บทที่ 4
ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าและวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

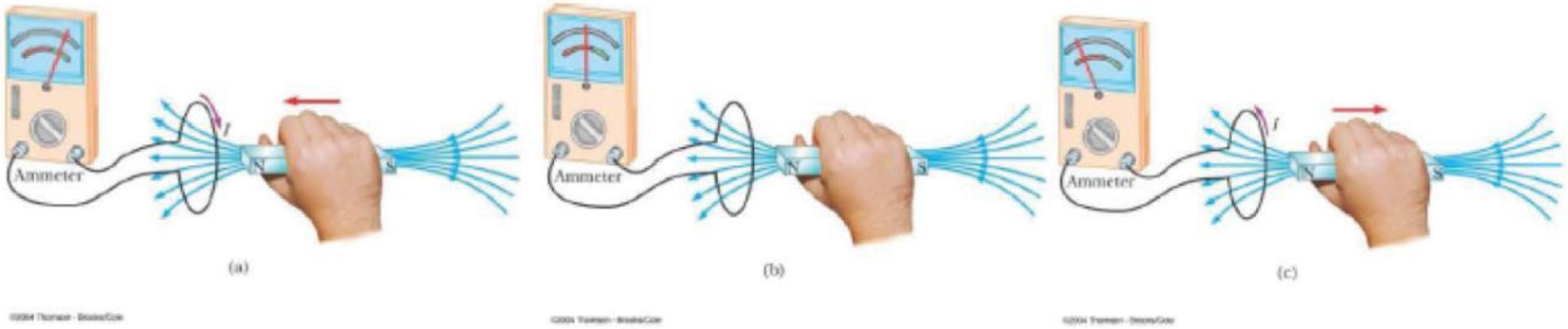
เอกสารประกอบการสอนรายวิชา

PHYS 1103 ฟิสิกส์ทั่วไป 2

ตอนที่ 1 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า

- หลังจากที่เออร์สเตด พบว่า เมื่อวางเข็มทิศในบริเวณที่มีกระแสไฟฟ้าจะทำให้เข็มทิศเบี่ยงเบน ฟาราเดย์ ได้ทำการทดลองในช่วงปี ค.ศ. 1791–1867 เกี่ยวกับแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก

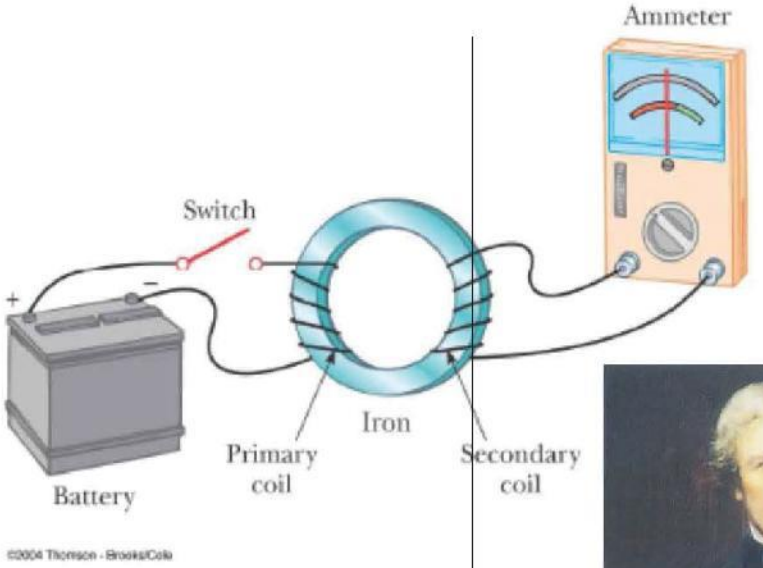
- *ฟาราเดย์พบว่า ถ้าเคลื่อนแม่เหล็กผ่านเข้าออกจากขดลวดที่ต่ออยู่กับแอมมิเตอร์ เข็มของแอมมิเตอร์จะกระดิกในทิศดังรูป*



- ฟาราเดย์ จึงสรุปว่า ถ้าทำการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กในขดลวดจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นมา ซึ่งทำให้มีกระแสไหลในขดลวด

การทดลองของฟาราเดย์

- ฟาราเดย์ได้ทำการทดลองการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดโดยใช้อุปกรณ์ดังรูป
- *ขดลวดปฐมภูมิต่อกับสวิตซ์และแบตเตอรี่ และขดลวดทุติยภูมิต่ออยู่กับแอมมิเตอร์*



- เมื่อปิดสวิตซ์เข็มของแอมมิเตอร์กระดิกไปทางหนึ่งแล้วกลับสู่ศูนย์ และเมื่อเปิดสวิตซ์เข็มของแอมมิเตอร์กระดิกไปอีกทางหนึ่งแล้วกลับสู่ศูนย์
- *แสดงว่าจะเกิดการเหนี่ยวนำกระแสขึ้นในวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กหรือเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced emf) นั่นเอง*

(emf: => electromotive force)

กฎของฟาราเดย์

- จากการทดลอง ฟาราเดย์จึงสรุปเป็นกฎของฟาราเดย์ว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในวงจรจะแปรผันโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กในวงจร หรือ

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$ หรือในรูปอนุพันธ์ $$\boxed{\varepsilon = -\frac{\mathrm{d}\Phi_B}{\mathrm{d}t}}$$

เมื่อ $\Phi_B = \int \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{A}$ คือฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในวงจร

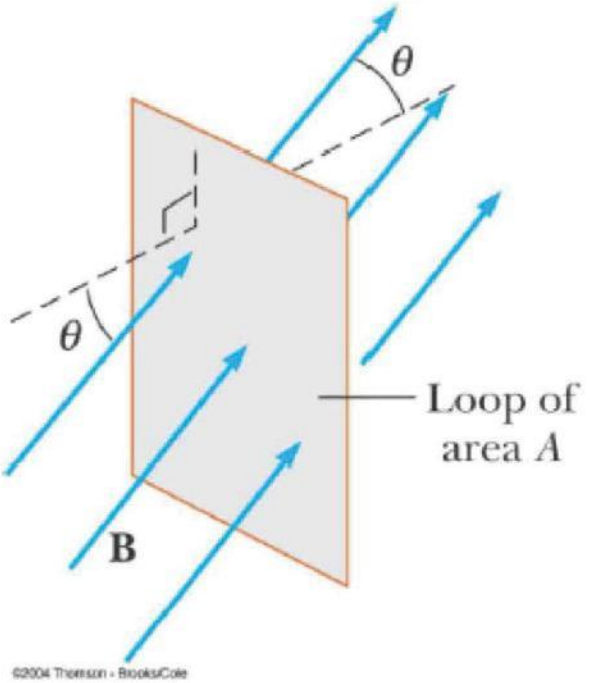
- ถ้าในวงจรมีขดลวดเป็น N ขด จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าเป็น

$$\varepsilon = -N\frac{\mathrm{d}\Phi_B}{\mathrm{d}t}$$

วิธีเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า

- ถ้าวางวงจรซึ่งมีพื้นที่ A ในสนามแม่เหล็กดังรูป จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจรมีค่าเป็น

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}(BA\cos\theta)$$



- *ดังนั้นเราอาจทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยวิธีต่อไปนี้*

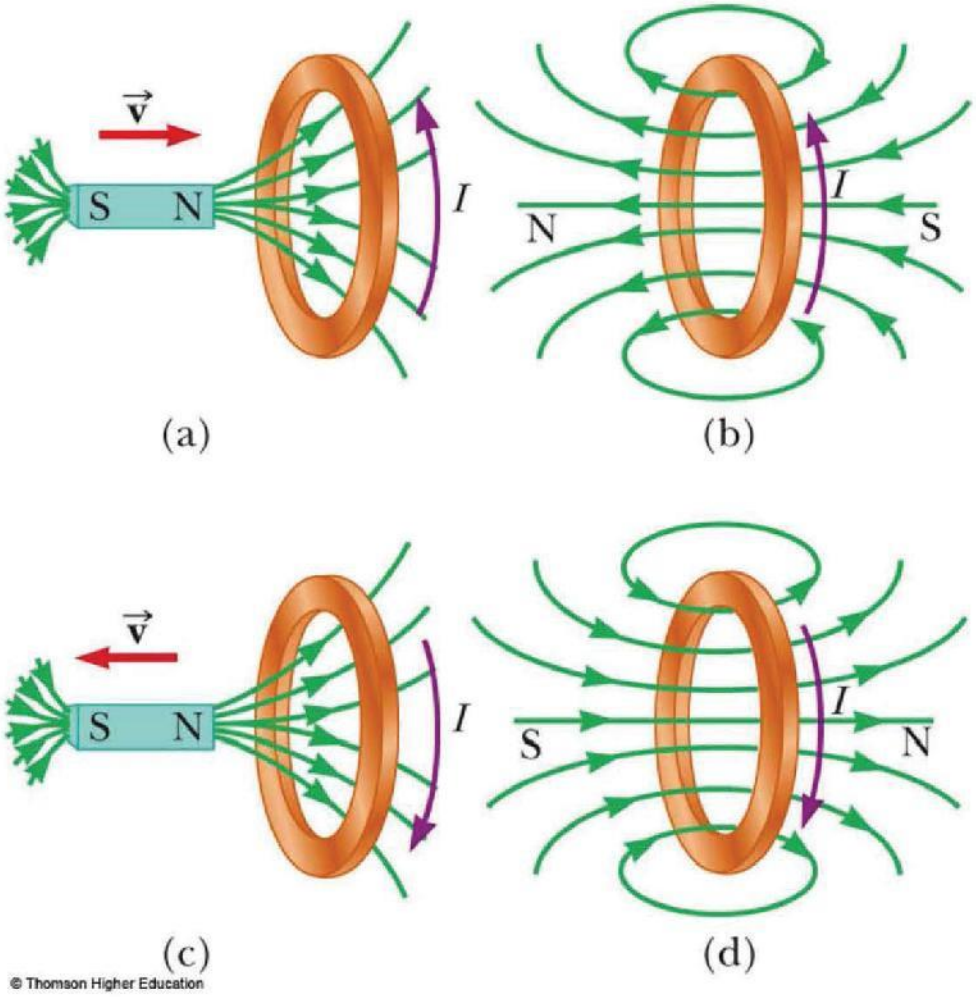
1. ทำให้ขนาดของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามเวลา
2. *ทำให้พื้นที่ของวงจรเปลี่ยนแปลงตามเวลา*
3. ทำให้มุม θ ระหว่างพื้นที่กับสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามเวลา
4. *การผสมผสานกันของวิธีดังกล่าว*

กฎของเลนซ์

- เนื่องจากกฎของฟาราเดย์ไม่ได้ระบุทิศของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ชื่อ ไฮน์ริช เลนส์ (Heirich Lenz) จึงเสนอกฎของเลนซ์ซึ่งกล่าวว่า

- *"ทิศทางของกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในวงจรจะเป็นไปในลักษณะที่ผลิตสนามแม่เหล็กที่ต่อต้านการเปลี่ยนฟลักซ์แม่เหล็กในวงจร"*

