จึงจะมีความต้านเท่ากัน

19.5 ไฟฟ้ากระแสสลับอันหนึ่ง มีสมการของกระแสไฟฟ้า i แอมแปร์เกี่ยวข้องกับเวลา t วินาที ตามสมการ $i = 2 \sin (628\, t + 0.2\, \pi)$ ให้หา

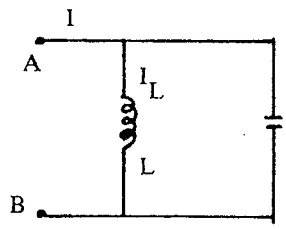
ก. ค่ายังผลของกระแสไฟฟ้า ข. ความถี่ ค. มุมเฟส

19.6 ตัวต้านทาน ตัวจุและตัวเหนี่ยวนำต่อกันอย่างอนุกรมและต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับ ตัวต้านทานมีค่าความต้านทาน 80 โอห์ม ความต้านของตัวจุและตัวเหนี่ยวนำมีค่า 40 และ 100 โอห์ม ตามลำดับ ถ้าปลายทั้งสองของตัวต้านทานมีความต่างศักย์ 8 โวลต์ จงหา

ก. ความต่างศักย์ของตัวจุและตัวเหนี่ยวนำ ข. ความต่างศักย์รวมทั้งหมด

ค. ความต่างศักย์รวมของตัวต้านทานและตัวจุ

19.7



รูป 19.51

ตัวเหนี่ยวนำ L = 0.2 เฮนรี และตัวจุ C = 4 ไมโครฟารัด ต่อขนานกันดังรูป 19.51 จุด AB ต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีความถี่ 1,000 เรเดียนต่อวินาทีและแรงเคลื่อนไฟฟ้า 220 โวลต์ จงหา

ก. กระแสไฟฟ้า I_L ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

ข. กระแสไฟฟ้า I_C ที่ไหลผ่านตัวจุ

ค. ค่าของกระแสรวม I

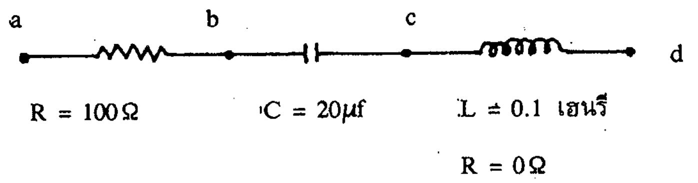
19.8 ตัวต้านทานขนาด 25 โอห์ม ตัวจุขนาด 10 ไมโครฟารัด และตัวเหนี่ยวนำซึ่งมีความต้านทาน 12 โอห์ม ความเหนี่ยวนำ 0.1 เฮนรี ต่อกันอย่างอนุกรม

ก. ให้หาความขัดของวงจรที่ความถี่ 100 เฮิร์ทซ์ และ 1,000 เฮิร์ทซ์

ข. ความขัดของตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ทั้งสองนั้นมีค่าเท่าใด

19.9 วงจรส่วนหนึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานขนาด 100 โอห์มต่อเป็นอนุกรมกับตัวจุอันหนึ่ง ต้องการให้ความขัดของวงจรนี้ที่ความถี่ 100 เฮิร์ทซ์ มีค่าเป็นสองเท่าของความขัดที่ความถี่ 300 เฮิร์ทซ์ ให้หาค่าความจุของตัวจุนั้น

19.10 ให้หาความขัดของวงจรซึ่งแสดงในรูป 19.52 ที่ความถี่ 60 รอบต่อวินาที ถ้า V_{ac} มีค่า 220 โวลต์ ให้หา V_{ad} และ V_{bd}



รูป 19.52

19.11 ตัวต้านทาน R = 400 โอห์ม ตัวเหนี่ยวนำ L = 0.2 เฮนรี และตัวจุ C = 2.5 ไมโครฟารัด ต่อกันอย่างขนานและต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า 220 โวลต์ ความถี่ 1,000 เรเดียนต่อวินาที จงหา

ก. ความขัดของวงจร

ข. กระแสไฟฟ้ารวม

ค. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

ง. มุมเฟสของกระแสรวมกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า

19.12 ตัวต้านทานขนาด 1 โอห์ม ตัวจุ และตัวเหนี่ยวนำต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับ ทำให้ความต้านของตัวจุและตัวเหนี่ยวนำมีค่า 1 และ 2 โอห์ม ตามลำดับ ให้หาค่าความขัดของวงจรเมื่อทั้งสามอันนี้ต่อกันในแบบ ก. อนุกรม ข. ขนาน

19.13 ตัวจุ และตัวเหนี่ยวนำต่อกันอย่างขนานและต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับ ตัวจุมีความต้าน 25 โอห์ม ตัวเหนี่ยวนำมีความต้านทาน 3 โอห์ม และมีความต้านแห่งการเหนี่ยวนำ 4 โอห์ม ความต่างศักย์ระหว่างสองจุดที่ต่อขนานนั้นมีค่า 100 โวลต์ จงหา

