บทที่ 15 ไฟฟ้าและแม่เหล็ก

15.1 แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก

15.1.1 แม่เหล็ก (Magnet) คือ สารที่สามารถดูดและผลักกันเองได้ และสามารถดูดสารแม่เหล็กได้ โดยการเหนี่ยวนำ โดยปกติมี 2 ขั้ว คือ ขั้วเหนือ(N) และขั้วใต้(S)

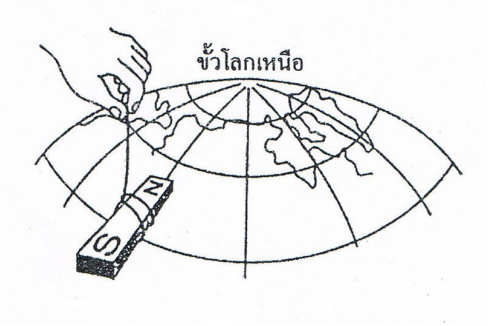
แรงที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วแม่เหล็ก จะเป็นแรงกิริยา ปฏิกิริยา คือ มีขนาดเท่ากับทิศตรงข้าม

แรงระหว่างขั้วเหนือกับขั้วเหนือ จะเกิด แรงผลัก

แรงระหว่างขั้วใต้กับขั้วใต้ จะเกิด แรงผลัก

แรงระหว่างขั้วใต้กับขั้วเหนือ จะเกิด แรงดูด

เมื่อนำแท่งแม่เหล็กแขวนให้วางตัวอยู่ในแนวระดับและสามารถหมุนได้อย่างอิสระแล้ว ขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กจะชี้ไปทางขั้วโลกเหนือ แสดงว่าที่ขั้วโลกเหนือจะมีสนามแม่เหล็กขั้วใต้ และที่ขั้วโลกใต้จะมีสนามแม่เหล็กขั้วเหนือ



การแบ่งชนิดของแม่เหล็ก

1. แบ่งโดยเอาการกำเนิดเป็นหลัก มีอยู่ 2 ประเภท คือ

1.1 แม่เหล็กธรรมชาติ (Natural Magnet) เป็นแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติทางธรณีวิทยาเรียกแร่นี้ว่า Magnetite มีสูตรทางเคมี คือ Fe_3O_4 ไม่ค่อยมีอำนาจเพราะมีอำนาจน้อย

1.2 แม่เหล็กประดิษฐ์ เป็นแม่เหล็กที่ทำขึ้นด้วยวิธีการต่างๆ

2. แบ่งโดยเอาอำนาจที่มีในแม่เหล็กเป็นหลัก มีอยู่ 2 ประเภท คือ

2.1 แม่เหล็กชั่วคราว (Temperary Magnet) มีอำนาจเมื่อมีการบังคับ การบังคับใช้วิธีเหนี่ยวนำ ใช้กระแสไฟฟ้า เหล็กที่ใช้ทำเป็น**แหล็กอ่อน**

2.2 แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) มีอำนาจอยู่นาน บังคับด้วยวิธีการเดียวกัน แต่เหล็กที่ใช้เป็น**แหล็กกล้า**

การทำแม่เหล็กทำได้หลายวิธี คือ

1. การเหนี่ยวนำ เช่น การเอาแท่งแม่เหล็กดูดตะปู แล้วเอาตะปูไปดูดเข็มเย็บผ้าต่อกันไปเรื่อยๆ

2. การถู มีหลายแบบ เช่น ถูเดี่ยว ถูแยกรอย ถูซ้ำรอย

3. ใช้กระแสไฟฟ้า

15.1.1 สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field , $\vec{B}$) คือบริเวณหรือขอบเขตที่แท่งแม่เหล็กส่งอำนาจการดึงดูดออกไปถึง อำนาจแม่เหล็กที่ส่งออกไปจากแท่งแม่เหล็ก ส่งออกมาในรูปเส้นแรงแม่เหล็ก

เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Line of Force)เป็นเส้นสมมติเสมือนว่าแท่งแม่เหล็กส่งอำนาจได้ไปถึง

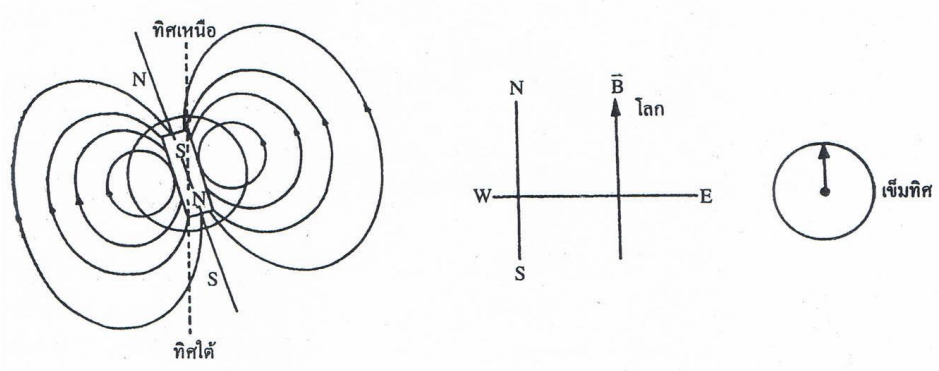
คุณสมบัติของเส้นแรงแม่เหล็ก

1. ขั้วเหนือ(N) เส้นแรงแม่เหล็กพุ่งออก
2. ขั้วใต้(S) เส้นแรงแม่เหล็กพุ่งเข้า
3. เส้นแรงแม่เหล็กจะพุ่งไม่ตัดกัน
4. เส้นแรงแม่เหล็กจะพุ่งจากขั้วเหนือไปขั้วใต้

15.1.2 สนามแม่เหล็กโลก

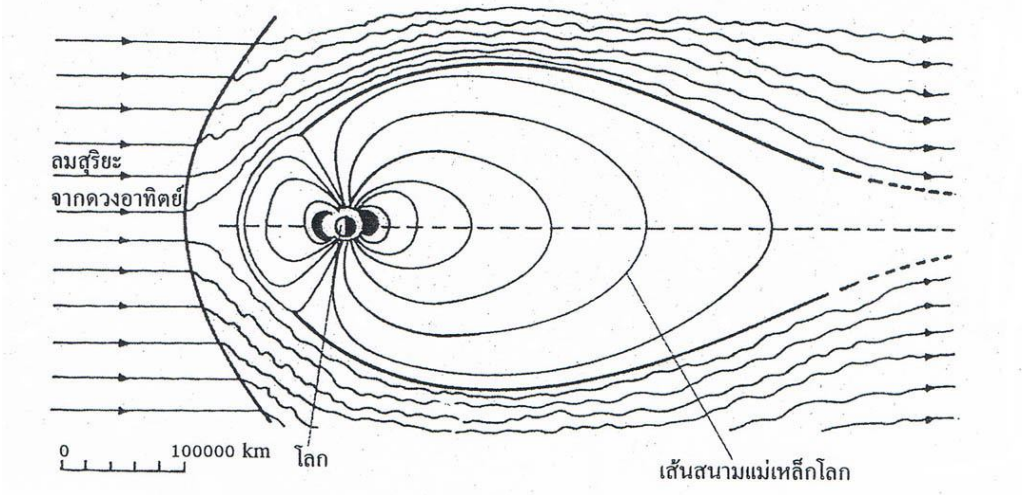
1. ที่ผิวโลกจะมีสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ
2. เข็มทิศจะชี้ไปทางทิศเหนือเสมอเพราะแม่เหล็กโลกบังคับให้ชี้ไปทางทิศเหนือ
3. ทิศเหนือจะมีขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็กโลก และทิศใต้จะมีขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กโลก

สนามแม่เหล็กโลก ทิศขนานกับผิวโลกไปทางขั้วโลกเหนือ



ประโยชน์ของสนามแม่เหล็ก

คือจะเป็นโล่ป้องกันอันตรายจาก ลมสุริยะ(solar wind) ซึ่งเป็นกระแสอนุภาคที่มีประจุส่วนใหญ่เป็นโปรตอนและอิเล็กตรอนที่ถูกขับออกมาจากดวงอาทิตย์ โดยสนามแม่เหล็กโลกจะป้องกันไม่ให้อนุภาคเหล่านั้นทำลายชั้นบรรยากาศ

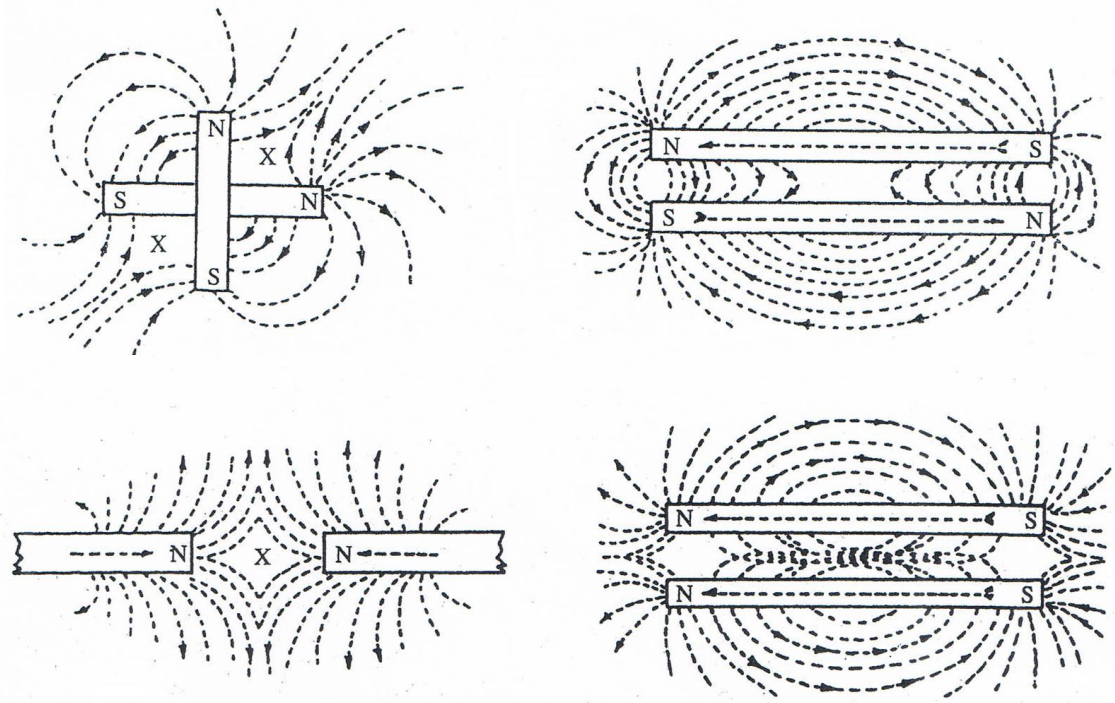


จุดสะเทิน (Neutural Point)