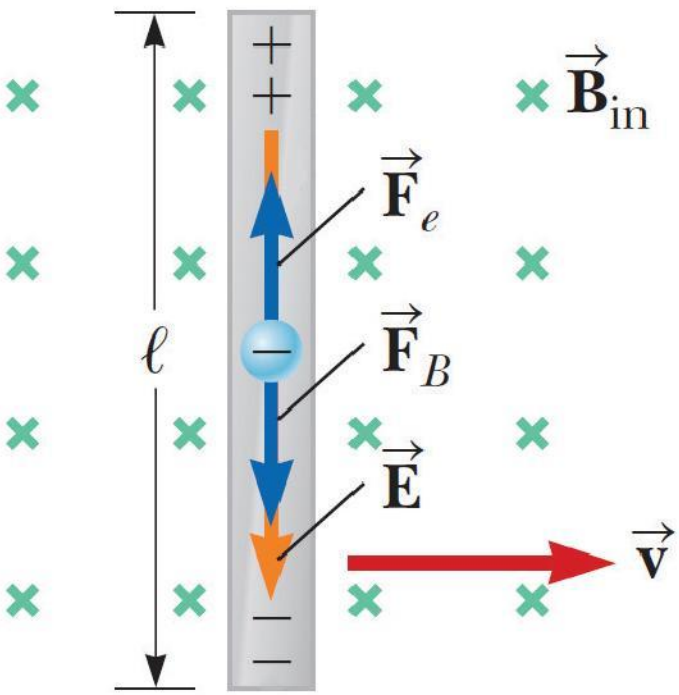
- แสดงว่า กระแสเหนี่ยวนำจะพยายามรักษาฟลักซ์แม่เหล็กเดิมของวงจรไม่ให้เปลี่ยนแปลง



ฟลักซ์ที่ไปทางขวาเพิ่มขึ้น วงปิดต้านด้วยเส้นสนามไปทางซ้าย (เส้นสนามจากขั้วเหนือกำลังเพิ่มขึ้น วงปิดต้านโดยการเพิ่มขั้วเหนือ)

ฟลักซ์ที่ชี้ไปทางขวาลดลง วงปิดชดเชยด้วยเส้นสนามไปทางขวา(เส้นสนามจากขั้วเหนือกำลังลดลง วงปิดต้านโดยการเพิ่มขั้วใต้)

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (emf) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่

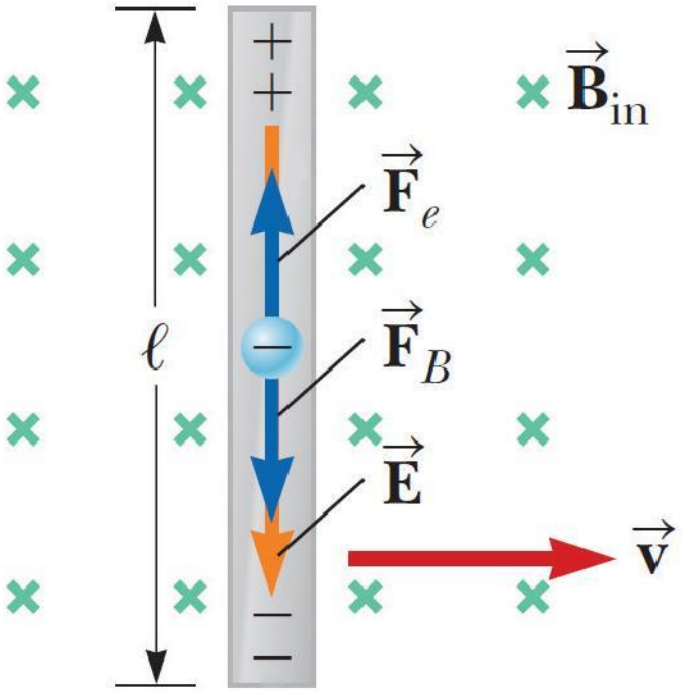


ถ้ามีตัวนำเส้นตรงมีความยาว ℓ ดังรูปเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอที่มีทิศพุ่งเข้าไปในกระดาษ โดยสมมติให้ตัวนำเคลื่อนที่ในทิศที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กด้วยความเร็วคงที่ อิเล็กตรอนในตัวนำได้รับแรง $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$ โดยแรงมีทิศตามความยาว ℓ และตั้งฉากกับ $\vec{v}$ และ $\vec{B}$ ภายใต้อิทธิพลของแรงนี้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปที่ปลายด้านล่างของตัวนำและเกิดการสะสมที่นั่น ทำให้เกิดประจุบวกที่ปลายด้านบนของตัวนำ

ผลจากการกระจายประจุทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในตัวนำ ประจุจะมีการสะสมที่ปลายทั้งสองจนกระทั่งแรงแม่เหล็ก qvB มีค่าสมดุลเนื่องจากการเพิ่มแรงไฟฟ้า qE ที่จุดนี้อิเล็กตรอนจะหยุดเคลื่อนที่ จะได้ว่า $qE = qvB$ หรือ $E = vB$

สนามไฟฟ้าที่เกิดในตัวนำสัมพันธ์กับความต่างศักย์ที่ตกคร่อมปลายทั้งสองของตัวนำสอดคล้องกับความสัมพันธ์ $\Delta V = E\ell$ ดังนั้น

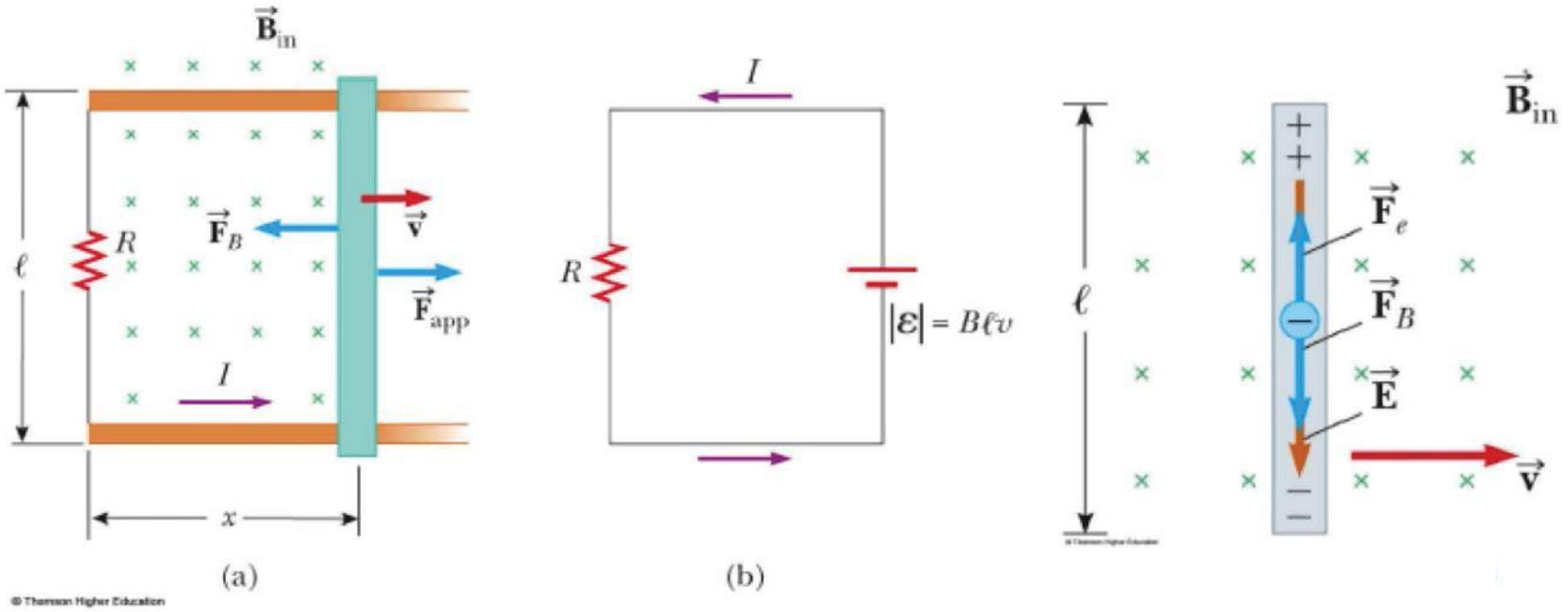
$$\Delta V = E\ell = vB\ell$$



เมื่อปลายด้านบนมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าปลายด้านล่าง ดังนั้นความต่างศักย์ระหว่างปลายตัวนำจะมีค่าคงอยู่ตลอดขณะที่แท่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ ถ้าแท่งตัวนำเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้าม ขั้วความต่างศักย์ก็จะกลับขั้วด้วย

ตัวอย่างที่ 2 Motional emf

ตัวนำยาว l เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว v ไปทางขวามือบนราง ที่วางนิ่งในแนวระดับในสนามแม่เหล็ก B ที่มีทิศดังรูป จงหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น

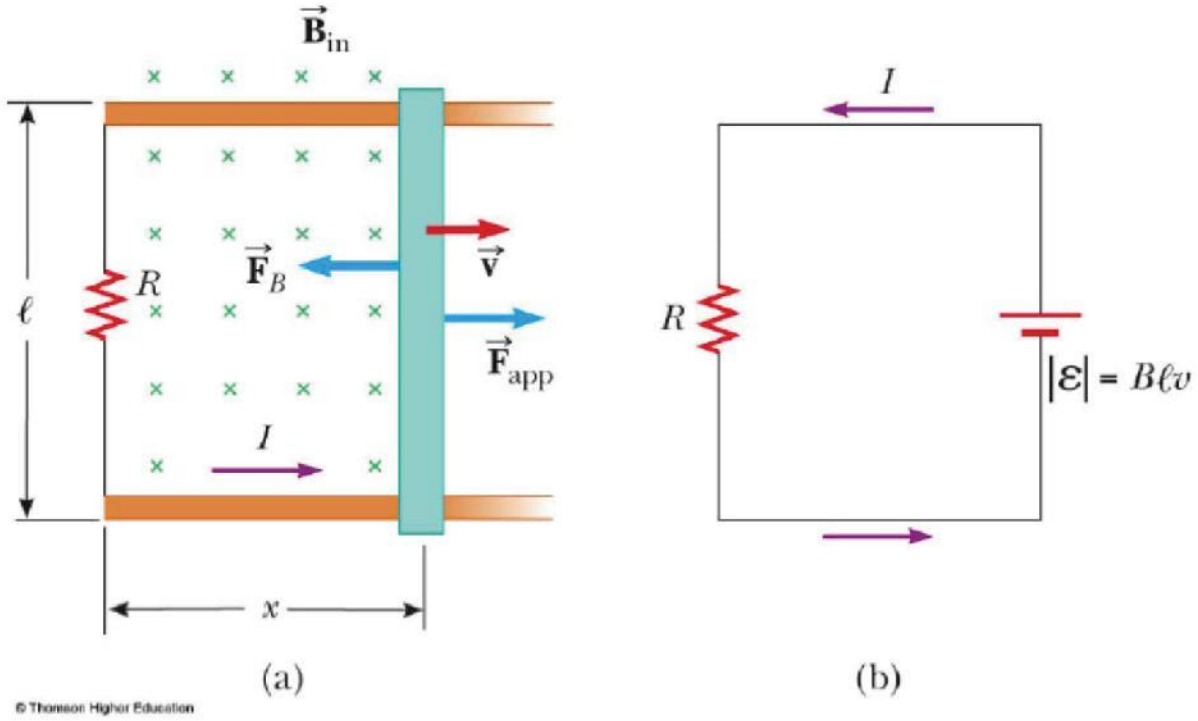


© Thomson Higher Education

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเคลื่อนที่

เมื่อตัวนำเป็นส่วนหนึ่งของวงจรเป็นสถานะการที่แสดงให้เห็นประโยชน์ว่าการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กเป็นสาเหตุให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำในวงจรปิด

พิจารณาวงจรที่ประกอบด้วยแท่งตัวนำความยาว ℓ ไถลไปบนแท่งตัวนำสองแท่งที่วางขนานกันอยู่ดังรูป

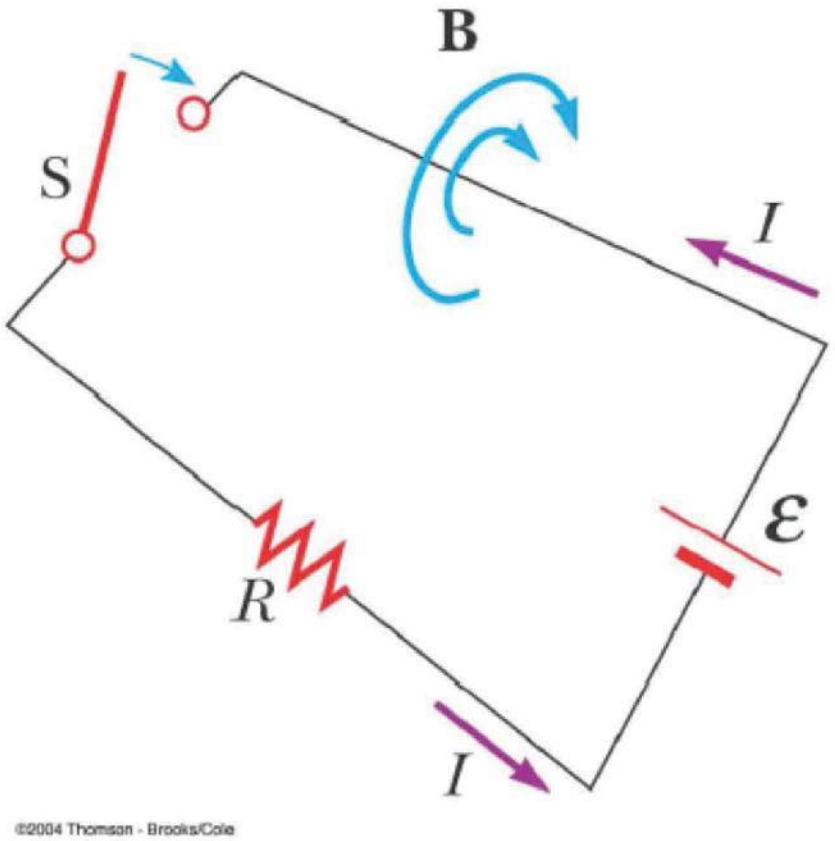


© Thomson Higher Education

สภาพเหนี่ยวนำตัวเอง

- จากวงจรไฟฟ้าดังรูปถ้าสับสวิตซ์ลงจะเกิดกระแสไฟฟ้าในวงจร โดยระดับกระแสจะเพิ่มขึ้นทีละน้อยจนถึงค่าสูงสุด

- *จากกฎของฟาราเดย์ เราทราบว่ากระแสดังกล่าว จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็ก ภายในวงจรซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน*



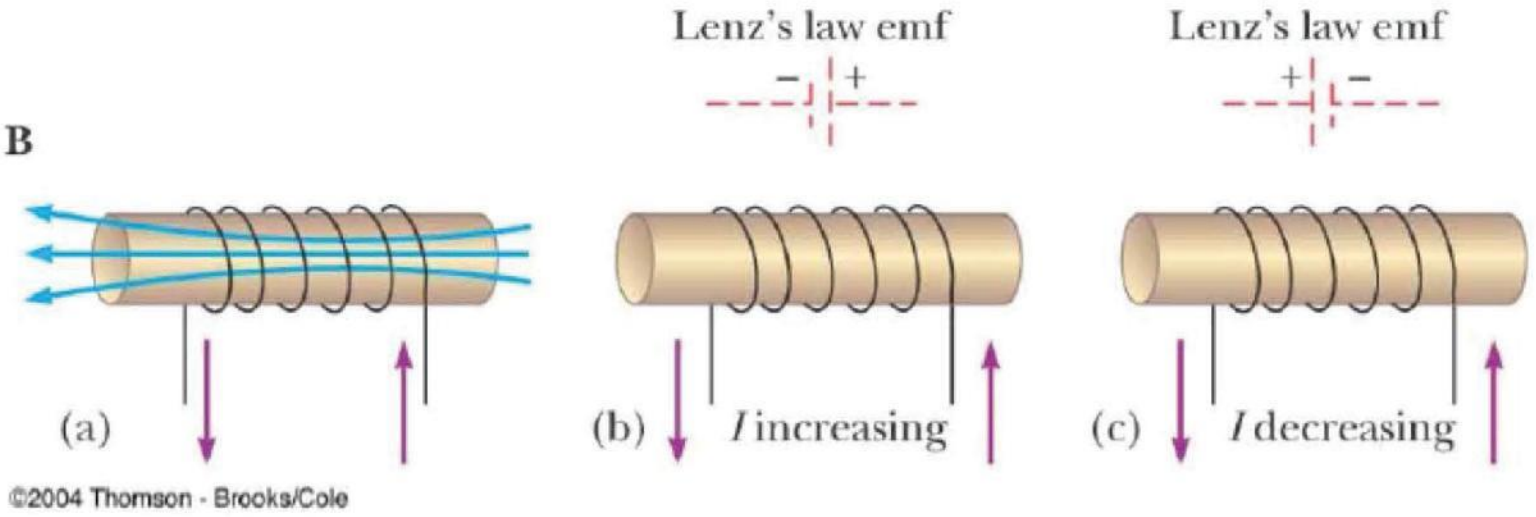
สภาพเหนี่ยวนำตัวเอง (ต่อ)

- ฟลักซ์แม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นนี้จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจร โดยมีทิศทางในลักษณะที่ต่อต้านการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กเดิม

- *ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้จะตรงกันข้ามกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นผลทำให้กระแสไฟฟ้าของวงจรเพิ่มขึ้นทีละน้อยสู่ค่าสูงสุด*

- เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า สภาพเหนี่ยวนำตัวเอง (self–inductance) และเรียกแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced emf)

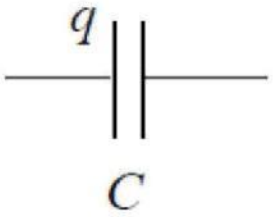
ตัวอย่างของสภาพเหนี่ยวนำตัวเองในขดลวด



- รูป (a): กระแสในขดลวดจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กชี้จากขวาไปซ้าย
- *รูป (b): ถ้ากระแสเพิ่มขึ้น ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีขั้วดังรูป*
- รูป (c): ถ้ากระแสลดลง ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีขั้วดังรูป

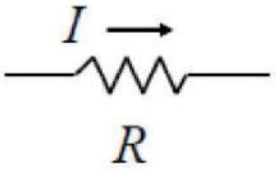
การต่อขดลวดเหนี่ยวนำ (2)

ตัวเก็บประจุ



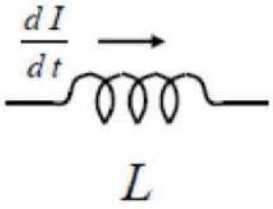
$$V_C = \frac{q}{C}$$

ตัวต้านทาน



$$V_R = IR$$

ตัวเหนี่ยวนำ

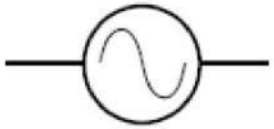


$$V_L = L\frac{dI}{dt}$$

แบตเตอรี

$$V = V_{\max}$$

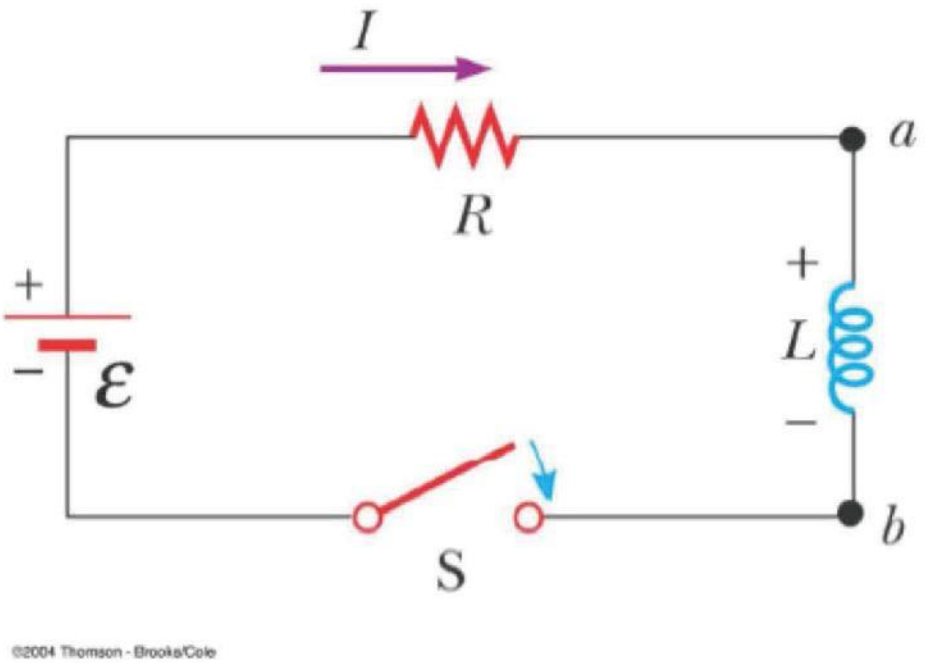
แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ



$$V = V_{\max} \sin \omega t$$

กระแสฟ้าในวงจร R–L

- วงจรไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย R และ L จะมีลักษณะดังรูปโดย ขดเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับ (back emf)



©2004 Thomson - Brooks/Cole

- เมื่อเริ่มสับสวิตซ์ กระแสในวงจรจะเพิ่มขึ้น และเกิด emf ย้อนกลับ ทำให้เกิดการต่อต้านกระแสเดิม
- เมื่อประยุกต์กฎของเคิร์ชออฟฟ์ จะได้ $\varepsilon - IR - L\frac{dI}{dt} = 0$
- กระแสในวงจรจะเป็นฟังก์ชั่นของเวลา : $I = \frac{\varepsilon}{R}\left(1 - e^{-Rt/L}\right)$