ก. กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวจุ

ข. กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ

ค. กระแสไฟฟ้ารวม

ง. มุมเฟสระหว่างกระแสรวมกับความต่างศักย์ 100 โวลต์นั้น

19.14 ความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับอันหนึ่งมีสมการ $V = 3 + 4j$ หน่วยเป็นโวลต์ ให้หาค่าของความต่างศักย์รวม

19.15 กระแสไฟฟ้าในหน่วยแอมแปร์ของไฟฟ้ากระแสสลับมีสมการเป็น $I = 2 + 4j - 3j$ ให้หาค่าของกระแสไฟฟ้ารวม

19.16 ตัวจุ $C = 300$ พิโคฟารัด (pF) ต่ออนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำ ถ้าต้องการให้เกิดอภินาทที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ทซ์ (MHz) ขดเหนี่ยวนำนั้นจะต้องมีความเหนี่ยวนำเท่าใด

19.17 ขดลวดเหนี่ยวนำความต้านทาน 2,000 โอห์ม กับตัวจุขนาด 1 ไมโครฟารัดต่ออนุกรมกัน และต่อกับเครื่องทำไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งเปลี่ยนความถี่ได้ และมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า 20 โวลต์คงที่ เกิดอภินาทที่ความถี่ 1,000 เรเดียนต่อวินาที จงหา

ก. กระแสไฟฟ้าขณะเกิดอภินาท

ข. ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด

ค. กระแสไฟฟ้าที่ความถี่เป็นสองเท่าของตอนเกิดอภินาท

19.18 จงคำนวณความถี่ที่จะเกิดอภินาท ในเมื่อมีขดลวดขนาด 10^{-6} เฮนรีต่อขนานกับตัวจุขนาด 100 พิโคฟารัด

19.19 เครื่องรับวิทยุอาศัยขดลวดเหนี่ยวนำต่อขนานกับตัวจุซึ่งแปรค่าได้ เพื่อเลือกรับคลื่นจากสถานีส่ง โดยอาศัยการปรับค่าของตัวจุให้เกิดอภินาทกับความถี่ของสถานีส่ง ถ้าขดลวดมีค่า 10^{-6} เฮนรี และตัวจุปรับค่าได้ระหว่าง 30 ถึง 300 พิโคฟารัด จะรับคลื่นวิทยุจากความยาวคลื่นเท่าใดถึงเท่าใดได้บ้าง กำหนดให้คลื่นวิทยุมีอัตราเร็ว 3×10^{8} เมตรต่อวินาที

19.20 ขดลวดเหนี่ยวนำ 100 เฮนรีต่อขนานกับตัวจุ C และต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า 220 โวลต์ความถี่ 50 เฮิร์ทซ์ C จะต้องมีค่าเท่าใดจึงจะได้กระแสรวมเป็นศูนย์และขณะนั้นกระแสที่ผ่านขดลวดมีค่าเท่าใด

19.21 ตัวต้านทานขนาด 10 โอห์ม ตัวเหนี่ยวนำและตัวจุต่อกันอย่างอนุกรมและต่อกับไฟฟ้าสลับ ซึ่งทำให้เกิดความต้านแห่งการเหนี่ยวนำ 5 โอห์ม และความต้านทานแห่งการจุ 10 โอห์ม แรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่า 100 โวลต์

แบบฝึกหัด 19

ก. จงหากำลังไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด

ข. ถ้าสิ่งทั้งสามนั้นต่อกันอย่างขนาน จงหากำลังไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด

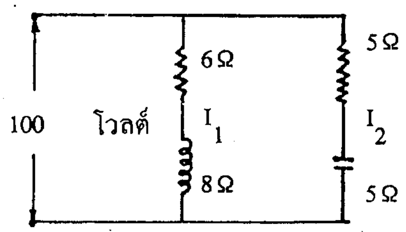
ค. ถ้าตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกันแล้วต่อขนานกับตัวจุ จงหากำลังไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด

19.22 วงจรอนุกรมวงจรหนึ่งมีความขัด 50 โอห์มและปัจจัยกำลัง 0.6 ที่ 60 เฮิร์ทซ์ ความต่างศักย์ตามหลังกระแสไฟฟ้า

ก. จะต้องใช้ตัวจุหรือตัวเหนี่ยวนำต่อแทรกเป็นอนุกรมเข้าไปในวงจร จึงจะทำให้ปัจจัยกำลังมีค่าสูงขึ้น

ข. สิ่งที่ต่อแทรกเข้าไปนั้น จะต้องมีขนาดเท่าใด จึงจะทำให้ปัจจัยกำลังมีค่าเป็นหนึ่งได้

19.23 ในรูป 19.53 จงหา



รูป 19.53

ก. ค่า I_1

ข. ค่า I_2

ค. กำลังไฟฟ้าทั้งหมด