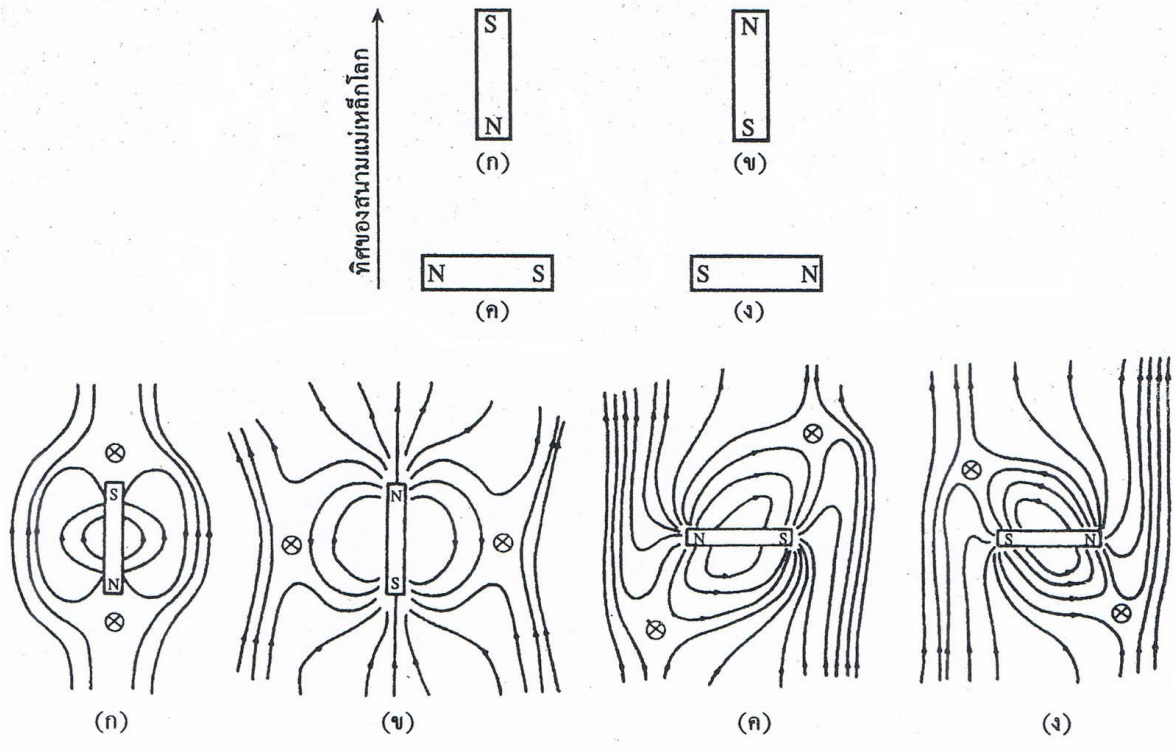
จุดสะเทิน คือจุดที่สนามแม่เหล็กหักล้างกันเป็นศูนย์ ($\sum \vec{B} = 0$)

จุดสะเทิน เป็นจุดในบริเวณสนามแม่เหล็ก โดยที่ความเข้มเนื่องจากสนามแม่เหล็กต่างๆ เกิดการหักล้างกันจนเป็นศูนย์ และเป็นตำแหน่งที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กผ่าน ถ้านำเข็มทิศไปวางไว้ตรงจุดสะเทินจะไม่มีแรงแม่เหล็กกระทำต่อเข็มทิศ เป็นผลให้เข็มทิศสามารถวางตัวได้อย่างเสรีได้ทุกทิศทาง

1. จุดสะเทินที่เกิดจากแท่งแม่เหล็ก โดยไม่คำนึงถึงสนามแม่เหล็กโลก



2. จุดสะเทินที่เกิดจากแท่งแม่เหล็ก โดยมีสนามแม่เหล็กโลกมาเกี่ยวข้อง



15.1.3 ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux , ϕ_B) คือ ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กหรือจำนวนของเส้นแรงแม่เหล็ก สัญลักษณ์ คือ " ϕ_B " มีหน่วยเป็น เวบเบอร์(Wb)

ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก หรือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) หมายถึง จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นแรงแม่เหล็กตกตั้งฉาก มีสัญลักษณ์ คือ $\vec{B}$ " เป็นปริมาณเวกเตอร์

ให้ B แทน ความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเทสลา(T) หรือ Wb/m^2

ϕ_B แทน ฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวบเบอร์(Wb)

A แทน พื้นที่ที่ตั้งฉาก มีหน่วยเป็นตารางเมตร(m^2)

จากนิยามจะได้ว่า $\mathbf{B \sin\theta = \frac{\phi_B}{A}}$

15.1.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าในสนามแม่เหล็ก

เมื่อประจุ q เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ผ่านเข้าไปในสนามแม่เล็ก B ในทิศทำมุม θ กับสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงแม่เหล็กกระทำต่อประจุ ขนาด F ตามสูตร

$$\mathbf{F = qvB \sin\theta}$$

มุม θ มี 3 แบบ ดังนี้

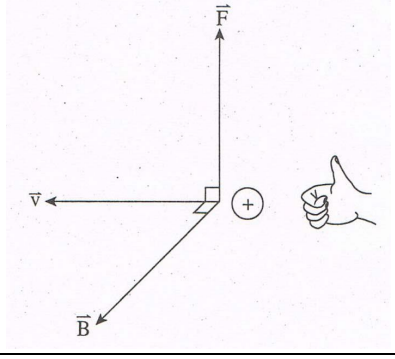
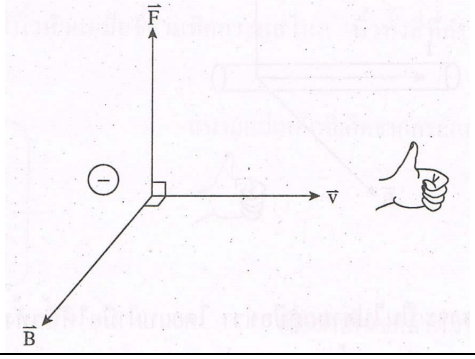
1. $\theta = 0^\circ$	2. $\theta = 90^\circ$	3. $0^\circ < \theta < 90^\circ$
$F = 0$	$F = qvB$	$F = qvB \sin\theta$
ประจุเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง	ประจุเคลื่อนที่เป็นวงกลม	ประจุเคลื่อนที่เป็นรูปตะปูเกลียว

กำหนดให้ F แทน แรงที่แม่เหล็กกระทำต่อประจุ(N) q แทน ประจุไฟฟ้า (C)

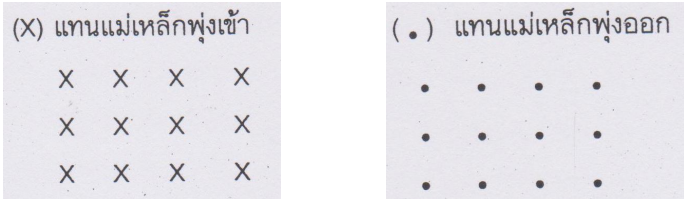
v แทน ความเร็ว (m/s) B แทน สนามแม่เหล็ก (T)

θ แทน มุมระหว่างความเร็ว v (ทิศที่ประจุวิ่ง) กับสนามแม่เหล็ก B

การหาทิศของแรงแม่เหล็กจะหาได้จากการใช้มือแสดง โดยแยกเป็น 2 กรณี ตามชนิดของประจุ คือ

1. ประจุบวก หาได้จากการใช้มือขวาแบฝ่ามือให้นิ้วทั้งสี่ชี้ตามความเร็วv แล้วงอนิ้วทั้งสี่ให้วนไปตามทิศสนามแม่เหล็ก B นิ้วหัวแม่มือที่กางอยู่จะชี้ทิศของแรง F ที่เกิดขึ้น	**2. ประจุลบ** หาได้จากการใช้มือซ้ายแบฝ่ามือให้นิ้วทั้งสี่ชี้ตามความเร็ว v แล้วงอนิ้วทั้งสี่ให้วนไปตามทิศสนามแม่เหล็ก B นิ้วหัวแม่มือที่กางอยู่จะชี้ทิศของแรง F ที่เกิดขึ้น
	

สัญลักษณ์แทนทิศสนามแม่เหล็ก



เนื่องจาก แรงแม่เหล็ก F_B ที่กระทำต่อประจุที่วิ่งในสนามแม่เหล็กนี้เป็นแรงที่ตั้งฉากเสมอ ส่งผลให้ประจุวิ่งเบี่ยงเบนเป็นทางโค้งวงกลม ตามสมการการเคลื่อนที่แบบวงกลม

$$F = \frac{mv^2}{R} = m\omega^2 R \quad \text{เมื่อ} \quad \omega = \frac{\theta}{t} = \frac{2\pi}{T}$$

รัศมีของประจุที่วิ่งในสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก จะได้ว่า

$$F_B = F_C$$

$$qvB = \frac{mv^2}{R}$$

$$R = \frac{mv}{qB}$$

และเบี่ยงเบนเป็นมุม θ ในเวลา t จะได้ว่า

$$t = \frac{m\theta}{qB} \quad \text{และ} \quad T = \frac{2\pi m}{qB}$$

อย่างไรก็ตาม ถ้ามีแรงอื่น ๆ มาหักล้าง เช่น แรงไฟฟ้าจากสนามไฟฟ้าก็อาจทำให้ประจุวิ่งเป็นเส้นตรง คือมี $\Sigma F = 0$ ก็ได้

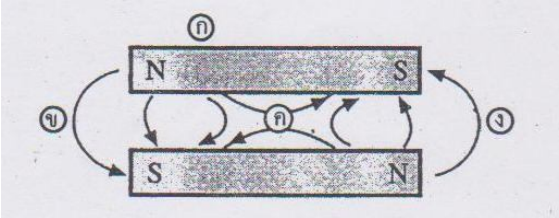
แบบฝึกหัดทบทวนที่ 15.1

1. สนามแม่เหล็กคือ
   ก. บริเวณที่มีแรงกระทำต่อประจุไฟฟ้าที่กำลังเคลื่อนที่ผ่านในบริเวณนั้น ทำให้แนวการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าเบนไปจากเดิม
   ข. จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่เส้นแรงแม่เหล็กตั้งได้ฉากนั้น
   ค. บริเวณที่มีแรงกระทำต่อเข็มทิศที่วางอยู่ในบริเวณนั้น
   ง. ถูกทั้งข้อ1 ข้อ2 และ ข้อ3
2. สนามแม่เหล็กที่เกิดจากแท่งแม่เหล็กมีคุณสมบัติ
   1. เป็นปริมาณเวกเตอร์
   2. มีความเข้มสม่ำเสมอทุก ๆ จุด
   3. มีทิศจากขั้วใต้ไปยังขั้วเหนือผ่านภายในแท่ง
   4. มีแรงกระทำต่อสารแม่เหล็กที่วางในบริเวณนั้น

   คำตอบที่ถูกต้องคือข้อใด
   ก. ข้อ 1 , 2 และ 3
   ข. ข้อ 1 , 2 และ 4
   ค. ข้อ 1 , 3 และ 4
   ง. ข้อ 2 , 3 และ 4

3. แม่เหล็ก 2 แท่ง ขนาดเท่ากันทุกประการวางขนานกันดังรูป จุดสะเทินจะอยู่ในตำแหน่งใด

1. ก
2. ข
3. ค
4. ง



4. ถ้าความเข้มของสนามแม่เหล็กเป็น 4 เทสลา ทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กจำนวน0.002 เวบเบอร์ จงหาพื้นที่ที่ตกตั้งฉากว่ามีค่าเท่าใด

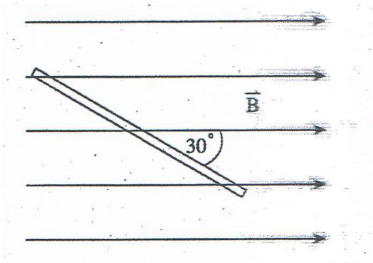
ก. 5×10^{-3} m^2 ข. 5×10^{-4} m^2 ค. 8×10^{-3} m^2 ง. 8×10^{-4} m^2

5. ขดลวดตัวนำมีพื้นที่ 10 cm^2 วางอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กขนาดสม่ำเสมอ10 T จงหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวด เมื่อระนาบของขดลวดทำมุมตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก

ก. 1×10^{-2} Wb ข. 1×10^{-3} Wb ค. 1×10^{-4} Wb ง. 1×10^{-5} Wb

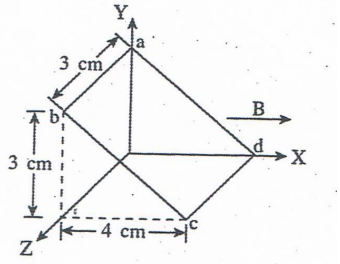
6. ขดลวดของมอเตอร์ไฟฟ้ามีพื้นที่หน้าตัด 0.2 m^2 วางอยู่ในสนามแม่เหล็ก 4 เทสลา โดยมีแนวระนาบของขดลวดทำมุม 30 องศา กับสนามแม่เหล็กดังรูป จงคำนวณหาค่าฟลักซ์แม่เหล็ก ที่ผ่านขดลวดเท่ากับเท่าใด

ก. 0.4 Weber
ข. 0.6 Weber
ค. 0.8 Weber
ง. 1.0 Weber



7. จงหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดสี่เหลี่ยมผืนผ้า abcd ถ้ามีสนามแม่เหล็ก B ขนาดสม่ำเสมอ3 เทสลา ในทิศที่ขนานแกน X ดังรูป

ก. 1.8×10^{-3} Weber ข. 2.4×10^{-3} Weber
ค. 2.7×10^{-3} Weber ง. 3.6×10^{-3} Weber



8. อิเล็กตรอนวิ่งด้วยความเร็ว10^7 เมตรต่อวินาที เข้าไปในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กขนาด10^{-5} เทสลา ขนาดของแรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนเป็นเท่าใด

ก. 1.6×10^{-16} N ข. 1.6×10^{-17} N ค. 1.6×10^{-18} N ง. 1.6×10^{-19} N

9. อนุภาคมวล 0.5 กรัม มีประจุ 2.5×10^{-8} C เคลื่อนที่ด้วยความเร็วตามแนวระดับ 8×10^6 เมตรต่อวินาที เข้าไปในสนามแม่เหล็กซึ่งมีทิศตั้งฉากกับความเร็ว ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนมีรัศมีความโค้ง 0.2 เมตร จงหาขนาดของสนามแม่เหล็ก

ก. 5×10^{10} T ข. 5×10^{11} T ค. 8×10^{10} T ง. 8×10^{11} T

10. (มข.50) นำอิเล็กตรอนตัวหนึ่งไปวางนิ่งไว้ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่อย่างไรในสนามแม่เหล็กนี้

1. อิเล็กตรอนจะอยู่นิ่งกับที่เหมือนเดิม
2. อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก
3. อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก
4. อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่สวนทางทิศทางของสนามแม่เหล็ก

11. (มข.51) อิเล็กตรอนตัวหนึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 2.0×10^{6} m/s เข้าไปในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 5.0×10^{-31} เทสลา จงหาขนาดของแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่กระทำต่ออิเล็กตรอน **กำหนดให้** $m_e = 9.1\times10^{-31}$ kg และ $e = 1.6\times10^{-19}$ C

1. 1.6×10^{-15} นิวตัน
2. 3.2×10^{-15} นิวตัน
3. 9.1×10^{-15} นิวตัน
4. 18.2×10^{-15} นิวตัน

12. (มข.51) จากโจทย์ข้อที่11 จงหากำลังงานของแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กบนอิเล็กตรอนว่ามีค่าเท่าไร

1. ศูนย์
2. 6.4×10^{-9} วัตต์
3. 18.2×10^{-21} วัตต์
4. 36.4×10^{-21} วัตต์

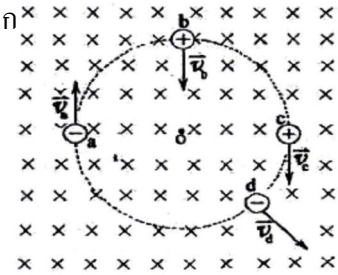
13. (มข.54) ถ้ามีอนุภาคขนาดเล็กเคลื่อนที่ตรงเข้าไปในสนามแม่เหล็กด้วยความเร็วคงที่แล้วผ่านออกมาด้วยความเร็วเดิมโดยไม่เกิดแรงใด ๆ กระทำต่ออนุภาค ข้อสรุปใดไม่ถูกต้องที่สุด

1. อนุภาคตัวนี้ไม่มีประจุ
2. อนุภาคตัวนี้เคลื่อนที่เข้าไปในแนวตั้งฉากกับทิศทางสนามแม่เหล็ก
3. อนุภาคตัวนี้เคลื่อนที่เข้าไปในแนวขนานกับทิศทางสนามแม่เหล็ก
4. อนุภาคตัวนี้มีมวลมากเกินไปจนสนามแม่เหล็กไม่มีผลต่อการเคลื่อนที่

14. (มข.55) เมื่อขดลวดเหนี่ยวนำ (ก) และ (ข) เป็นขดลวดเดียวหมุนอยู่ในสนามแม่เหล็กคงที่เดียวกัน แต่เป็นรูปที่ เวลาต่างกัน เมื่อขดลวดอยู่ในระนาบกระดาษ ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่ผ่านขดลวดและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำข้อใดถูกต้อง

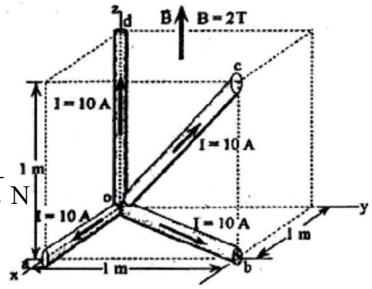
1. ฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กในรูป (ก) มีค่ามากที่สุด กระแสเหนี่ยวนำไหลทวนเข็มนาฬิกา
2. ฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กในรูป(ก) มีค่าเป็นศูนย์ กระแสเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์
3. ฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กในรูป(ข) มีค่ามากที่สุด กระแสเหนี่ยวนำไหลทวนเข็มนาฬิกา
4. ฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กในรูป(ข) มีค่าเป็นศูนย์ กระแสเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์

15. (มข.55) ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กขนาดคงที่ B มีทิศทาพุ่งเข้าหากระดาษ เมื่อปล่อยอนุภาค a,b,c และ d ซึ่งมีประจุขนาด e เท่ากัน ให้เคลื่อนที่ในระนาบของกระดาษด้วยอัตราเร็ว v ที่เท่ากันในทิศทางต่างๆ กัน ดังรูป ขนาดและทิศทางของแรงที่สนามแม่เหล็กทำกับอนุภาค ข้อใดถูก



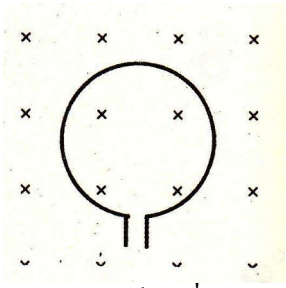
1. แรงที่ทำกับ a มีทิศทางพุ่งเข้าหาจุด o มีขนาดเท่ากับ evB
2. แรงที่ทำกับ b มีทิศทางพุ่งออกจากจุด o มีขนาดเท่ากับ evB
3. แรงที่ทำกับ c มีทิศทางพุ่งเข้าหาจุด o มีขนาดเท่ากับ evB
4. แรงที่ทำกับ d มีขนาดเท่ากับ o

16. (มข.55) ในปริมาตรที่ล้อมรอบด้วยกล่องสี่เหลี่ยมลูกบาศก์กว้างด้านละ 1 m ในรูปที่สนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 2 T ชี้ไปตามแนวแกน z เส้นลวด oa, ob, oc และ od นำกระแสไฟฟ้า 10 A ไหลออกจากมุมเดียวกัน ดังรูป เมื่อให้กระแสในเส้นลวดครั้งละเส้นแรงที่สนามแม่เหล็กทำกับเส้นลวดข้อใดถูกต้อง



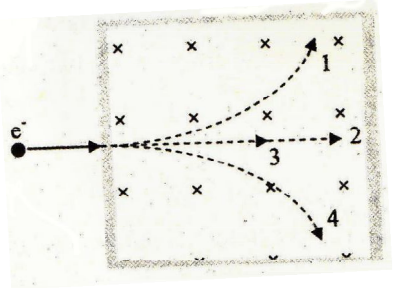
1. แรงที่ทำกับเส้นลวด oa มีทิศทางไปทางซ้ายมือ (-y) มีขนาด 10 N
2. แรงที่ทำกับเส้นลวด ob มีทิศทางไปทางชี้ลง (-z) มีขนาด $20\sqrt{2}$ N
3. แรงที่ทำกับเส้นลวด oc มีทิศทางไปพุ่งขนานกับแกน x มีขนาด $20\sqrt{2}$ N
4. แรงที่ทำกับเส้นลวด od มีค่าเป็นศูนย์

17. (มข.56) ขดลวดดังรูป วางในสนามแม่เหล็กทิศทางพุ่งเข้า กรณีในข้อใดที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในขดลวด ไหลในทิศทางตามเข็มนาฬิกา



1. ขนาดสนามแม่เหล็กกำลังลดลง
2. ขนาดสนามแม่เหล็กกำลังเพิ่มขึ้น
3. ขดลวดกำลังเคลื่อนที่ไปทางซ้าย
4. ขดลวดกำลังเคลื่อนที่ไปทางขวา

18. (มข.56) อิเล็กตรอนถูกยิงจากเครื่องเร่งอนุภาคเข้าไปในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอดังรูป สนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งเข้าไปในกระดาษอิเล็กตรอนจะมีทิศทางการเคลื่อนที่อย่างไร



1. โค้งขึ้นด้านบน
2. ตรงไปด้วยอัตราเร็วคงที่
3. ตรงไปแต่มีอัตราเร็วคงที่
4. โค้งลงด้านล่าง

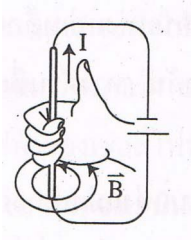
19. ถ้านำอิเล็กตรอนไปวางไว้ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่อย่างไร (มข.57)

1. อยู่นิ่งที่เดิม
2. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่
3. เคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่
4. เคลื่อนที่เป็นวงกลม

15.2 กระแสไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก

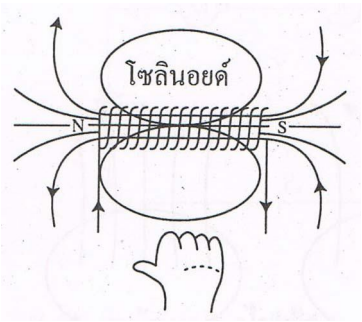
เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำในลักษณะดังนี้

สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลในเส้นลวด



กระแสที่ไหลในขดลวดจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมารอบ ๆ ลวดนั้นโดยจะมีทิศวนตามกฎมือขวา คือใช้มือขวาให้นิ้วหัวแม่มือชี้ตามทิศกระแสไหล นิ้วทั้งสี่ที่กำวนรอบลวดจะแสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแส $B = 2 \times 10^{-7} \frac{I}{d}$

สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลในขดลวดโซลินอยด์



เมื่อนำเส้นลวดมาขดเป็นวง เกิดเป็นขดลวดโซลินอยด์ แล้วให้กระแสไหล สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีสภาพเหมือนเป็นแท่งแม่เหล็ก โดยขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะหาได้จากการใช้มือขวา กำให้นิ้วทั้งสี่วนตามกระแสที่ไหลในขดลวด นิ้วหัวแม่มือจะชี้ไปด้านปลายที่เป็นขั้วเหนือของแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นมา