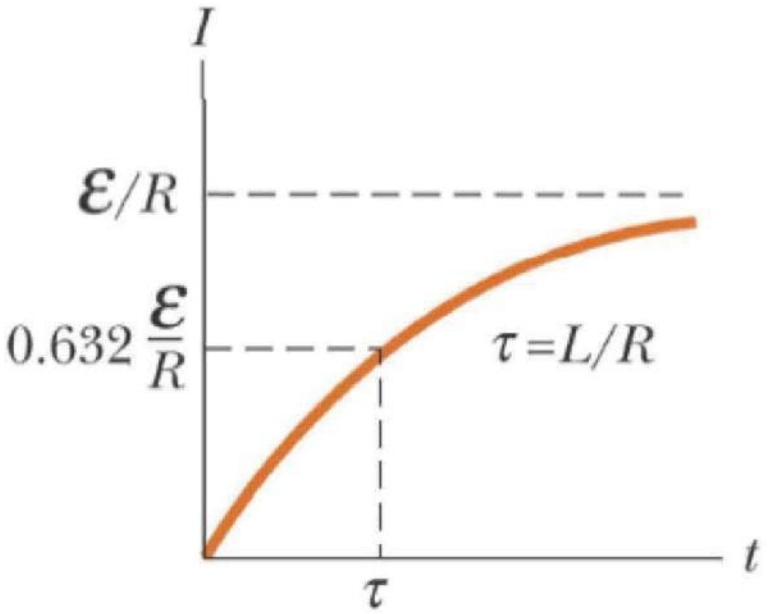
กระแสฟ้าในวงจร R–L (ต่อ)

- จะเห็นได้ว่า ขดเหนี่ยวนำจะทำให้กระแสของวงจรไม่เพิ่มสู่ค่าสูงสุดอย่างทันทีทันใด แต่จะเพิ่มแบบเลขชี้กำลัง (exponential)
- ถ้าเขียนกระแสในรูปของค่าคงตัวของเวลา $\tau = L/R$ จะได้

$$I = \frac{\varepsilon}{R}\left(1 - e^{-Rt/L}\right)$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R}\left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$

- เมื่อเวลาเท่ากับค่าคงตัวของเวลา กระแสจะมีค่าประมาณ 63 % ของกระแสสูงสุดดังรูป



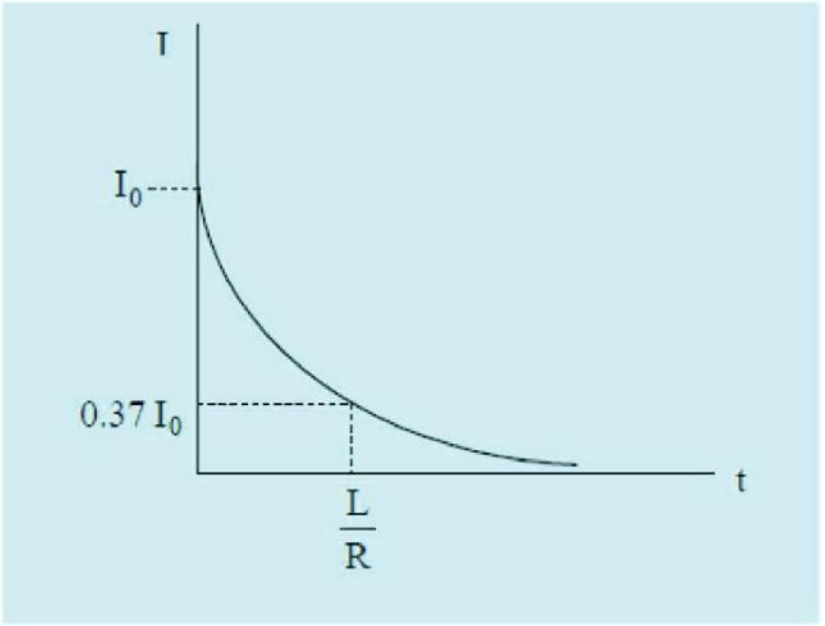
©2004 Thomson - Brooks/Cole

กระแสฟ้าในวงจร R–L (ต่อ)

- ถ้ากระแสมีค่าสูงสุดแล้วถอดแบตเตอรี่ออก สนามแม่เหล็กในขดเหนี่ยวนำจะลดลง ทำให้ขดเหนี่ยวนำจ่ายกระแสผ่านตัวต้านทาน
- กระแสไฟฟ้าของวงจรจะลดลงตามสมการ

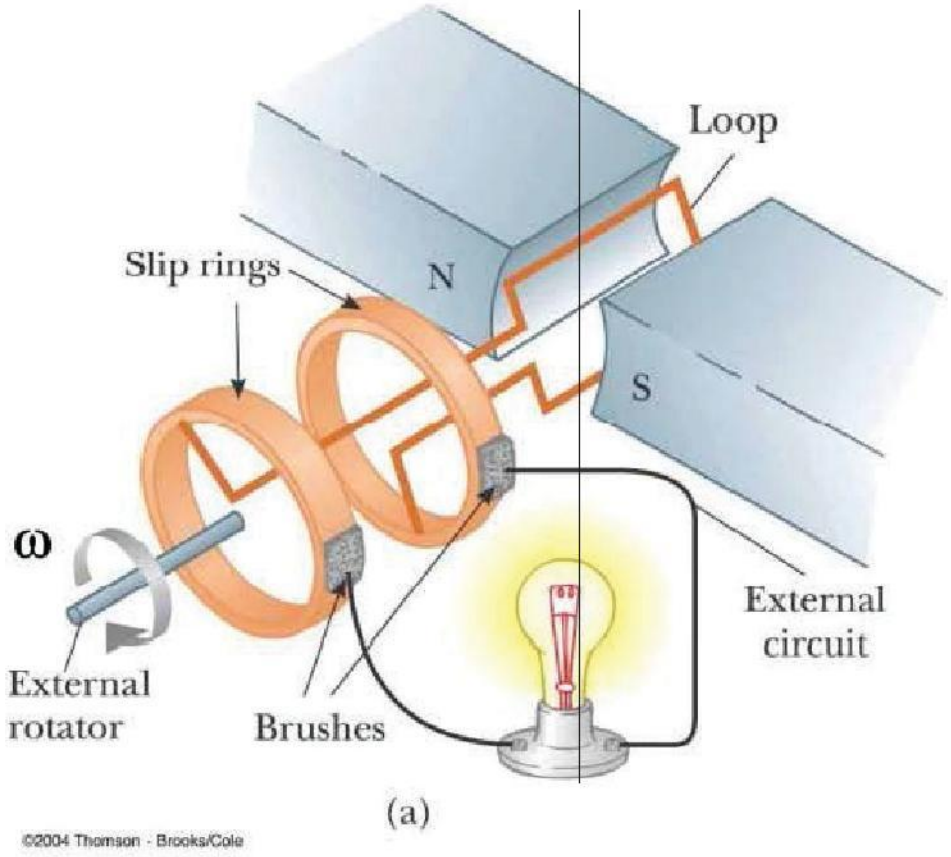
$$I = I_0 e^{-\frac{Rt}{L}} = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{Rt}{L}}$$

- เมื่อเวลาเท่ากับค่าคงตัวของเวลากระแสจะมีค่าลดลงเป็น 37 % ของค่าสูงสุด ดังรูป



วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

- เครื่องใช้ไฟฟ้าส่วนใหญ่ เช่น วิทยุ โทรทัศน์ ตู้เย็น จะใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ
- *เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับจะมีองค์ประกอบดังรูป*
- ขดลวดที่หมุนตัดเส้นแรงแม่เหล็กด้วยความถี่เชิงมุม ω จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กในขดลวดมีค่าเป็น



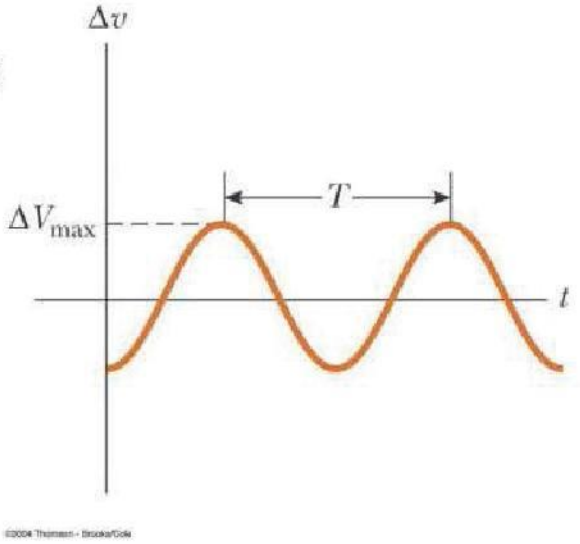
$$\Phi = \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{A} = BA\cos(\omega t)$$

วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ (ต่อ)

- จากกฎฟาราเดย์เราทราบว่าการเปลี่ยนฟลักซ์แม่เหล็กในขดลวดจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตามสมการ

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad \Rightarrow \quad \Delta v = V_{\max} \sin \omega t$$

- *ความต่างศักย์ Δv จะเป็นฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่าสูงสุดเป็น $\Delta V_{\max}$ ดังรูป*



- ค่าความต่างศักย์จะมีค่าเป็นบวกในครึ่งรอบและเป็นลบในอีกครึ่งรอบโดยมีคาบสัมพันธ์กับความถี่เชิงมุมตามสมการ

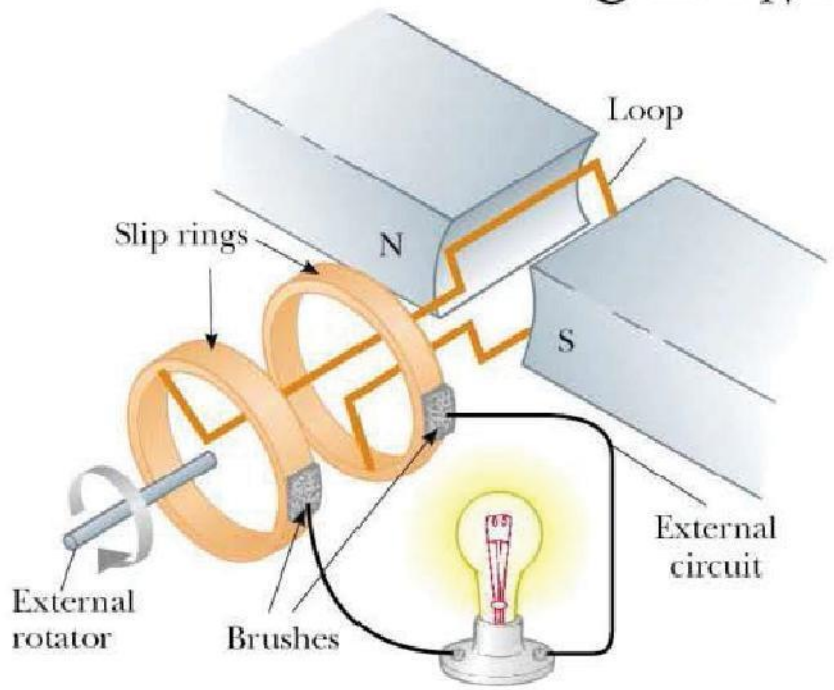
$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

- *กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ(ในประเทศไทยจะมีความถี่ 50 Hz ส่วนยุโรปและอเมริกาจะมีความถี่ 60 Hz)*

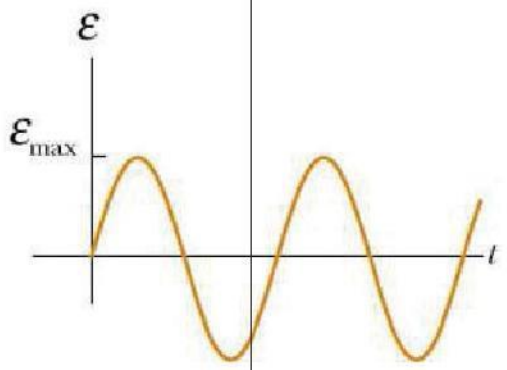
เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

$$\mathcal{E} = -N\frac{d\Phi_B}{dt} = -NAB\frac{d}{dt}(\cos \omega t)$$

$$= NAB\omega \sin \omega t$$

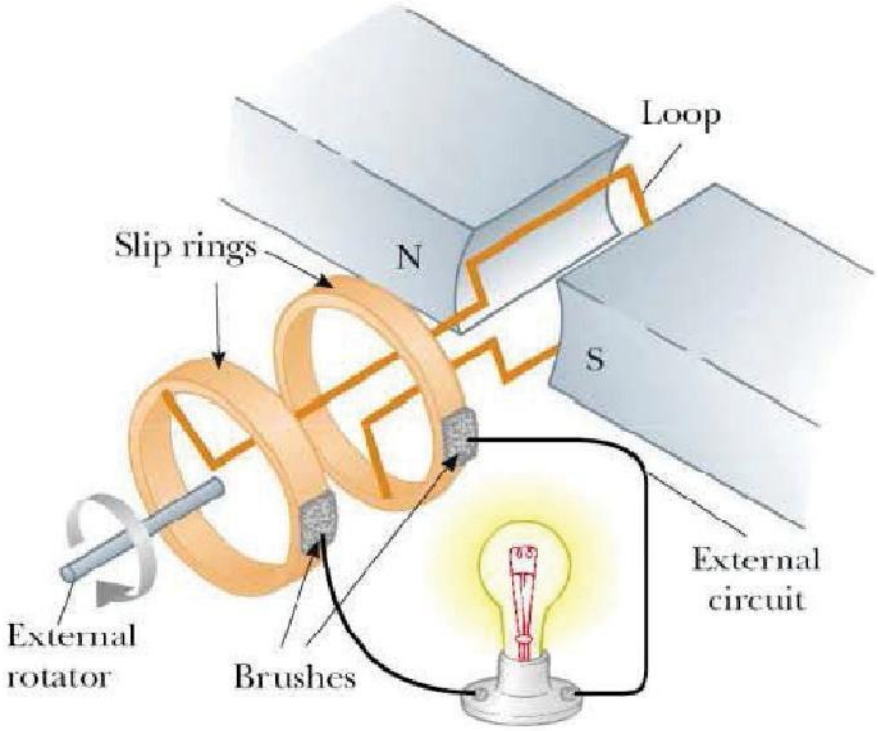


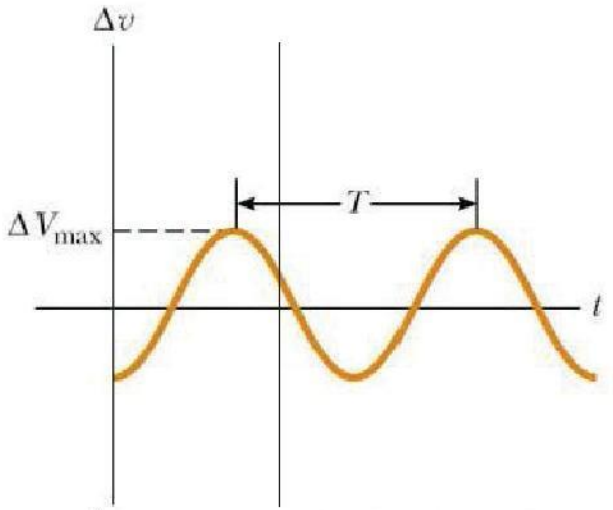
(a)



(b)

เมื่อหมุนให้วงปิดตัดสนามแม่เหล็ก ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านวงปิดจะเปลี่ยนตามเวลาทำให้เกิด **emf** และกระแสไฟฟ้าในวงจร การผลิตไฟฟ้าจะใช้พลังงานจากแหล่งต่าง ๆ เพื่อปั่นแกนหมุน





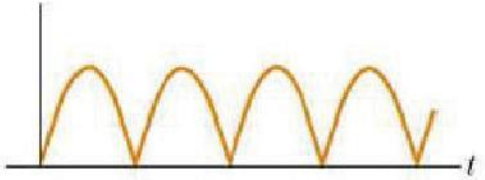
ค่าเฉลี่ยของความต่างศักย์เท่ากับศูนย์

$$\Delta v = \Delta V_{\max} \sin \omega t$$

ประเทศไทยไฟฟ้ากระแสสลับมีความถี่

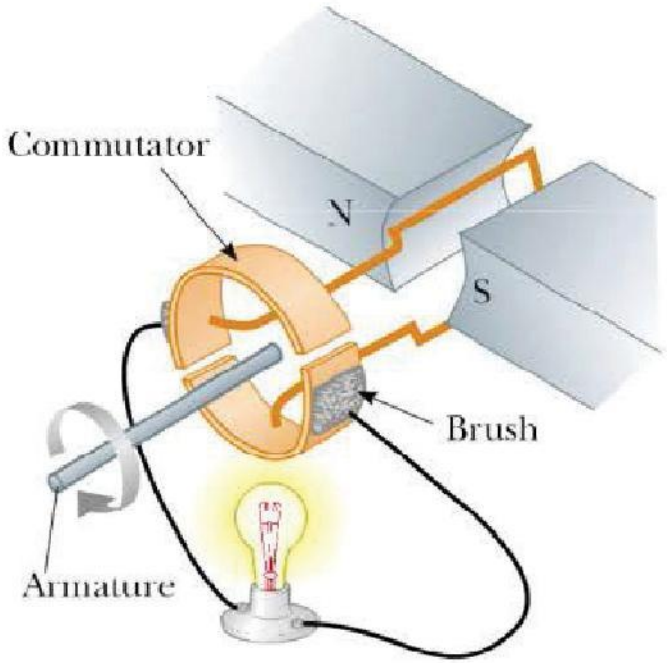
$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

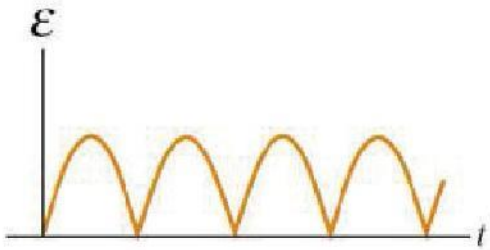


ไฟฟ้ากระแสตรง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและมอเตอร์



(a)



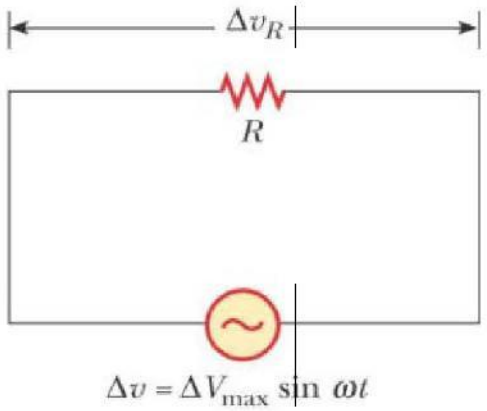
(b)

เพื่อให้ความต่างศักย์เป็นขั้วเดียวเสมอ (ค่าเฉลี่ยเป็นบวก) แกนหมุนจะต่อกับวงแหวนครึ่งวงกลม commutator เพื่อให้ศักย์ไฟฟ้าที่ปลายหนึ่งสูงกว่าอีกปลายเสมอ เมื่อระนาบของวงปิดตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก หลักการทำงานของมอเตอร์จะกลับกันแต่ให้กระแสไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดทอร์กหมุน

ตอนที่ 2 **วงจรฟ้ากระแสสลับ**

วงจรกระแสสลับที่มีตัวต้านทาน R อย่างเดียว

- วงจรไฟฟ้าชนิดนี้จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ และตัวต้านทานดังรูป

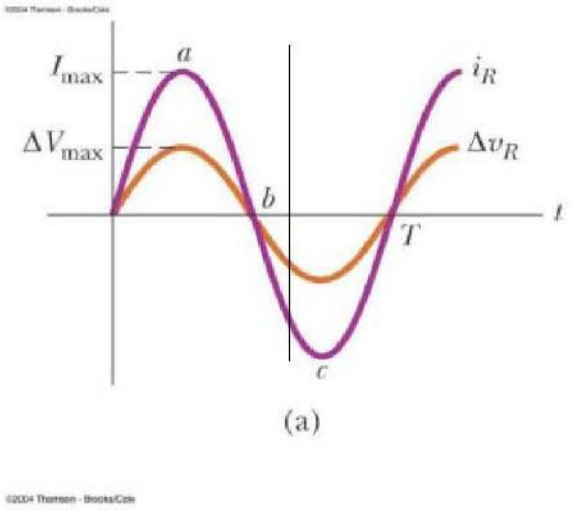


- *ความต่างศักย์คร่อม R จะมีค่าเท่ากับความต่างศักย์ของแหล่งกำเนิด*

$$\Delta v = \Delta v_R = \Delta v_{max} \sin \omega t$$

- กระแสไฟฟ้าในตัวต้านทานจะมีค่าเป็น

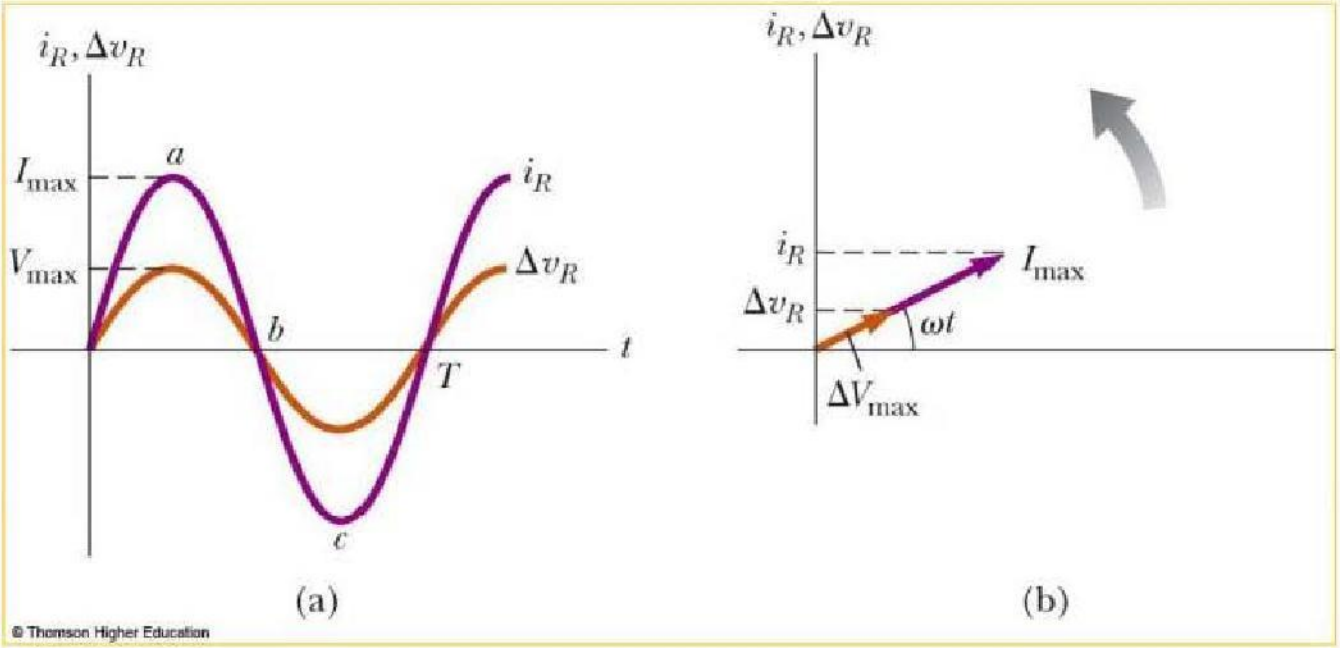
$$i_R = \frac{\Delta v_R}{R} = \frac{\Delta V_{max}}{R} \sin \omega t = I_{max} \sin \omega t$$