15.3 แรงที่แม่เหล็กกระทำต่อลวดที่มีกระแสผ่านและอยู่ในสนามแม่เหล็ก

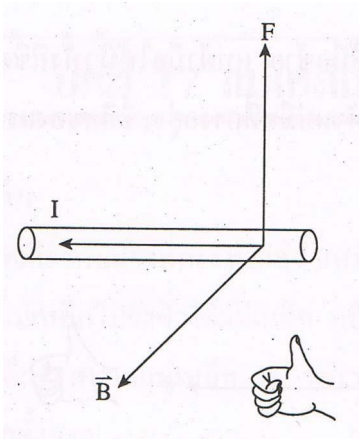
เมื่อประจุเคลื่อนที่ในลวด ก็แสดงว่าลวดนั้นมีกระแสไฟฟ้าไหล ดังนั้น จึงเกิดแรงแม่เหล็กกระทำต่อลวดได้ ตามสูตร

$$F = IlB\sin\theta$$

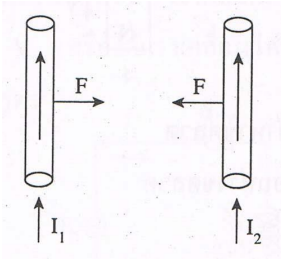
เมื่อ F แทน แรงที่แม่เหล็กกระทำต่อลวด(N) l แทน ความยาวของเส้นลวด (m)
B แทน สนามแม่เหล็ก(T) θ แทน มุมระหว่าง I กับ B

ทิศของแรงจะเป็นไปตามกฎมือขวา โดยแบฝ่ามือให้นิ้วทั้งสี่ชี้ตามทิศกระแส I งอนิ้วทั้งสี่วนไปตามทิศสนามแม่เหล็กB นิ้วหัวแม่มือที่กลางอยู่จะชี้ทิศของแรงF ที่กระทำต่อลวด

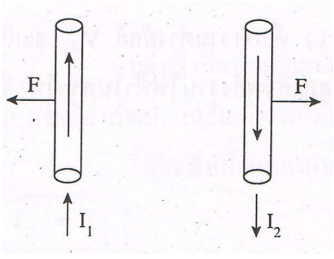
แรงแม่เหล็กที่กระทำต่อลวดที่มีกระแสไหลในสนามแม่เหล็กจะกระทำต่อลวดทั้งเส้นที่อยู่ในสนามแม่เหล็กจึงส่งผลให้ลวดเคลื่อนที่ไปทั้งเส้น ซึ่งจะเป็นการเคลื่อนที่แบบมีความเร่งตามกฎนิวตัน คือ $\Sigma F = ma$ และถ้ามีแรงเคลื่อนอื่น ๆ มากระทำต่อลวดอีก ก็อาจทำให้ลวดอยู่ในสภาพสมดุล คือ $\Sigma F = 0$ ก็ได้



15.4 แรงระหว่างลวดตัวนำสองเส้นที่ขนานกันและมีกระแสไหลผ่าน



กระแสไหลทางเดียวกัน เกิดแรงดูด



กระแสไหลสวนทางกัน เกิดแรงผลัก

การหาขนาดของแรงหาได้จากสูตร $F = 2 \times 10^{-7} \frac{I_1 I_2}{d} l$

เมื่อ l แทน ความยาวของเส้นลวด d แทน ระยะห่างระหว่างลวด

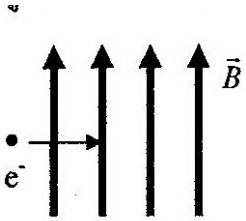
F แทน แรงระหว่างลวดขนาน I_1, I_2 แทน กระแสที่ไหลในเส้นลวด

แบบฝึกหัดทบทวน 15.4

1. (มข.50) เส้นลวด 2 เส้นวางขนานกัน และมีกระแสไหลในทางเดียวกัน จะเกิดแรงอย่างไรระหว่างเส้นลวดทั้งสอง

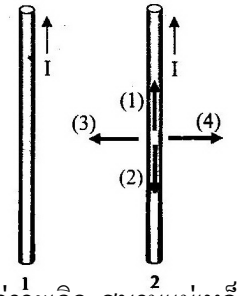
   1. เกิดแรงดึงดูดระหว่างเส้นลวดทั้งสอง
   2. เกิดแรงผลักระหว่างเส้นลวดทั้งสอง
   3. ไม่เกิดแรงระหว่างเส้นลวดทั้งสอง
   4. ไม่สามารถบอกได้เพราะข้อมูลไม่เพียงพอ

2. (มข.52) อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าไปในสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉาก ดังรูป จะเกิดแรงกับอิเล็กตรอนอย่างไร



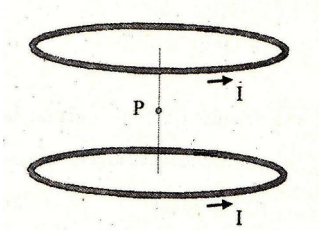
   1. ไม่เกิดแรงกับอิเล็กตรอน
   2. เกิดแรงในทิศทางชี้ขึ้น
   3. เกิดแรงในทิศทางชี้ลง
   4. เกิดแรงในทิศพุ่งเข้าในกระดาษ

3. (มข.52) เส้นลวด 2 เส้นวางขนานกันมีกระแสไหลเท่ากัน เท่ากับI ในทิศทางเดียวกัน ดังรูปจะเกิดแรงระหว่างเส้นลวดทั้งสอง แรงที่เกิดขึ้นกับลวดเส้นที่สองมีทิศทางอย่างไร



   1. ชี้ขึ้นตามทิศทางของกระแส
   2. ชี้ลงในทิศตรงข้ามกับกระแส
   3. ชี้ไปทางซ้ายเข้าหาลวดเส้นที่หนึ่ง
   4. ชี้ออกไปทางขวา

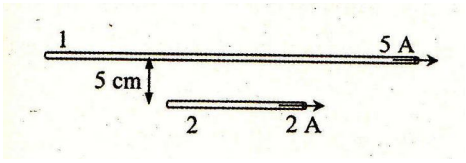
4. (มข.56) ขดลวดวงกลม 2 วง ดังรูป มีกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวกัน จงหาว่าจะเกิด สนามแม่เหล็กที่จุด P กึ่งกลางระหว่างขดลวดอย่างไร



   1. วนในทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า
   2. ชี้ขึ้นไปด้านบน
   3. ชี้ลงด้านไปด้านล่าง
   4. สนามแม่เหล็กเท่ากันศูนย์

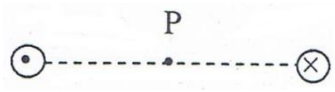
5. (มข.56) ลวดเส้นหนึ่งยาว 1 เมตร มีกระแสไฟฟ้าไหล 5 แอมแปร์ ถ้านำลวดเส้นที่สองยาว 20 เซนติเมตร จะทำให้เกิดแรงจากลวดเส้นที่หนึ่งกระทำกับลวดเส้นที่สองอย่างไร

1. ผลักลงด้านล่างด้วยขนาด 4.0×10^{-5} นิวตัน
2. ดึงขึ้นด้านบนด้วยขนาด 4.0×10^{-5} นิวตัน
3. ผลักลงด้านล่างด้วยขนาด 8.0×10^{-4} นิวตัน
4. ดึงขึ้นด้านบนด้วยขนาด 8.0×10^{-6} นิวตัน



6. เส้นลวดตัวนำสองเส้น เส้นแรกมีกระแสพุ่งออกจากกระดาษ(.) เส้นที่สองมีกระแสพุ่งเข้ากระดาษ (x) ที่จุดกึ่งกลางจะมีสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลในเส้นลวดอย่างไร(มข.57)

1. ศูนย์
2. →
3. ←
4. ↑

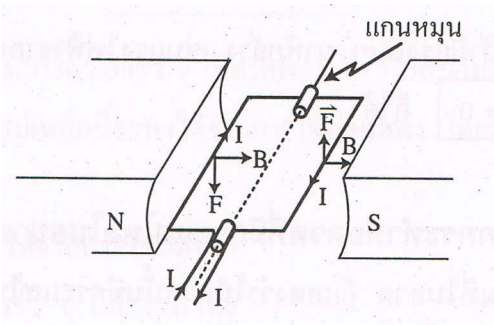


15.5 แรงกระทำต่อขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านและอยู่ในสนามแม่เหล็ก

ขดลวดพื้นที่ A อยู่ในสนามแม่เหล็ก B โดยแกนของขดลวดตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กแล้วให้กระแสไฟฟ้า I ไหลในขดลวด จะเกิดแรงคู่ควบเนื่องจากแรงแม่เหล็กกระทำต่อขดลวดทำให้ขดลวดหมุน มีขนาดโมเมนต์ของแรงคู่ควบ เป็นตามสมการ

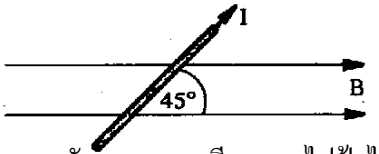
$$M = INBA\cos\theta$$

เมื่อ M แทน โมเมนต์ของแรงคู่ควบ (N-m)
I แทน กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด (A)
N แทน จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)
A แทน พื้นที่ของขดลวด (m^2)
θ แทน มุมระหว่างระนาบของขดลวดกับสนามแม่เหล็ก



แบบฝึกหัดที่ 15.5

1. ลวดยาว 2 เมตร มีกระแสไหลผ่าน 10 แอมแปร์ เส้นลวดวางทำมุม 30 องศา กับสนามแม่เหล็ก 1.25 เทสลา จงหาขนาดของแรงที่กระทำต่อลวดนี้
2. ลวดยาว 1 เมตร วางทำมุม60 องศา กับสนามแม่เหล็กขนาด 3 เทสลา เมื่อผ่านกระแส 2 แอมแปร์ เข้าไปจะเกิดแรงเป็นกี่เท่าของลวดที่ขณะทำมุม30 องศา กับสนามเหล็กเดิม
3. ลวดยาว 10 เซนติเมตร วางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังรูป ถ้าสนามแม่เหล็กเป็น 3×10^{-2} เทสลา และเกิดแรงลวดเส้นนี้ 6×10^{-4} นิวตัน จงหาค่ากระแสที่ผ่านลวดนี้ในหน่วยแอมแปร์

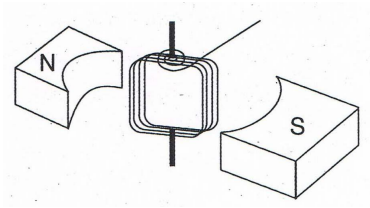


4. ขดลวดสี่เหลี่ยมผืนผ้ายาว 100 cm กว้าง 20 cm มีขดลวดพัน 25 รอบ มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในวงจร 100 A ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผ่านขดลวดเท่ากับ 0.3 T จงหาโมเมนต์ของแรงคู่ควบในขดลวด เมื่อขดลวดวางในแนวขนานกับทิศของสนามแม่เหล็ก

15.6 การประยุกต์ผลของสนามแม่เหล็กต่อตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน

15.6.1 แกลแวนอมิเตอร์

แกลแวนอมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดกระแสไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ที่มีค่าน้อยๆ มี 2 แบบ คือ ชนิดขดลวดเคลื่อนที่ และชนิดแม่เหล็กเคลื่อนที่ และเป็นต้นแบบในการนำไปดัดแปลงเป็นแอมมิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ และโอห์มมิเตอร์