- *กระแสไฟฟ้าในตัวต้านทานจะมีเฟสเช่นเดียวกับความต่างศักย์ดังรูป*

เฟเซอร์ไดอะแกรม

- **เฟเซอร์ไดอะแกรม**เป็นกราฟที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของเฟสของกระแสและความต่างศักย์



- *ความสัมพันธ์เชิงเวกเตอร์ของเฟสของกระแสและความต่างศักย์จะเป็นดังรูป (b)*
- **เฟเซอร์จะหมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วเชิงมุม** ω โดยฉายาของเฟเซอร์บนแกนตั้งจะเป็นค่าบัดดลของกระแสและความต่าง ไกย์

ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยและพลังงาน

- เนื่องจากกระแสเป็นบวกเพียงครึ่งรอบ และเป็นลบในอีกครึ่งรอบ ค่าเฉลี่ยของกระแสใน 1 รอบ จึงเป็นศูนย์

- ค่าเฉลี่ยอีกชนิดที่มีความสำคัญคือ ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ย (root mean square value) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสูงสุด ดังนี้

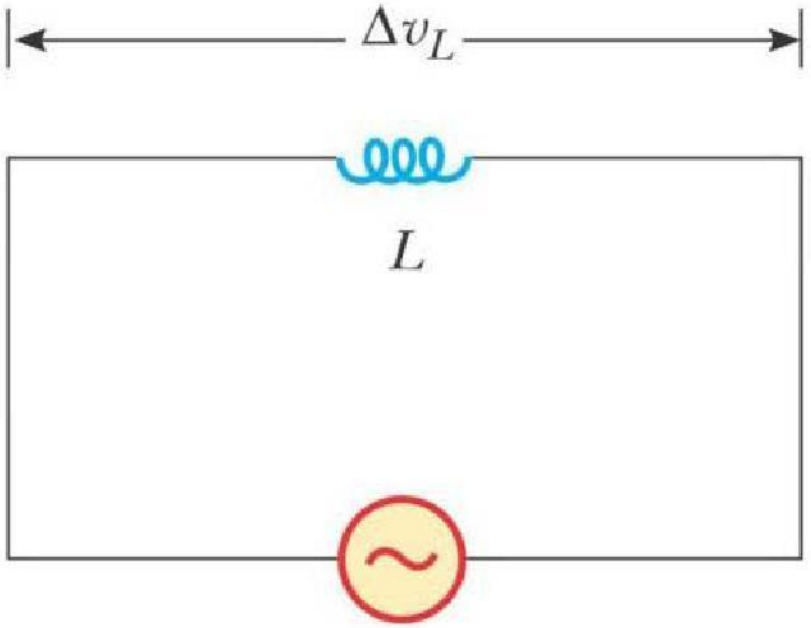
$$I_{rms} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} = 0.707\, I_{\max}$$ และ $$\Delta V_{rms} = \frac{\Delta V_{\max}}{\sqrt{2}} = 0.707\, \Delta V_{\max}$$

- เครื่องมือวัดทั้งหลาย เช่น แอมมิเตอร์ และ โวลต์มิเตอร์ จะวัดค่า rms

- ค่าพลังงานเฉลี่ยที่สะสมในตัวต้านทานจะมีค่าเป็น $P_{av} = I_{rms}^2 R$

วงจรกระแสสลับที่มีขดเหนี่ยวนำ L อย่างเดียว

- วงจรชนิดนี้จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับและขดเหนี่ยวนำ ดังรูป



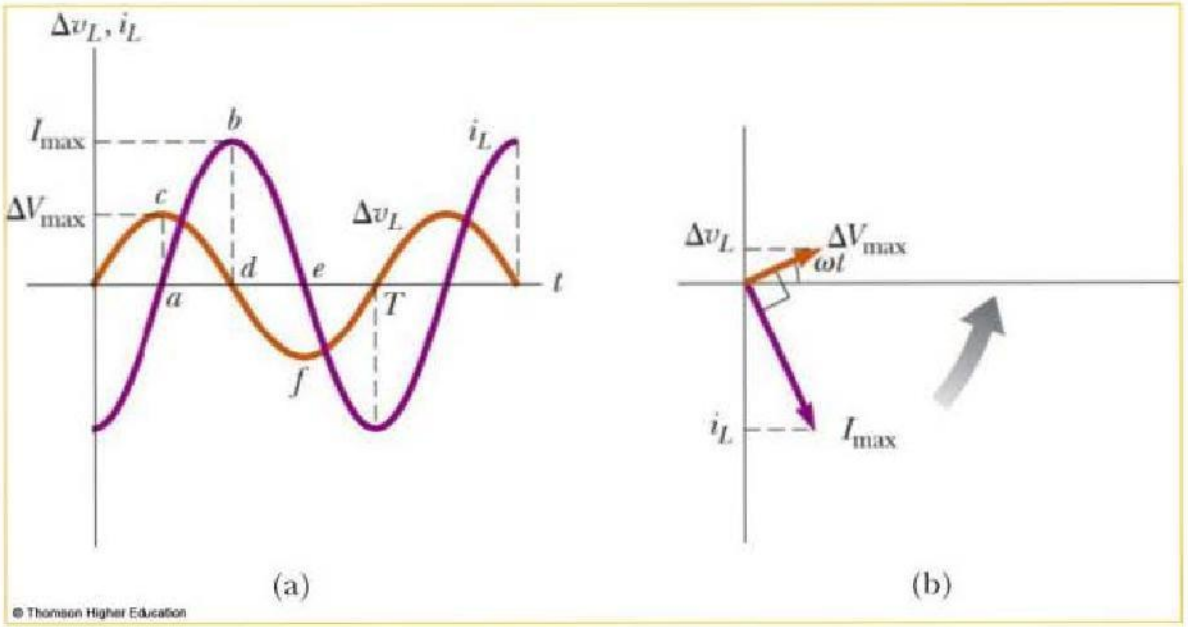
- จากกฎของเคิร์ชฮอฟฟ์ เราจะเขียนได้ว่า

$$\Delta v - \Delta v_L = 0$$

$$\Rightarrow \Delta v - L\frac{di}{dt} = 0$$

$$\Rightarrow \Delta v = L\frac{di}{dt} = \Delta V_{max} \sin \omega t$$

สมการของกระแสไฟฟ้าใน L



- สมการของกระแสใน L จะมีค่าเป็น

$$i_L = \frac{\Delta V_{max}}{L}\int \sin \omega t\, dt = -\frac{\Delta V_{max}}{\omega L}\cos\omega t = \frac{\Delta V_{max}}{\omega L}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = I_{max}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

- จะเห็นได้ว่ากระแสใน L มีเฟสตามหลังความต่างศักย์ 90° ดังแสดงในรูปข้างบนและในเฟเซอร์ไดอะแกรม

ความต้านทานจินตภาพของขดเหนี่ยวนำ

- เนื่องจากผลคูณของ ωL มีหน่วยเช่นเดียวกับความต้านทาน จึงมีชื่อเรียกว่า ความต้านทานจินตภาพของขดเหนี่ยวนำ (inductive reactant)

$$X_L = \omega L$$

- เนื่องจาก X_L ขึ้นกับ ω จึงมีค่าแตกต่างกันสำหรับค่า ω ที่แตกต่างกัน

- กระแสและความต่างศักย์ของวงจรอาจเขียนได้เป็นดังนี้

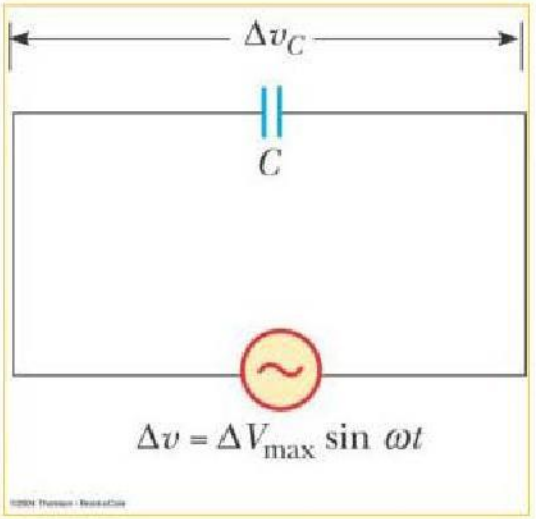
$$I_{\max} = \frac{\Delta V_{\max}}{X_L}$$

$$\Delta v_L = -L\frac{di}{dt} = -\Delta V_{\max}\sin\omega t$$

$$= -I_{\max} X_L \sin\omega t$$

วงจรกระแสสลับที่มีตัวเก็บประจุ C อย่างเดียว

- วงจรชนิดนี้จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับและตัวเก็บประจุดังรูป

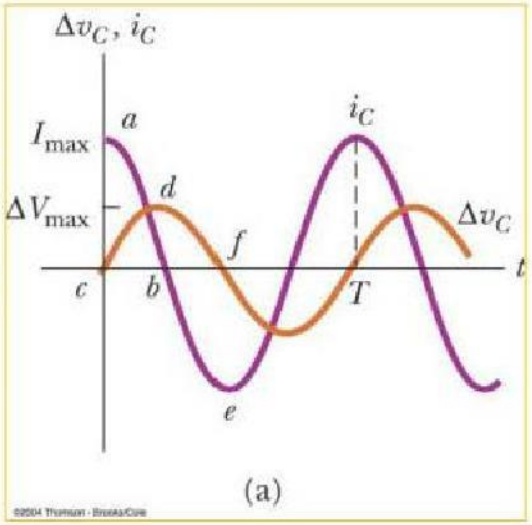


- จากกฎของเคิร์ชฮอฟฟ์เราจะเขียนได้ว่า

$$\Delta v - \Delta v_c = 0 \Rightarrow \Delta v = \Delta v_c = \Delta v_{\max} \sin \omega t$$

- ประจุในตัวเก็บประจุ จะมีค่าเป็น $q = C\Delta V_{\max} \sin \omega t$
- กระแสไฟฟ้าในตัวเก็บประจุ จะมีค่าเป็น

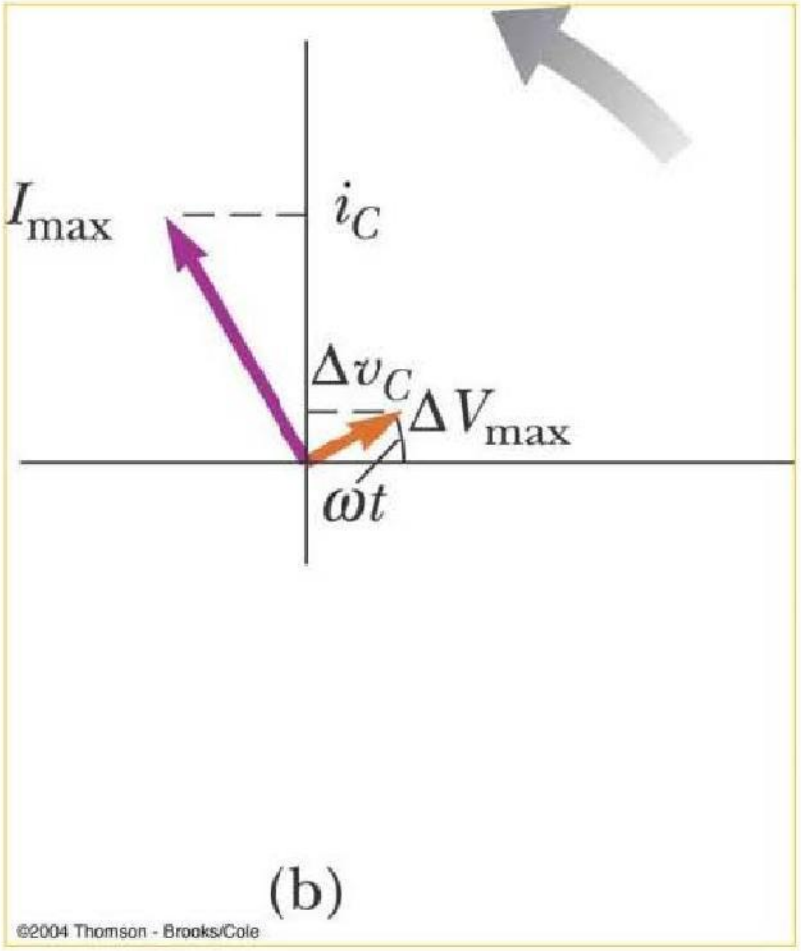
$$i_C = \frac{dq}{dt} = \omega C \Delta V_{\max} \cos \omega t \Rightarrow = \omega C \Delta V_{\max} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$



- จะเห็นได้ว่ากระแสในตัวเก็บประจุจะนำหน้าความต่างศักย์ 90° ดังรูป

เฟเซอร์ไดอะแกรมของตัวเก็บประจุ

- เฟเซอร์ของกระแสในตัวเก็บประจุจะนำหน้าความต่างศักย์ 90° ดังรูป



- กระแสสูงสุดในวงจรจะมีค่าเป็น

$$I_{max} = \omega C \Delta V_{max} = \frac{\Delta V_{max}}{(1/\omega C)}$$

- ค่าความต้านทานจินตภาพของตัวเก็บประจุ คือ

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad \text{และ} \quad I_{max} = \frac{\Delta V_{max}}{X_C}$$

เฟเซอร์ไดอะแกรมของตัวเก็บประจุ (ต่อ)

- ค่าความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุ คือ

$$\Delta v_c = \Delta v_{\max} \sin \omega t$$

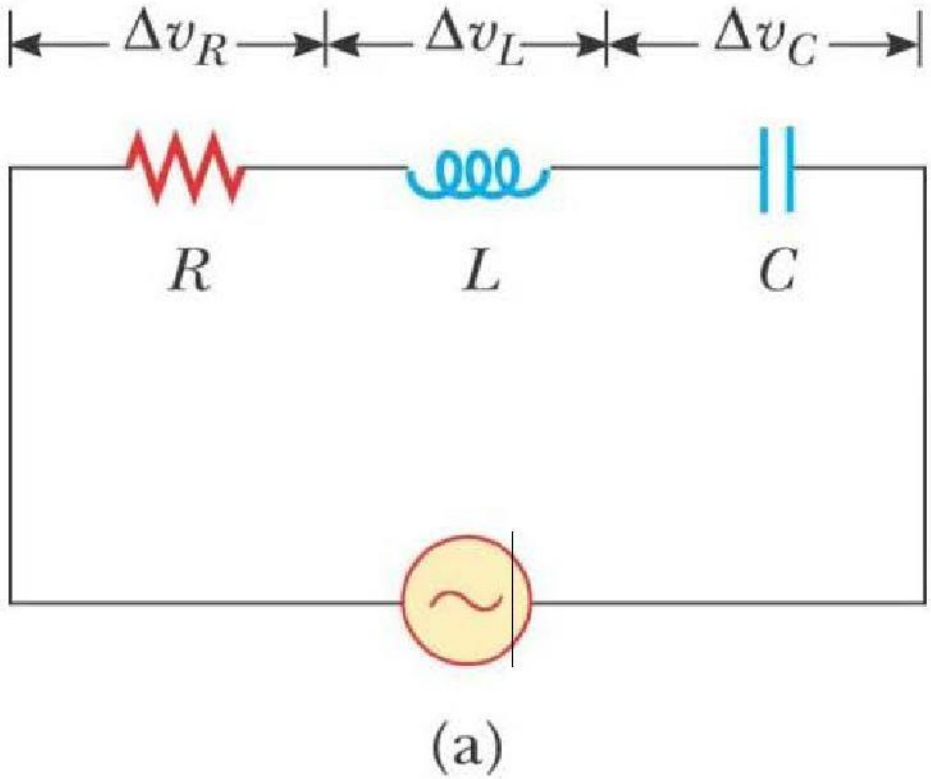
$$= I_{\max} X_C \sin \omega t$$

- เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานจินตภาพจะลดลงและกระแสสูงสุดจะเพิ่มขึ้น

- เมื่อความถี่เข้าใกล้ศูนย์ X_C จะเป็นอนันต์และกระแสจะเป็นศูนย์ ซึ่งจะเป็นเสมือนวงจรกระแสตรงและตัวเก็บประจุจะทำให้ไม่มีกระแสไหลในวงจร

วงจรกระแสสลับที่มี RLC ต่อกันอย่างอนุกรม

- วงจรกระแสสลับที่มี RLC ต่อกันอย่างอนุกรมจะมีลักษณะดังรูป
- *กระแสในวงจรที่ทุกจุดจะมีแอมพลิจูดและเฟสเท่ากันโดยกระแสจะเป็นฟังก์ชันไซน์ของเวลา*
- ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าบัดดลจะมีค่าเป็น ดังนี้



(a)

©2004 Thomson - Brooks/Cole

$$\Delta v = \Delta v_{\max} \sin \omega t$$

$$i = I_{\max} \sin(\omega t - \phi)$$

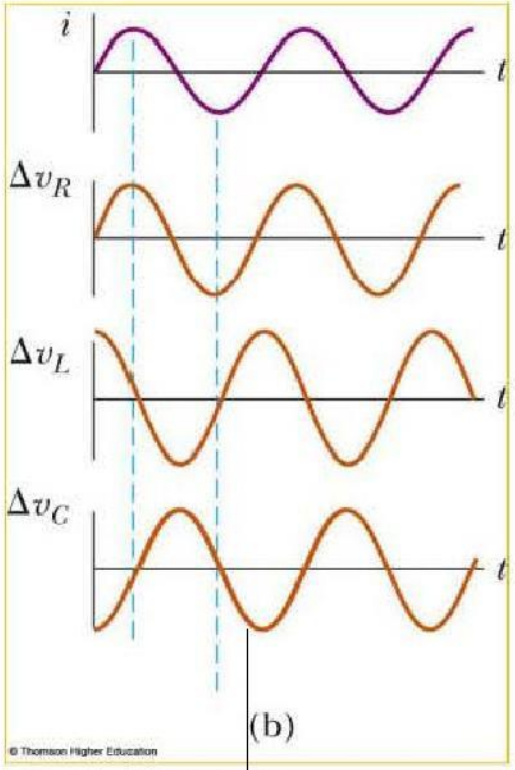
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของกระแสและความต่างศักย์

- กราฟของความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน ขดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะเป็นดังรูป
- *เฟสของความต่างศักย์คร่อม R จะเท่ากับเฟสของกระแส*

$$\Delta v_R = I_{max} R \sin \omega t = \Delta V_R \sin \omega t$$

- เฟสของความต่างศักย์คร่อม L จะนำหน้าเฟสของกระแส 90°

$$\Delta v_L = I_{max} X_L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \Delta V_L \cos \omega t$$



- เฟสของความต่างศักย์คร่อม C จะตามหลังเฟสของกระแส 90°

$$\Delta v_C = I_{max} X_C \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -\Delta V_C \cos \omega t$$

แอมพลิจูดของความต่างศักย์ใน RLC

- แอมพลิจูดหรือค่าความต่างศักย์สูงสุดในตัวต้านทาน ขดเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุจะมีค่าเป็น

$$\Delta V_R = I_{max} R$$

$$\Delta V_L = I_{max} X_L$$

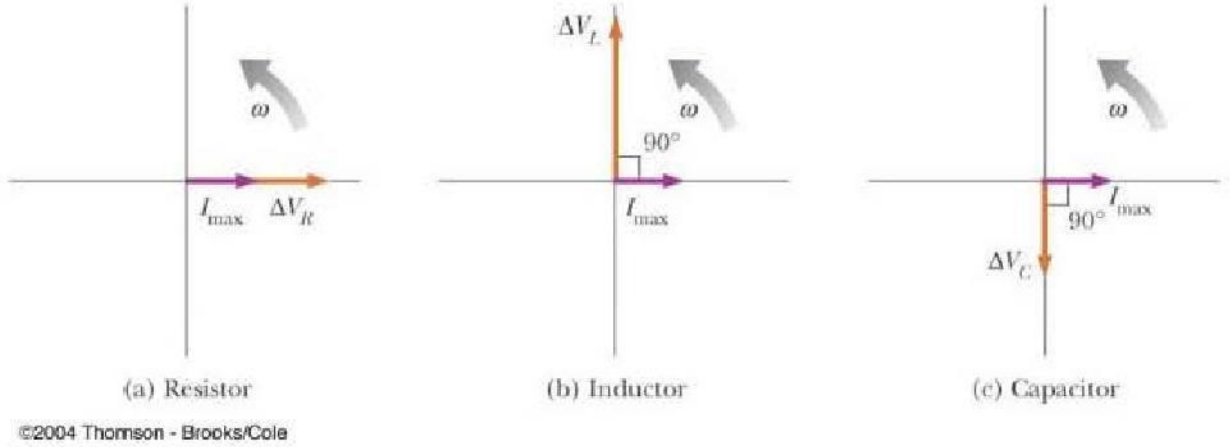
$$\Delta V_C = I_{max} X_C$$

- *ค่าความต่างศักย์รวมของวงจร คือผลบวกของความต่างศักย์ใน R L และ C*

$$\Delta v = \Delta v_R + \Delta v_L + \Delta v_C$$

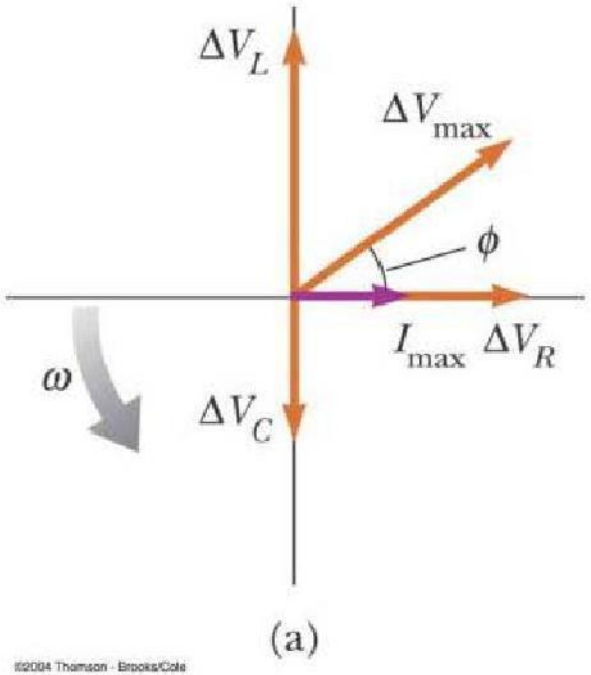
- การหาค่าความต่างศักย์รวมของวงจรจะมีความสะดวกถ้าใช้เฟเซอร์ไดอะแกรม (Phasor Diagram)