ส่วนประกอบที่สำคัญและการทำงาน

ขดลวดสี่เหลี่ยมวางในแนวตั้งอยู่ในสนามแม่เหล็กรูปโค้งเพื่อให้ทิศของสนามแม่เหล็กขนานกับระนาบของขดลวดตลอดเวลา ($\theta = 0^{\circ}$) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าไปในขดลวด ขดลวดจะเบนไปพร้อมกับเข็มชี้ แต่พอกระแสหยุดไหลขดลวดจะเบนกลับที่เดิมไม่ได้ จึงต้องใช้สปริงรูปก้นหอยอันมาดึงเพื่อทำให้เกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบอีกคู่มีทิศทางตรงกันข้ามกับในขดลวดจะได้

โมเมนต์ของแรงคู่ควบในขดลวด = โมเมนต์ของแรงที่ยืดหยุ่นในสปริง

$$NIBA = K\theta$$

$$\text{ความไวของแกลแวนอมิเตอร์} = \frac{\theta}{I} = \frac{BAN}{K}$$

เมื่อ B แทน สนามแม่เหล็ก หน่วยเป็น เทสลา หรือ Wb/m^2

θ แทน มุมที่ระนาบของขดลวดเบนจากเดิม

K แทน ค่าคงตัวของสปริงของขดลวด หน่วยเป็น นิวตัน ตารางเมตร

A แทน พื้นที่หน้าตัดของขดลวด หน่วยเป็นตารางเมตร

N แทน จำนวนรอบของขดลวด

ความไวของแกลแวนอมิเตอร์ ถ้ากระแสน้อยทำให้มุมน้อยเบนไปมาก ถือว่า "ความไว" มากกว่า

15.6.1 มอเตอร์ไฟฟ้าไฟฟ้ากระแสตรง

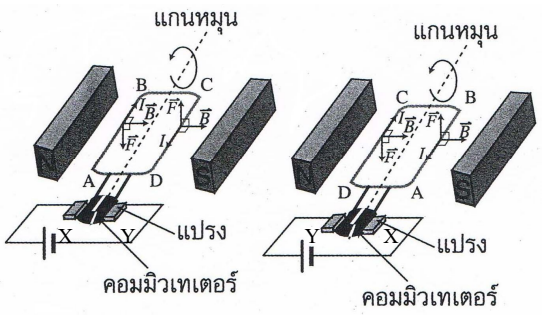
มอเตอร์ ใช้สำหรับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล มีส่วนประกอบสำคัญ คือ

1. ขดลวดอาร์เมเจอร์(Armature) หรือขดลวดสี่เหลี่ยม

2. แท่งแม่เหล็ก ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก

3. วงแหวนผ่าซีก หรือคอมมิวเตเตอร์(Commutator) ช่วยให้กระแสไหลผ่านขดลวดในทิศเอียงตลอดเวลา มักทำด้วยทองแดง

4. แปรงสัมผัส ทำด้วยคาร์บอน ทำหน้าที่ร่วมกับคอมมิวเตเตอร์

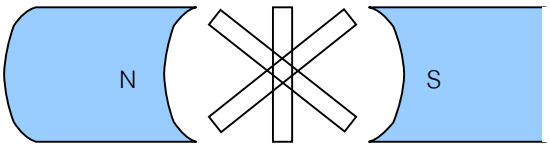


หลักการทำงาน

กระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจะทำให้ขดลวด ABCD หมุนในสนามแม่เหล็ก B รอบแกนหนึ่งด้วยโมเมนต์ของแรงคู่ควบในขดลวด มีขนาด

$$M = NIBA\cos\theta$$

จนขดลวดในแนวระนาบตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กค่าโมเมนต์เท่ากับศูนย์ ขดลวดหยุดหมุนแต่มีความเฉื่อยทำให้เคลื่อนที่ต่อไปได้จนคอมมิวเตเตอร์ X,Y ไปสัมผัสกับแปรงที่จุดQ และ P ตามลำดับ กระแสไฟฟ้าไหลเข้าด้านขวาเหมือนเดิมขดลวดจึงหมุนต่อไปในทิศทางเดิม ในทางปฏิบัติจึงใช้ขดลวดหลายขดลวดหมุนต่อเนื่องกันไปเรื่อยๆ ดังรูป ใช้ขดลวด 3 ขด



การหมุนของขดลวดตัดสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดในทิศตรงข้ามกับทิศของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิด เรียกแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ(Back emf) ใช้สัญลักษณ์“ e ” ซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับ มีทิศตรงกันข้ามกับกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิด ใช้สัญลักษณ์“ I_e ” จึงเป็นเหตุให้กระแสไฟฟ้าในขดลวดขณะหมุนด้วยความเร็วคงที่มีค่าน้อยกว่าตอนเริ่มหมุน

ดังนั้นขณะไม่หมุน $E = IR$

ขณะหมุนด้วยความเร็วคงที่ $E - e = (I - I_e)R$

การใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีมอเตอร์อยู่ จึงควรถอดปลั๊กออกเมื่อไฟตกหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าลดลง เพราะจะทำให้ขดลวดหมุนช้าลงหรือไม่หมุน จึงมีกระแสในขดมาก ขดลวดจึงร้อนและไหม้ในที่สุด

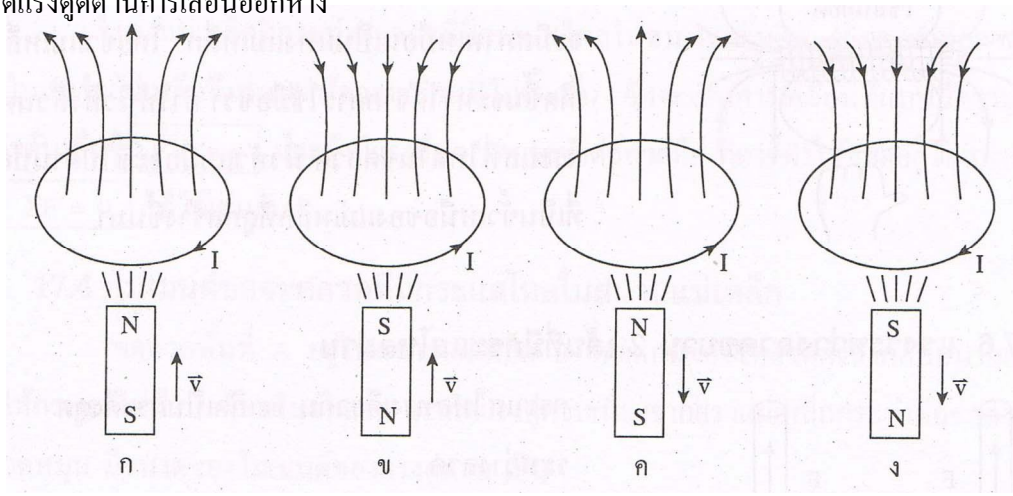
มอเตอร์กระแสตรงนำไปใช้ประโยชน์มาก เป็นส่วนประกอบของเล่นเด็ก ในรถยนต์ เครื่องบันทึกเสียง ส่วนมอเตอร์กระแสสลับใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น พัดลม เครื่องปั่นน้ำผลไม้ เป็นต้น

15.7 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (Electric Current)

เมื่อนำฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดตัวนำที่มีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวด กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะก่อให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กใหม่ที่จะมีทิศต่อต้านกับการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กแรก ที่ทำให้มันเกิดขึ้นมาเสมอ

ในกรณีการเคลื่อนขดลวดเข้าหาแท่งแม่เหล็ก(หรือเคลื่อนแท่งแม่เหล็กเข้าหาขดลวด) กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดจะไหลในทิศที่จะสร้างขั้วแม่เหล็กชนิดเดียวกัน(ทางด้านที่เลื่อนเข้าหากันนั้น)เพื่อให้เกิดแรงผลักต้านการเลื่อนเข้ามา

ในขณะที่ถ้าเคลื่อนขดลวดออกห่างแท่งแม่เหล็ก (หรือเคลื่อนแท่งแม่เหล็กออกห่างขดลวด) กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดจะไหลในทิศที่จะสร้างขั้วแม่เหล็กชนิดตรงข้าม (ทางด้านที่เลื่อนห่างจากกัน)เพื่อให้เกิดแรงดูดต้านการเลื่อนออกห่าง



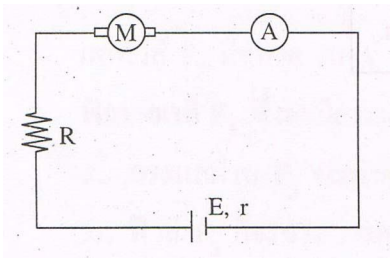
รูป ก , ข แสดงกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อเคลื่อนแม่เหล็กเข้าหาขดลวด

รูป ค , ง แสดงกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อเคลื่อนแม่เหล็กออกห่างขดลวด

15.8 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

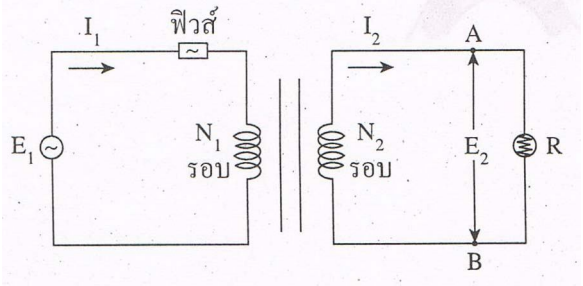
เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า จะทำให้มอเตอร์เกิดการหมุน ขณะเดียวกันการหมุนของมอเตอร์ จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในทิศย้อนทางกับกระแสที่ให้แก่มอเตอร์เสมอ นั่นคือ เมื่อมอเตอร์หมุนเป็นปกติ มอเตอร์จะทำหน้าที่เป็นเซลล์ไฟฟ้าที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าในวงจรเสมอ โดยถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับของมอเตอร์เป็น E_0 จะทำให้กระแสไฟฟ้าในวงจรในขณะนั้นเป็นตามสมการ

$$I = \frac{E - E_0}{R + r}$$



15.9 หม้อแปลง (Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้า คือ เครื่องมือที่ใช้เพิ่มหรือลดความต่างศักย์กระแสสลับให้สูงขึ้นหรือต่ำลง โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้าระหว่างขดลวด ขดลวดที่ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ(A.C.) เรียกว่า **ขดลวดปฐมภูมิ** (Primary Coil) ส่วนขดลวดอีกด้านเรียกว่า **ขอลวดทุติยภูมิ** (Secondary Coil)



หม้อแปลงมี 2 ชนิด คือ

1. หม้อแปลงขึ้น (Step - up Transformer) จะมีขดลวดปฐมภูมิน้อยกว่าขดลวดทุติยภูมิ ทำให้ V, E เพิ่มขึ้น

2. หม้อแปลงลง (Step - down Transformer) จะมีขดลวดปฐมภูมิมากกว่าขดลวดทุติยภูมิ ทำให้ V, E ลดลง

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้า(E) และจำนวนรอบของขดลวด(N)ได้ คือ $E \alpha N$

$$\therefore \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

ถ้าหม้อแปลงไม่มีการสูญเสียพลังงาน จะได้

พลังงานไฟฟ้าของขดลวดปฐมภูมิ = พลังงานไฟฟ้าของขดลวดทุติยภูมิ

$$I_1V_1 = I_2V_2$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2}$$

ประสิทธิภาพของหม้อแปลง $(E_{ff}) = \frac{P_2}{P_1} \times 100$

ประสิทธิภาพของหม้อแปลง $(E_{ff}) = \frac{I_2V_2}{I_1V_1} \times 100$

เมื่อ E_1 แทน แรงเคลื่อนไฟฟ้า (ความต่างศักย์, V_1) ในขดลวดปฐมภูมิ

E_2 แทน แรงเคลื่อนไฟฟ้า (ความต่างศักย์, V_2) ในขดลวดทุติยภูมิ

N_1 แทน จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ N_2 แทน จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ

I_1 แทน กระแสไฟฟ้าในขดลวดปฐมภูมิ I_2 แทน กระแสไฟฟ้าในขดลวดทุติยภูมิ

การเลือกใช้หม้อแปลง ต้องพิจารณา

1. ความต่างศักย์ หม้อแปลงต้องไม่น้อยกว่าเครื่องใช้ไฟฟ้าจะเกิดความเสียหายกับหม้อแปลง

2. กำลังไฟฟ้า ต้องมีค่าเท่ากันกับเครื่องใช้ไฟฟ้า เพราะหม้อแปล**ไม่ได้แปลงกำลังไฟฟ้า**

แบบฝึกหัดทบทวน 15.9 หม้อแปลง

1. ข้อใด<u>ไม่</u>ถูกต้อง

1. อัตราเร็วของการหมุนของมอเตอร์กระแสตรงขึ้นอยู่กับกระแสในขดลวด
2. ในการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงต้องต่ออยู่กับไฟฟ้ากระแสสลับ
3. สำหรับหม้อแปลงชนิดแปลงขึ้น กระแสที่ออกจากขดทุติยภูมิจะมากกว่ากระแสที่ไหลเข้าขดปฐมภูมิ
4. หม้อแปลงไฟฟ้ามีแกนทำด้วยโลหะแผ่นบางๆ ซ้อนกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายทอดพลังงาน

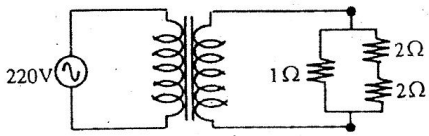
2. หม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งมีไฟฟ้า110 โวลต์ มีขดลวดปฐมภูมิ 80 รอบ ถ้าต้องการให้หม้อแปลงนี้สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ 2,200 โวลต์ ขดลวดทุติยภูมิต้องมีจำนวนรอบเท่าใด

1. 8,000 รอบ 2. 1,600 รอบ 3. 2,400 รอบ 4. 3,200 รอบ

3. หม้อแปลงเครื่องหนึ่งมีจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิต่อจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิเป็น 1 : 4 ถ้ามีกระแสและความต่างศักย์ในขดลวดทุติยภูมิเท่ากับ 10 แอมแปร์ และ 200 โวลต์ ตามลำดับ จงหากระแสและความต่างศักย์ในขดลวดปฐมภูมิ

1. 40 A และ 50 V
2. 50 A และ 40 V
3. 40 A และ 40 V
4. 50 A และ 50 V

4. จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงดังรูป มี 550 รอบ ขดลวดทุติยภูมิมีจำนวน 30 รอบ กระแสที่ผ่านตัวต้านทาน 2 โอห์ม มีค่ากี่แอมแปร์

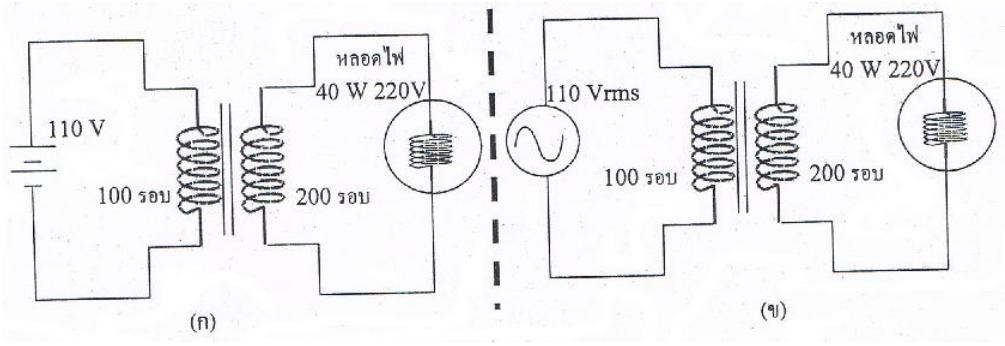


1. 3
2. 6
3. 12
4. 15

5. (มข.52) หม้อแปลงไฟฟ้ามีขาดลวดด้านปฐมภูมิจำนวน 1000 รอบ ขดลวดด้านทุติยภูมิจำนวน 100 รอบ ถ้านำด้านปฐมภูมิไปต่อกับไฟบ้านที่มีความต่างศักย์ 220 โวลต์ สมมุติให้ขดลวดไม่มีการสูญเสียพลังงาน จะเกิดความต่างศักย์ที่ขดลวดด้านทุติยภูมิกี่โวลต์

1. 22 โวลต์
2. 44 โวลต์
3. 220 โวลต์
4. 2200 โวลต์

6. (มข.53) จากวงจรของหม้อแปลงดังรูป ข้อสรุปใดถูกต้อง



1. หลอดไฟในรูป (ก) สว่างมากกว่าหลอดไฟในรูป (ข)
2. หลอดไฟในรูป (ก) สว่างน้อยกว่าหลอดไฟในรูป (ข)
3. หลอดไฟทั้งสองรูปสว่างเท่ากัน
4. หลอดไฟในรูป (ก) ไม่สว่างเลย

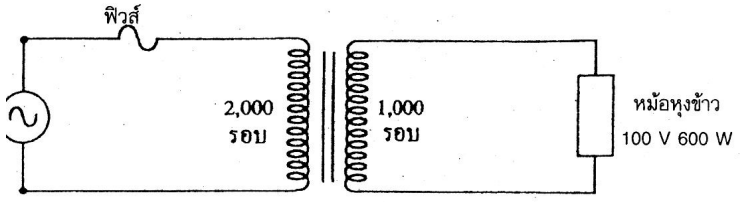
7. (มข.56) หม้อแปลงไฟฟ้าอันหนึ่งต่อขดลวดปฐมภูมิที่มีพันไว้ 440 รอบ เข้ากับไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ วัดความต่างศักย์ที่ขดลวดทุติยภูมิได้ 11.0 โวลต์ เมื่อต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่กินกระแสไฟ 0.4 แอมแปร์ ดังนั้นจะมีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าหม้อแปลงทางขดลวดปฐมภูมิเท่าไร

1. 0.02 แอมแปร์
2. 0.08 แอมแปร์
3. 12.2 แอมแปร์
4. 50.0 แอมแปร์

8. ต้องการพันหม้อแปลงเพื่อแปลงไฟฟ้าจาก 220 โวลต์ให้ลดลงมาเหลือ 12 โวลต์ และจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ 0.5 แอมแปร์ เมื่อพันขดลวดปฐมภูมิ 880 รอบ จะต้องพันขดลวดด้านทุติยภูมิกี่รอบ (สมมุติไม่มีการศูนย์เสียพลังงาน) (มข.57)

1. 48 รอบ
2. 96 รอบ
3. 300 รอบ
4. 5280 รอบ

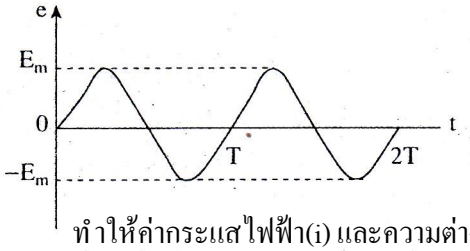
9. หม้อแปลงอุดมคติตัวหนึ่ง มีจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิเป็น 2,000 รอบ และจำนวนของขดลวดทุติยภูมิเป็น 1000 รอบ เมื่อนำมาใช้ในวงจรดังรูป ขนาดของฟิวส์ที่นำมาใช้จะต้องมีค่าอย่างน้อยที่สุดเท่าไร



1. 2 A 2. 3 A 3. 5 A 4. 11 A

15.10 ค่าของปริมาณที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้ากระแสสลับ

ไฟฟ้ากระแสสลับ คือ เหตุการณ์ที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้า ให้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า(e) ไม่คงที่ มีค่าแปรผันตามเวลาแบบฟังก์ชัน sine คือ



$$e = E_m \sin \omega t \qquad (\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f)$$

เมื่อ E_m แทน ค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า

ω แทน อัตราเร็วเชิงมุม

T แทน คาบเวลา f แทน ความถี่

ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้า(i) และความต่างศักย์(v) ในวงจรแปรผันตามเวลาแบบเดียวกันคือ

$$i = I_m \sin(\omega t + \phi_1)$$

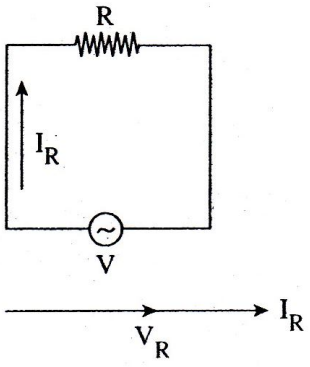
$$v = V_m \sin(\omega t + \phi_2)$$

เนื่องจากปริมาณไฟสลับเป็นค่าไม่คงที่ จึงต้องหาค่าที่จะใช้เป็นตัวแทน ซึ่งหาโดยวิธียกำลังสองก่อนแล้วหาค่าเฉลี่ยแล้วจึงถอดรากที่สอง เรียกว่า **ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย** (root mean square หรือค่า rms ของปริมาณนั้น) ซึ่งค่าตัวแทนนี้จะเป็นค่าที่จะวัดได้เมื่อใช้มิเตอร์วัดจึงเรียกชื่อว่า**ค่ามิเตอร์** และเมื่อใช้คำนวณกำลังไฟฟ้า(เฉลี่ย) ก็จะต้องใช้ค่านี้คำนวณจึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า**ค่ายังผล**

ค่า rms = ค่ามิเตอร์ = ค่ายังผล = $\frac{\text{ค่าสูงสุดของปริมาณนั้น}}{\sqrt{2}}$
$E_{rms} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$; $I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$; $V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$

15.10.1 ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

ก. วงจรลวดความต้านทาน(R) ค่าความต้านทาน R จะไม่ขึ้นกับความถี่ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสลับ

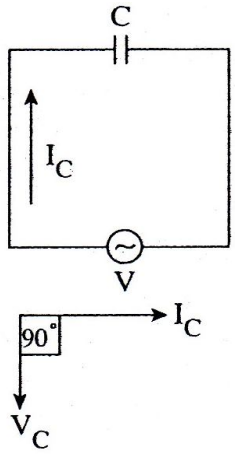


(R เป็นค่าคงที่ของลวด ตามสูตร $R = \rho\frac{\ell}{A}$) กระแสในวงจรจะเป็นไปตามกฎของโอห์ม

$$I_R = \frac{V_R}{R}$$

โดยกระแส I_R จะมีเฟสเดียวกันกับเฟสของ V_R

ข. วงจรของตัวเก็บประจุ(C) ค่าความต้านทานเชิงความจุ X_C จะขึ้นกับความถี่ของแหล่งกำเนิดที่ต่ออยู่ตามสูตร



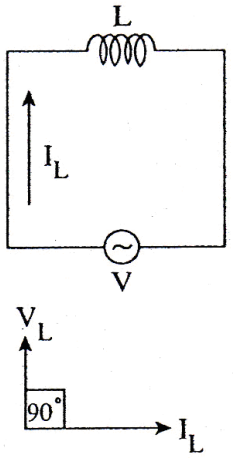
$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$$

กระแสจะเป็นไปตามกฎของโอห์ม

$$I_C = \frac{V_C}{X_C}$$

โดยกระแส I_C จะมีเฟสนำหน้าเฟสของ V_C อยู่ 90°

ค.วงจรขดลวดเหนี่ยวนำ(L) ค่าความต้านทานเชิงเหนี่ยวนำ X_L จะขึ้นกับความถี่ของแหล่งกำเนิดที่ต่ออยู่ ตามสูตร



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

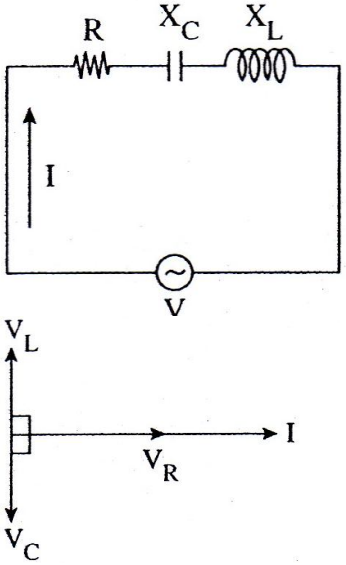
กระแสจะเป็นไปตามกฎของโอห์ม

$$I_L = \frac{V_L}{X_L}$$

โดยกระแส I_L จะมีเฟสตามหลังเฟสของ V_L อยู่ 90°

การต่อวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

1.การต่ออนุกรมทั้งหมด จะมีกระแสเท่ากันทุกๆ ส่วน(จึงใช้เฟสของ I อ้างอิงในการรวม V)



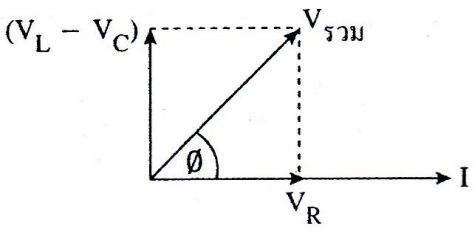
$$I = I_R = I_C = I_L$$

และ

$$\overline{V} = \overline{V}_R + \overline{V}_C + \overline{V}_L$$

โดยการรวมความต่างศักย์ V จะเป็นการรวมโดยพิจารณาเฟสของแต่ละตัว โดยเทียบกับ I ซึ่งเป็นตัวร่วม(เสมือนกับการคิดรวมแบบเวกเตอร์) ซึ่งจะได้ว่า

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



และวงจรจะมีความต้านทานเชิงซ้อน z (เสมือนเป็นความต้านทานรวมของวงจร)

$$z = \frac{V}{I} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

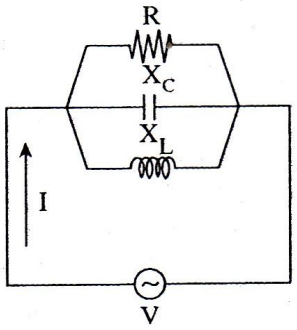
โดยมุมเฟสระหว่าง V กับ I คือ

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

ความถี่เรโซแนนซ์ คือ ความถี่ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่จะทำให้กระแสในวงจรมีค่าสูงสุดคือ

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

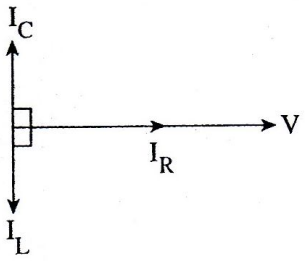
2. การต่อขนานทั้งหมด จะมีความต่างศักย์เท่ากันทุกส่วน จึงใช้เฟสของ V อ้างอิงในการรวม I)



$$V = V_R = V_C = V_L$$

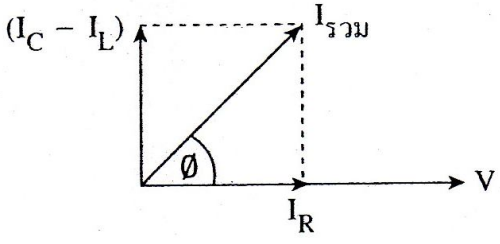
และ

$$\bar{I} = \bar{I}_R + \bar{I}_C + \bar{I}_L$$



โดยการรวมกระแส I จะเป็นการรวมโดยพิจารณาเฟสของแต่ละตัว เทียบกับV ซึ่งเป็นตัวร่วม ซึ่งจะได้ว่า

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



และวงจรจะมีความต้านทานเชิงซ้อน z (เสมือนเป็นความต้านทานรวมของวงจร)

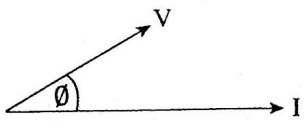
$$\frac{1}{z} = \frac{I}{V} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2}$$

โดยมีมุมเฟสระหว่าง I กับ V คือ

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

15.10.2 กำลังไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย มีค่าเท่ากับผลคูณของกระแส I และความต่างศักย์ V ที่มีเฟสตรงกัน โดยค่า I และ V จะต้องเป็นค่า rms (ค่ามิเตอร์ หรือค่ายังผลนั่นเอง)



$$P = VI\cos\phi$$

เมื่อ ϕ คือ มุมเฟสระหว่าง V กับ I

โดย $\cos\phi$ จะเรียกว่า ตัวประกอบกำลัง (Power factor)

แต่ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ เฟสของ V และ I ตรงกันเฉพาะที่ตัวต้านทาน R ขณะที่เฟสของ V และ I จะต่างกัน 90° ที่ตัวเก็บประจุ และตัวขดลวดเหนี่ยวนำ กำลังไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับจึงเกิดขึ้นเฉพาะที่ตัว R ขณะที่กำลังที่ตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำจะมีค่าเป็นศูนย์

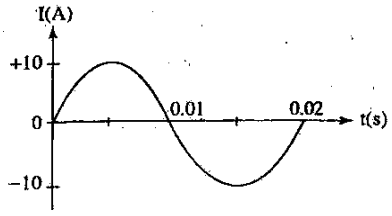
ดังนั้น การหาค่ากำลังไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ จึงสามารถคิดเฉพาะที่ตัวต้านทาน R ได้เลย (ซึ่งทำให้ไม่ต้องคิดมุมเฟส)

$$P = VI\cos\phi = P \text{ ที่ตัวต้านทาน } R$$

$$\therefore \quad P = VI\cos\phi = V_R I_R = I_R^2 R = \frac{V_R^2}{R}$$

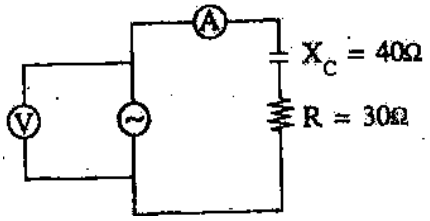
แบบฝึกหัด 15.10 เรื่อง ไฟฟ้ากระแสสลับ

1. ถ้ากล่าวว่าไฟฟ้าในบ้านมีความต่างศักย์ 220 โวลต์ หมายความว่าความต่างศักย์สูงสุดมีค่าเท่าใด ($220\sqrt{2}$ โวลต์)
2. จากกราฟที่กำหนดให้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา จงหาความถี่และค่ายังผลของกระแส (50 Hz , $\frac{10}{\sqrt{2}}$ A)

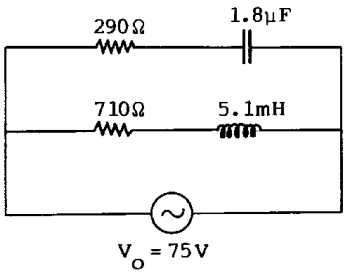


3. ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับถ้าความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ของแหล่งกำเนิด E แปรกับเวลา t ใด ๆ ตามความสัมพันธ์ $E = 20\sin 314\,t$ จงหาค่ายังผล (หรือค่ามิเตอร์) ของ ความต่างศักย์ และค่าความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับนี้ ($\frac{10}{\sqrt{2}}$ V , 50 Hz)
4. ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีกระแสไฟฟ้า i และเวลา t ตามสมการ $i = 20\sin 314\,t$ จงหา
   ก. กระแสไฟฟ้าสูงสุด ข. ความถี่ ค. ค่า i_{rms}
5. ที่ความถี่เท่าไรตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุ 2 μF จึงจะมีค่าความต้านทานตัวเก็บประจุ 250 Ω
6. ความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเท่าไรจึงจะให้เกิดกระแสไฟฟ้า 30 mA ในวงจรตัวเก็บประจุที่มีความจุ 0.4 μF เมื่อความถี่ของกระแสไฟฟ้าเป็น 2.5 kHz
7. ตัวเก็บประจุค่าความจุ 70 ไมโครฟารัด ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสลับ ที่มีค่ายังผลของแรงเคลื่อนไฟฟ้า 50 โวลต์ จงหาความถี่ของแหล่งกำเนิด เพื่อให้เกิดกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุ 1.1 แอมแปร์ (50 Hz)
8. ขดลวดเหนี่ยวนำมีความต้านทาน 1.8 kΩ ความถี่ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า 3.6 kHz จะมีค่าความเหนี่ยวนำเท่าไร

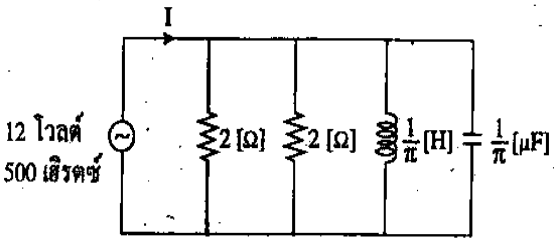
9. กระแสไฟฟ้าในขดลวดเหนี่ยวนำมีค่า0.20 แอมแปร์ ความถี่ 750 เฮิรตซ์ ถ้าค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดมีค่า 0.07 เฮนรี่ จงหาความต่างศักย์คร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ
10. ตัวเหนี่ยวนำ0.07 เฮนรี่ ต่อเป็นวงจรกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสลับ ความต่างศักย์220 V , 50 Hz จะเกิดกระแสไหลในวงจรเท่าไร (10 A)
11. วงจรกระแสสลับความถี่50 เฮิรตซ์ ที่มีตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ วัดกระแสไฟฟ้าในวงจรได้ 0.1 แอมแปร์ ความต่างศักย์คร่อมตัวเหนี่ยวนำ22 โวลต์ ค่าความเหนี่ยวนำจะเป็นเท่าไร(0.7 เฮนรี)
12. ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทานต่อกับอนุกรมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับถ้าความต่างศักย์คร่อมอุปกรณ์แต่ละตัว และอ่านค่าได้15 V , 20 V และ 12 V ตามลำดับ จงหา ความต่างศักย์ของแหล่งกำเนิดกระแสสลับ(13 V)
13. ตัวเก็บประจุความต้านทาน 100 โอห์ม ตัวเหนี่ยวนำความต้านทาน 60 โอห์ม และตัวต้านทานขนาด 30 โอห์ม ต่ออนุกรมกัน และต่อกับแหล่งกำเนิดไฟสลับ200 โวลต์ , 50 เฮิรตซ์ จะเกิดกระแส ไหลในวงจรเท่าไร (4 A)
14. ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ดังรูป ถ้าโวลต์มิเตอร์ V อ่านค่าความต่างศักย์ได้ 200 โวลต์ แอมมิเตอร์ A จะอ่านค่ากระแสได้กี่แอมแปร์ (4 A)



15. ขดลวดขดหนึ่งเมื่อต่อกับแรงดันกระแสตรง100 V มีกระแสไหลเข้า 5 A นำขดลวดเดียวกันนี้ไปต่อกับแรงดันกระแสสลับ100 V มีกระแสไหลเข้า 4 A จงหาค่าความต้านทานเชิงเหนี่ยวนำ(X_L)ของขดลวดเป็นโอห์ม (15 โอห์ม)
16. วงจรแสดงดังรูป จงหากระแสไฟฟ้าที่จ่ายโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อ
ก. ความถี่มีค่ามาก ๆ
ข. ความถี่มีค่าน้อย ๆ



17. ตัวต้านทาน 2 ตัวมีความต้านทาน 2 โอห์ม ตัวเก็บประจุ$\left(\frac{1}{\pi}\right)$ ไมโครฟารัด และเหนี่ยวนำ$\left(\frac{1}{\pi}\right)$ เฮนรี ต่อขนานกันและต่อกับกำเนิดไฟฟ้ากระสลับที่มีความถี่500 เฮิรตซ์ ให้ค่า rms ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า 12 โวลต์ จงหาค่า rms ของกระแสรวม (I) ในวงจรเป็นแอมแปร์ (12 A)



18. วงจร RCL อนุกรม ตัวเก็บประจุค่าความจุ1.20 ไมโครฟารัด และตัวเหนี่ยวนำ2.0 มิลลิเฮนรี่ จงหาความถี่ขณะเกิดกำทอนทางไฟฟ้าขึ้นในวงจร

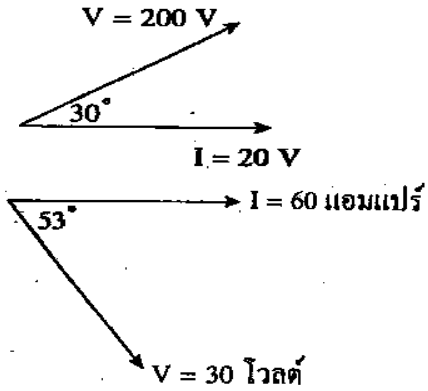
19. วงจร RCL อนุกรม มีความถี่ขณะเกิดกำทอน 690 กิโลเฮิรตซ์ ถ้าตัวเหนี่ยวนำมีค่าความเหนี่ยวนำ26 ไมโครเฮนรี่ จงหาความจุของตัวเก็บประจุ

20. กำลังไฟฟ้าที่จ่ายในวงจรRCL อนุกรมมีค่าเป็น 65 วัตต์ และกระแสไฟฟ้ามีค่าเป็น0.530 แอมแปร์ ขณะเกิดกำทอนทางไฟฟ้า จงหาความต่างศักย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

21. วงจร RCL อนุกรมประกอบด้วยตัวเก็บประจุมีค่าความจุ5.10 ไมโครฟารัด และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งมีความต่างศักย์ 11 โวลต์ ความถี่ขณะเกิดกำทอน 1.30 กิโลเฮิรตซ์ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายในวงจรมีค่า25 วัตต์ จงหา ก. ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ ข. ค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำ

22. ต่อตัวต้านทานที่มีความต้านทาน2,700 โอห์ม อนุกรมกับตัวเก็บประจุที่มีความจุแล้วคร่อมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(60 Hz , 120 V) จงหากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจร

23. ถ้าเฟสของกระแสยังผลและความต่างศักย์ยังผลของวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเป็นดังรูปกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่สูญเสียในวงจรนี้มีค่ากี่กิโลวัตต์(3.5 kW)



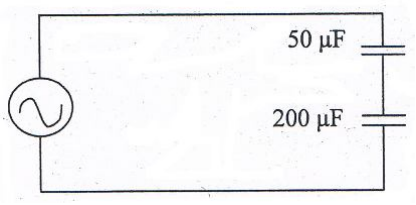
24. จากแผนภาพเฟเซอร์ของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเป็นดังรูป กำลังเฉลี่ย $\overline{P}$ ของวงจรนี้มีค่ากี่วัตต์ (1,080 W)

แบบฝึกหัดทบทวน 15.10 เรื่อง ไฟฟ้ากระแสสลับ

1. (มข.52) ข้อใดกล่าว**ผิด** เกี่ยวกับวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ
   1. ความต้านทานของตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับเพิ่มขึ้น
   2. ความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับเพิ่มขึ้น
   3. ความต้านทานของตัวต้านทานมีค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ
   4. อิมพิแดนซ์ของวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขดลวดเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงเมื่อความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับเปลี่ยนแปลง

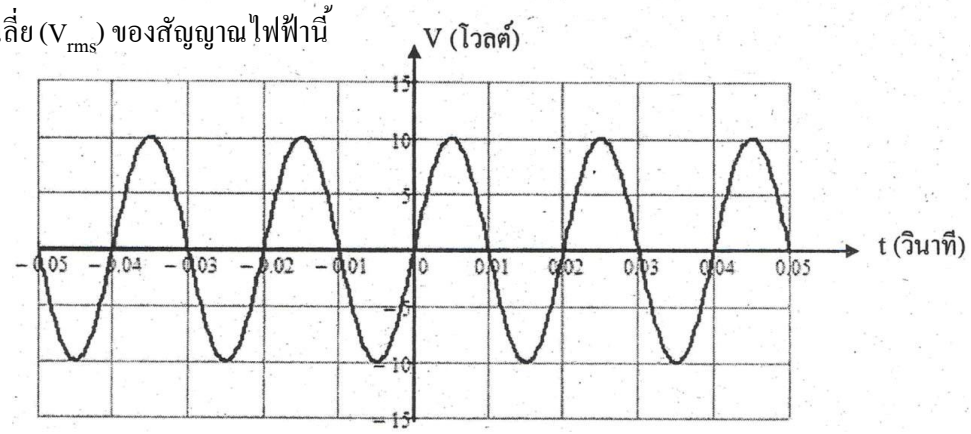
2. (มข.52) นำโวลต์มิเตอร์ที่ใช้สำหรับวัดไฟฟ้ากระแสสลับ ไปวัดไฟบ้านที่มีความต่างศักย์220 โวลต์ โวลต์มิเตอร์นี้จะอ่านได้กี่โวลต์
   1. 0 โวลต์
   2. $\frac{220}{\sqrt{2}}$ โวลต์
   3. 220 โวลต์
   4. $220\sqrt{2}$ โวลต์

3. (มข.53) จากวงจรของตัวเก็บประจุที่ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่เชิงมุม250 เรเดียนต่อวินาทีดังรูป ค่าความต้านทานจินตภาพของความจุรวมของวงจรมีค่ากี่โอห์ม
   1. 50 Ω
   2. 100 Ω
   3. 314 Ω
   4. 628 Ω



4. (มข.53) ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีตัวเก็บประจุ(C) ตัวต้านทาน(R) และขดลวดเหนี่ยวนำ(L) ต่อแบบอนุกรมกัน แล้วต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ข้อความต่อไปนี้ ข้อใดไม่ถูกต้อง
   1. ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีเฟสตรงกันข้ามกับความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ
   2. ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีเฟสนำหน้าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน
   3. ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานมีเฟสตรงกันกับกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน
   4. กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน และขดลวดเหนี่ยวนำ มีเฟสตรงกัน

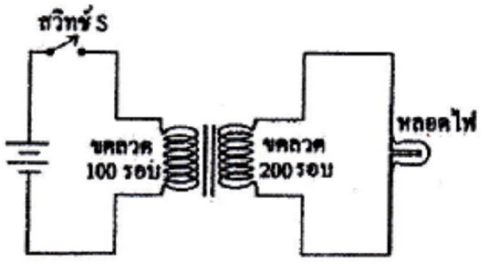
5. (มข.54) ในภาพเป็นสัญญาณค่าความต่างศักย์กระแสสลับที่ขึ้นกับเวลา จงหาค่าความต่างศักย์รากกำลังสองเฉลี่ย (V_{rms}) ของสัญญาณไฟฟ้านี้



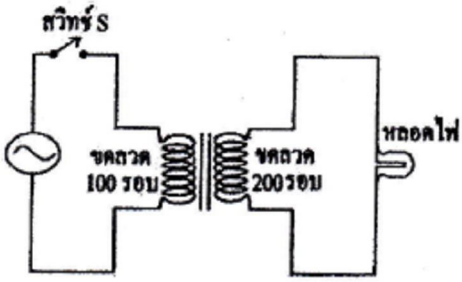
   1. 7.1 โวลต์ 2. 10.0 โวลต์ 3. 14.1 โวลต์ 4. 10.0 โวลต์

6. (มข.54) นำขดลวดเหนี่ยวนำ(L) ต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน (R) แล้วต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ข้อความต่อไปนี้ข้อใดถูกต้อง
   1. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานมีเฟสนำหน้ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ
   2. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานมีเฟสตามหลังกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ
   3. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานมีเฟสตามหลังความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ
   4. แรงเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีเฟสตามหลังความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ

7. (มข.55) เมื่อต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง(รูป ก.) และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ(รูป ข.) เข้ากับหลอดไฟ



ก.



ข.

   1. หลังสับสวิตซ์S ในรูป ก. ทิ้งไว้ หลอดไฟจะสว่างตลอดเวลา
   2. ในรูป ก. หลอดไฟจะสว่างเฉพาะขณะสับสวิตซ์ S เพื่อปิด/เปิดเท่านั้น
   3. หลังสับสวิตซ์S ในรูป ข. ทิ้งไว้หลอดไฟจะไม่สว่างเลย
   4. ในรูป ข. หลอดไฟจะสว่างเฉพาะขณะสับสวิตซ์ S เพื่อปิด/เปิด เท่านั้น

8. (มข.55) ในวงจรอนุกรมไฟฟ้ากระแสสลับอันหนึ่ง ใช้ตัวต้านทานขนาด 50 Ω วัดความต่างศักย์สูงสุดคร่อมตัวต้านทานได้ 50 mV ในขณะที่ความต่างศักย์สูงสุดคร่อมตัวเก็บประจุเป็น 240 mV จงหาค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้โดยใช้แอมมิเตอร์และค่าความต้านทานจินตนาการของตัวเก็บประจุ กำหนดให้ $\sqrt{2} = 1.414$, $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$ (ตอบ ข้อ 4)

1. $I_{rms} = 1$ mA, $\chi_C = 240\ \Omega$
2. $I_{rms} = 1$ mA, $\chi_C = 120\ \Omega$
3. $I_{rms} = 0.707$ mA, $\chi_C = 250\ \Omega$
4. $I_{rms} = 0.707$ mA, $\chi_C = 240\ \Omega$

9. เด็กนักเรียนคนหนึ่งต่อวงจร R L C แบบอนุกรมกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนตามเวลาเท่ากับ $V(t) = 220\ \sin(314t)$ เมื่อ t อยู่ในหน่วยเวลาวินาที และ V(t) อยู่ในหน่วยโวลต์ กำหนดให้ค่าความต้านทาน R มีค่า 200 โอห์ม ความเหนี่ยวนำ L มีค่า 150 มิลลิเฮนรี และค่าความจุไฟฟ้า C มีค่า 2000 ไมโครฟารัด ข้อใดต่อไปนี้กล่าวถูกต้อง (มข.58)

1. แรงเคลื่อนไฟฟ้า V(t) มีเฟสนำกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร
2. ความต่างศักย์ที่คร่อมตัวต้านทานที่เวลา t ใดๆ มีเฟสนำกระแสไฟฟ้าอยู่ $\pi/2$ เรเดียน
3. ความต่างศักย์ที่คร่อมตัวเก็บประจุที่เวลา t ใดๆ มีเฟสนำกระแสไฟฟ้าอยู่ $\pi/2$ เรเดียน
4. ความต่างศักย์ที่คร่อมขดลวดเหนี่ยวนำที่เวลา t ใดๆ มีเฟสตามกระแสไฟฟ้าอยู่ $\pi/2$ เรเดียน