เฟเซอร์ไดอะแกรมของวงจร RLC



©2004 Thomson - Brooks/Cole

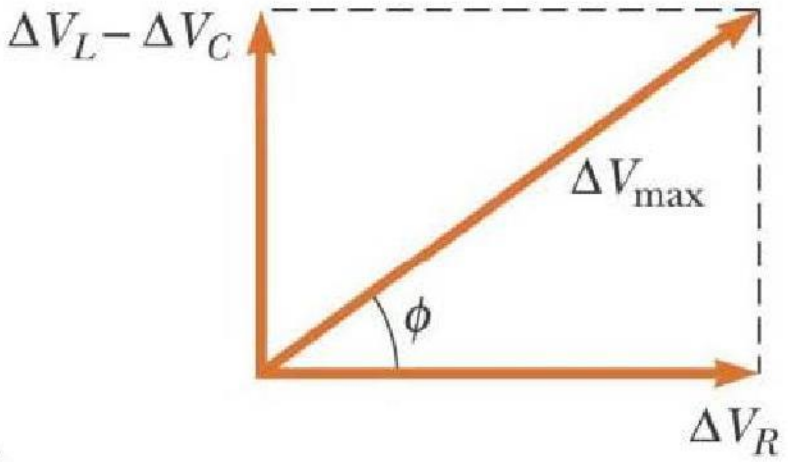
- เราสามารถแสดงเฟสของความต่างศักย์ที่ตกคร่อม R L และ C โดยใช้เฟเซอร์ไดอะแกรมดังรูป
- *ถ้าเขียนเฟสดังกล่าวในกราฟเดียวกันจะเป็นดังรูป*
- เนื่องจากกระแสใน R L และ C มีค่าเท่ากันเฟสของ I_{max} จึงแทนเฟสของกระแสใน R L และ C



©2004 Thomson - Brooks/Cole

การรวมแบบเวกเตอร์ของเฟเซอร์ไดอะแกรม

- ถ้ารวมเฟเซอร์ของความต่างศักย์ที่ตกคร่อม R L และ C แบบเวกเตอร์จะได้ดังรูป
- เมื่อรวมเฟสของความต่างศักย์ที่ตกคร่อม L และ C จะได้ผลลัพธ์เป็น $\Delta V_L - \Delta V_C$ ซึ่งตั้งฉากกับ ΔV_R



(b)

- จากรูปจะหาค่าความต่างศักย์รวมของวงจรได้เป็น

$$\Delta V_{max} = \sqrt{\Delta V_R^2 + \left(\Delta V_L - \Delta V_C\right)^2}$$

$$= \sqrt{(I_{max}R)^2 + \left(I_{max}X_L - I_{max}X_C\right)^2}$$

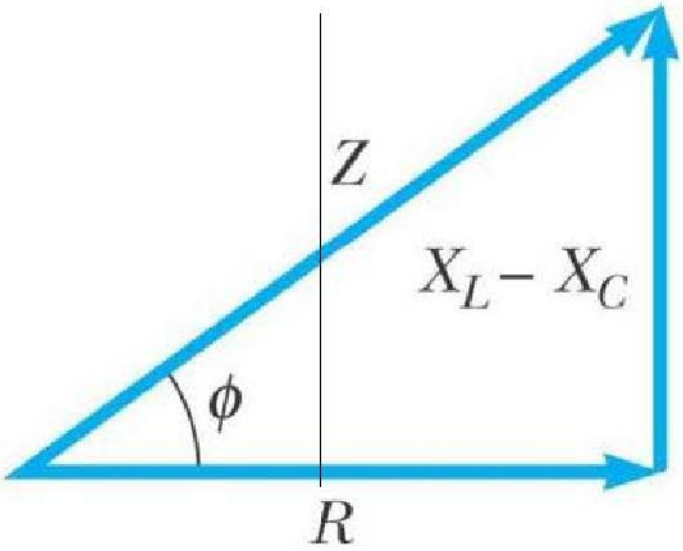
©2004 Thomson - Brooks/Cole

$$= I_{max}\sqrt{R^2 + \left(X_L - X_C\right)^2}$$

ความต้านทานเชิงซ้อนของวงจร RLC

- จากสมการของความต่างศักย์ของวงจรเราอาจเขียนสมการของกระแสไฟฟ้าในวงจร **RLC** ได้เป็น

$$I_{\max} = \frac{\Delta V_{\max}}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{\Delta V_{\max}}{Z}$$



- *เมื่อ Z คือความต้านทานเชิงซ้อน (impedance) ของวงจรซึ่งทำหน้าที่เป็นความต้านทานของวงจรและมีค่าเป็น*

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

©2004 Thomson - Brooks/Cole

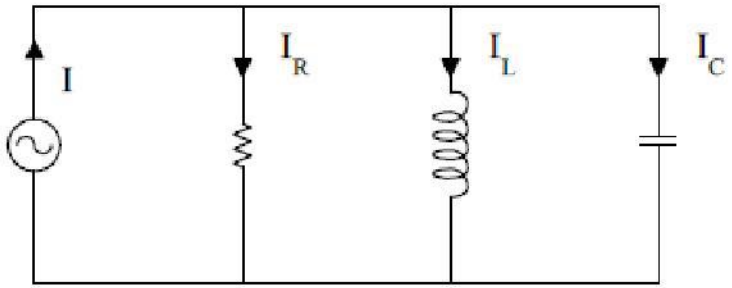
- ดังนั้นจะได้

$$\Delta V_{max} = I_{max} Z$$

- มุมเฟสระหว่างกระแสกับโวลเตจ

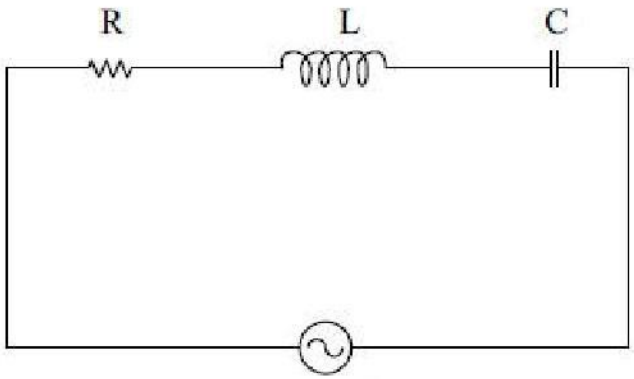
$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_L - X_C}{R}\right)$$

ตัวอย่างที่ 1 **จากรูป** วงจรขนาน กระแสไฟฟ้าผ่านความต้านทาน (I_R) = 8 A กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด (I_L) = 16 A และ กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเก็บประจุ (I_C) = 10 A จงหากระแสไฟฟ้ารวม (I)



ตัวอย่างที่ 2

จากรูป ตัวต้านทานมีความต้านทาน 12 Ω ต่ออนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำ 0.15 H และตัวเก็บประจุความจุ 100 μF แล้วต่อแหล่งจ่าย $E = 100\sqrt{2}\sin 100\pi t$ จงหากระแสไฟฟ้ารวม (I_{rms})

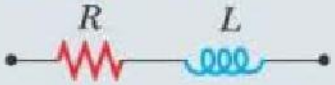


$$E = 100\sqrt{2}\sin 100\pi t$$

ค่าความต้านทานเชิงซ้อนและมุมเฟสของวงจร RLC

Table 33.1

Impedance Values and Phase Angles for Various Circuit-Element Combinations[a]

Circuit Elements	Impedance Z	Phase Angle ϕ
	R	$0°$
	X_C	$-90°$
	X_L	$+90°$
	$\sqrt{R^2 + X_C^2}$	Negative, between $-90°$ and $0°$
	$\sqrt{R^2 + X_L^2}$	Positive, between $0°$ and $90°$
	$\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$	Negative if $X_C > X_L$ Positive if $X_C < X_L$

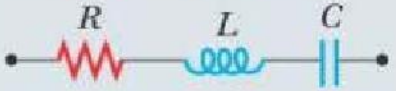
[a] In each case, an AC voltage (not shown) is applied across the elements.

© 2004 Thomson - Brooks/Cole

ค่าความต้านทานเชิงซ้อนและมุมเฟสของวงจร RLC

Table 33.1

Impedance Values and Phase Angles for Various Circuit-Element Combinations[a]

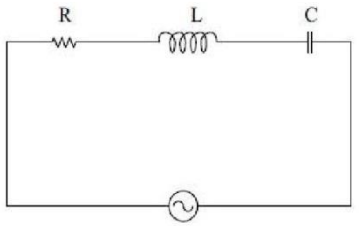
Circuit Elements	Impedance Z	Phase Angle ϕ
	R	$0°$
	X_C	$-90°$
	X_L	$+90°$
	$\sqrt{R^2 + X_C^2}$	Negative, between $-90°$ and $0°$
	$\sqrt{R^2 + X_L^2}$	Positive, between $0°$ and $90°$
	$\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$	Negative if $X_C > X_L$ Positive if $X_C < X_L$

[a] In each case, an AC voltage (not shown) is applied across the elements.

© 2004 Thomson - Brooks/Cole

แบบฝึกหัดที่ 1

ถ้าแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับอันหนึ่งมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็น $V = (200\ \text{V})\sin 2\pi ft$ และต่ออยู่กับความต้านทานภายนอกที่มีค่า 100 โอห์ม ดังรูป จงหากระแสสูงสุดในวงจร



แบบฝึกหัดที่ 2

จงหาความต้านทานจินตภาพของตัวประจุที่มี $C = 2\mu F$

(ก) ที่ความถี่ 60 Hz

(ข) ที่ความถี่ 1 MHz

แบบฝึกหัดที่ 3

ขดเหนี่ยวนำ 30 mH ต่อในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 60 Hz และมีแอมพลิจูดของศักย์ 15 V จงเขียนสมการของกระแสไฟฟ้าในวงจร

เอกสารอ้างอิง

(1) J. W. Jewett, Jr. and R. A. Serway, Physics for scientist and engineers with modern physics, 7th Ed., Brook/Cole, Singapore, 2008.

(2) R. A. Serway, Physics for scientist and engineers with modern physics, 5th Ed., Brook/Cole, Singapore, 2004.

(3) ฟิสิกส์ 2: Course Comprehensive Text, สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2549

(4) รศ.ดร.สันติ แม้นศิริ, เอกสารประกอบการสอนรายวิชา ฟิสิกส์ 2, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี