ไฟฟ้าแม่เหล็ก (Electromagnetism)

1. สนามแม่เหล็ก

เส้นสนามแม่เหล็ก

- แท่งแม่เหล็ก
- โลก
- กระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดตัวนำ

ฟลักซ์แม่เหล็ก

2. แรงแม่เหล็ก

แรงแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า

แรงแม่เหล็กกระทำต่อลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน

แรงระหว่างลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้า

3. โมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก

โมเมนต์ของแรงคู่ควบ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

4. กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำและอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ

กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์

กฎของเลนซ์

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

- เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ
- เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

5. ไฟฟ้ากระแสสลับ

1. สนามแม่เหล็ก (magnetic field)

- แม่เหล็ก (magnet) คือ วัสดุที่ดึงดูดเหล็กได้
- เมื่อแขวนแท่งแม่เหล็กให้หมุนได้อย่างอิสระในแนวราบ แท่งแม่เหล็กจะวางตัวในแนวทิศเหนือ-ใต้เสมอ โดยปลายแท่งแม่เหล็กที่ชี้ไปทางทิศเหนือเรียกว่าขั้วเหนือ (north pole: N) ส่วนปลายอีกด้านที่ชี้ไปทางทิศใต้เรียกว่าขั้วใต้ (south pole: S)
- เมื่อนำขั้วแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กสองแท่งมาวางใกล้กัน ขั้วชนิดเดียวกันจะผลักกัน ขั้วต่างชนิดกันจะดูดกัน
- เมื่อวางเข็มทิศในบริเวณที่ไม่มีแม่เหล็กอื่นรบกวน เข็มชี้ทิศเหนือของเข็มทิศจะชี้ไปยังขั้วโลกเหนือทางภูมิศาสตร์ และเข็มชี้ทิศใต้ของเข็มทิศจะชี้ไปยังขั้วโลกใต้ทางภูมิศาสตร์
- สนามแม่เหล็ก คือ บริเวณรอบแท่งแม่เหล็กที่มีแรงจากแม่เหล็กกระทำต่อผงเหล็ก

เส้นสนามแม่เหล็ก (magnetic field lines)

เส้นสนามแม่เหล็ก คือ เส้นที่แสดงการเรียงตัวของผงเหล็ก

- **สนามแม่เหล็กจากแท่งแม่เหล็ก** (magnetic field of a bar magnet)

  กำหนดให้สนามแม่เหล็กมีทิศเดียวกับทิศที่ขั้วเหนือของเข็มทิศชี้ไป ดังนั้นสนามแม่เหล็กจึงมีทิศพุ่งออกจากแท่งแม่เหล็กขั้ว_____เข้าหาแท่งแม่เหล็กขั้ว_____

- **สนามแม่เหล็กโลก** (magnetic field of the earth)

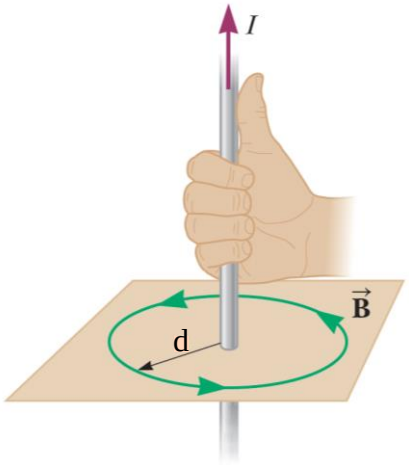
ขั้วโลกเหนือ

ขั้วโลกใต้

- **สนามแม่เหล็กจากกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดตัวนำ**

  กฎของเออร์สเตด (Oersted's law)

  "ลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านจะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบลวดตัวนำนั้น"

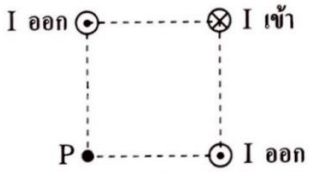


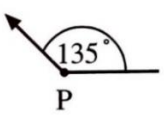
กฎมือขวา: ใช้นิ้วโป้งมือขวาชี้ไปตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า I จากนั้นกำมือขวารอบลวดตัวนำเส้นตรง ทิศทางการวนของนิ้วทั้งสี่จะแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$

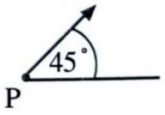
Note: สนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ แปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้า I แต่แปรผกผันกับระยะห่างในแนวตั้งฉากกับเส้นลวด d ตามสมการ

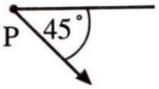
$$B = \frac{(2\times10^{-7})\,I}{d}$$

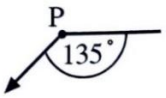
1.1. (A-NET'51) ภาพนี้แสดงภาคตัดขวางของลวดยาวมาก 3 เส้น ตั้งฉากกับหน้ากระดาษอยู่ที่มุมทั้งสามของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ลวดแต่ละเส้นมีกระแสไหล I สนามแม่เหล็กที่จุด P เป็นตามรูปใด



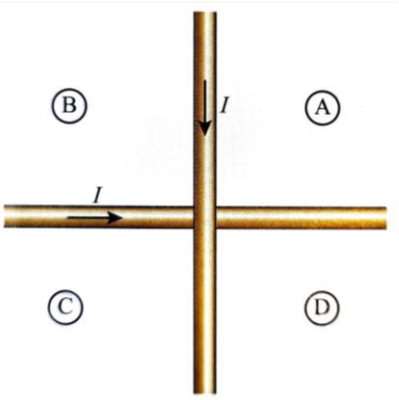
1. 

2. 

3. 

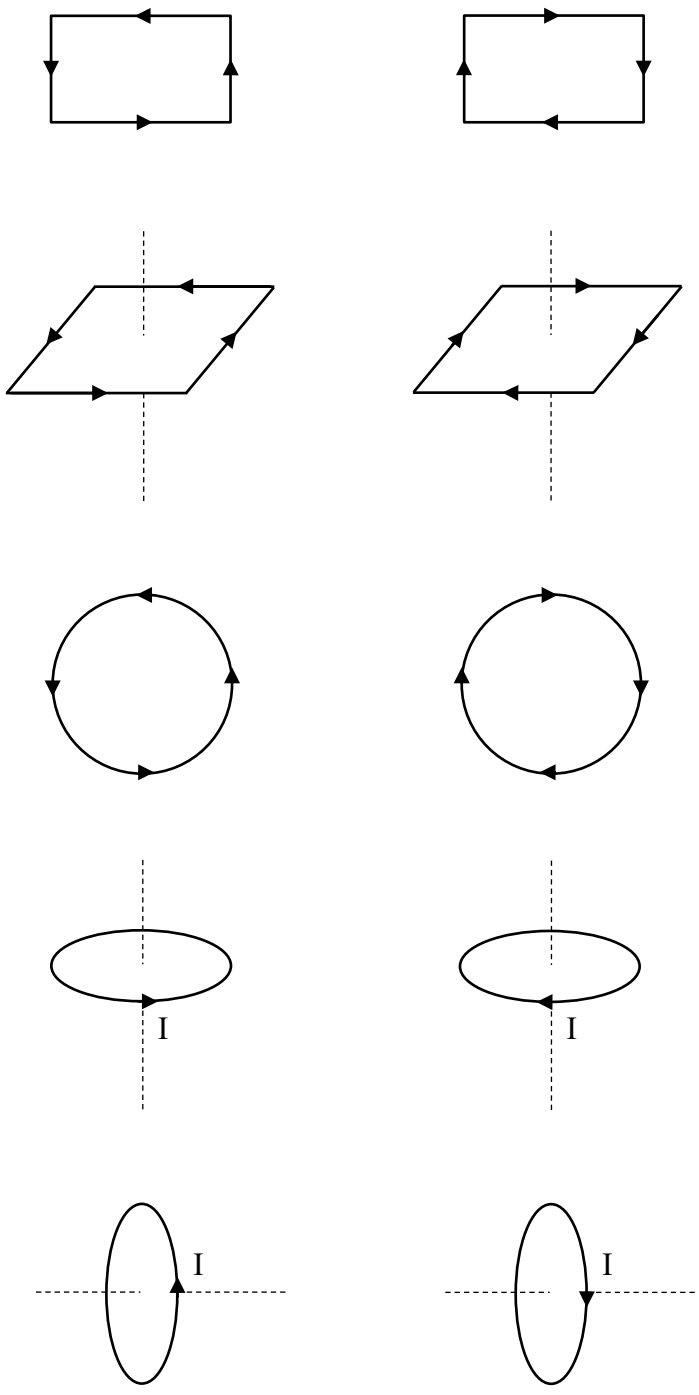
4. 

1.2. (สสวท'60-5-108-3) ลวด 2 เส้น วางตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยใกล้กันมากแต่ไม่สัมผัสกัน และมีกระแสไฟฟ้า I ผ่านเส้นลวดทั้งสองเท่ากันและมีทิศทาง ดังรูป



ตำแหน่งที่สนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์อยู่ในบริเวณใดบ้าง

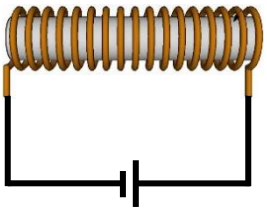
ชวนคิด ถ้านำเส้นลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมาขดให้เป็นสี่เหลี่ยมหรือวงกลม สนามแม่เหล็กที่เกิดจากวงลวดนี้จะมีทิศทางอย่างไร?



กฎมือขวา: ใช้นิ้วทั้งสี่วนตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า I ที่ผ่านลวดตัวนำ นิ้วโป้งจะชี้ทิศทางของสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ที่ผ่านพื้นที่ขดลวด

สนามแม่เหล็กจากขดลวดโซเลนอยด์ (solenoid)

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดโซเลนอยด์จะเกิดสนามแม่เหล็กวนรอบขดลวดเสมือนว่าขดลวดเป็นแท่งแม่เหล็ก



กฎมือขวา: ใช้นิ้วทั้งสี่วนตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า I ที่ผ่านลวดตัวนำ นิ้วโป้งจะชี้ทิศทางของสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ที่ผ่านพื้นที่ขดลวด

ฟลักซ์แม่เหล็ก

- **ฟลักซ์แม่เหล็ก** (magnetic flux, Ø)

  ฟลักซ์แม่เหล็ก คือ จำนวนเส้นสนามแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ที่พิจารณา มีหน่วยเป็นเวเบอร์ (Weber, Wb)

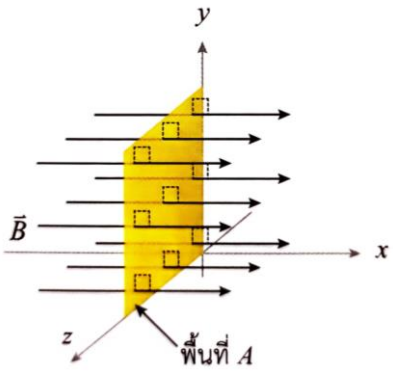
- **ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก** (magnetic flux density, B) **หรือความเข้มหรือขนาดของสนามแม่เหล็ก**

  ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก คือ อัตราส่วนระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กต่อพื้นที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์ต่อตารางเมตร (Wb/m^2) หรือเทสลา (Tesla, T)

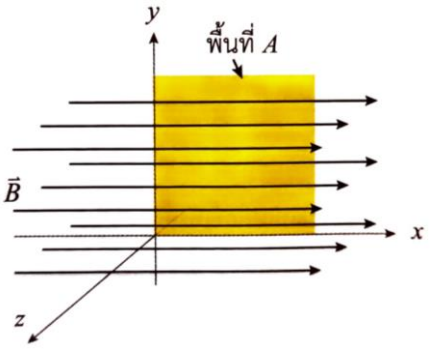
$$B = \frac{\emptyset}{A_{\perp}}$$

1.3. (สสวท'60-5-24-ตย.1) จงหาฟลักซ์แม่เหล็กในแต่ละข้อต่อไปนี้ โดยพื้นที่ A มีค่าเท่ากับ 0.8 ตารางเมตร และมีสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอตลอดพื้นที่เท่ากับ 0.5 เทสลา ในแนวแกน x

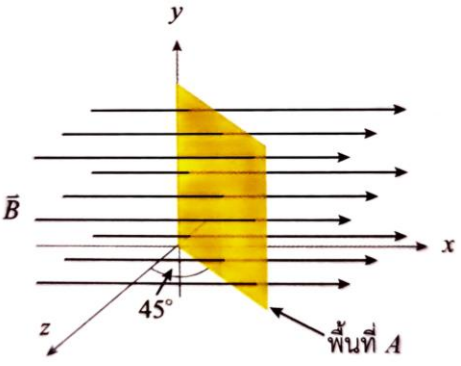
a) พื้นที่ A อยู่ในระนาบ yz



b) พื้นที่ A อยู่ในระนาบ xy



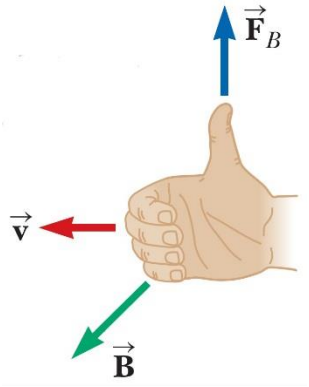
c) พื้นที่ A ระนาบทำมุม 45 องศากับแกน z



2. แรงแม่เหล็ก (magnetic force, $\vec{F}_B$)

แรงแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า

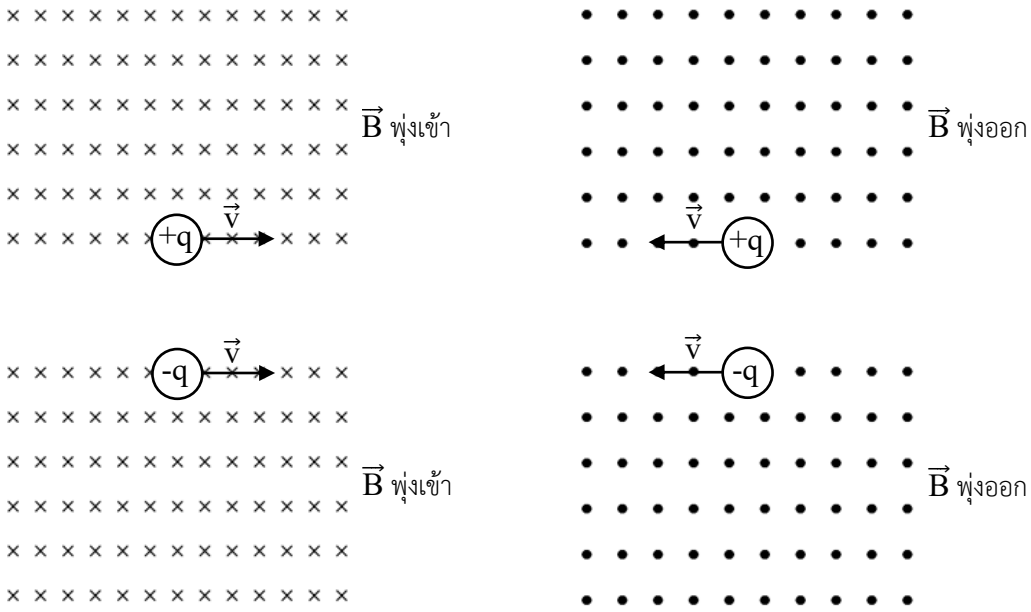
เมื่อประจุไฟฟ้า q เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $\vec{v}$ ในสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ จะมีแรงแม่เหล็ก $\vec{F}_B$ กระทำต่อประจุตามสมการ



$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

- **ประจุเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก**

กฎมือขวา: ชี้นิ้วทั้งสี่ไปตามทิศทางของความเร็ว $\vec{v}$ แล้ววนนิ้วทั้งสี่ไปหาทิศทางของสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ นิ้วโป้งจะชี้ทิศทางของแรง $\vec{F}$



จะเห็นได้ว่า เมื่อประจุเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก จะมีแรงแม่เหล็กกระทำต่อประจุในแนวตั้งฉากกับความเร็วตลอดเวลาทำให้ประจุเคลื่อนที่เป็นวงกลมในสนามแม่เหล็ก โดยมีแรงแม่เหล็กทำหน้าที่เป็นแรงสู่ศูนย์กลาง

$$\Sigma F_c = \frac{mv^2}{r}$$

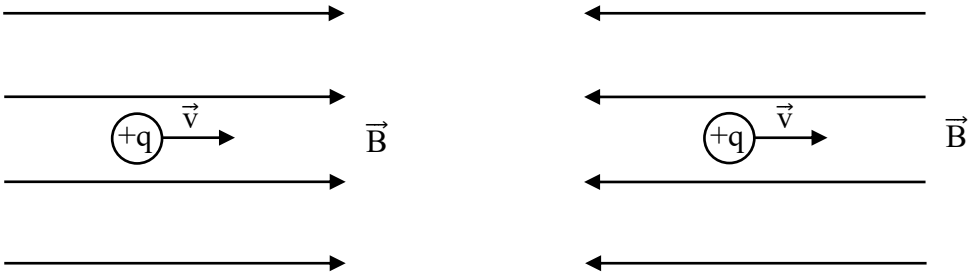
$$\boxed{qvB = \frac{mv^2}{r}}$$

จะได้ รัศมี $r = \frac{mv}{qB}$

คาบ $T = \frac{2\pi m}{qB}$

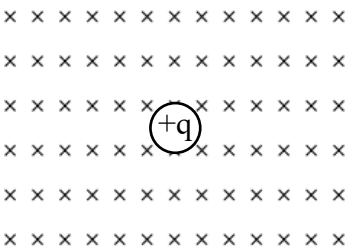
- **ประจุเคลื่อนที่ขนานกับสนามแม่เหล็ก**

  จะไม่มีแรงแม่เหล็กกระทำต่อประจุ มันจึงเคลื่อนที่ต่อไปด้วยความเร็วคงที่



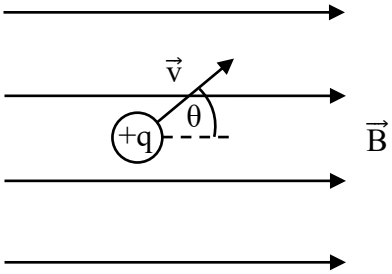
- **ประจุอยู่นิ่งในสนามแม่เหล็ก**

  จะไม่มีแรงแม่เหล็กกระทำต่อประจุ มันจึงอยู่นิ่งต่อไปเรื่อยๆ

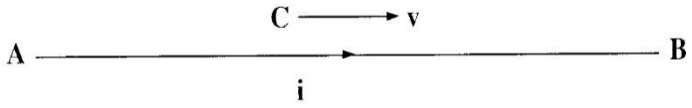


- **ประจุเคลื่อนที่ทำมุม θ กับสนามแม่เหล็ก**

  จะมีแรงแม่เหล็กกระทำต่อประจุ ทำให้ประจุเคลื่อนที่โค้งเป็นรูปเกลียว

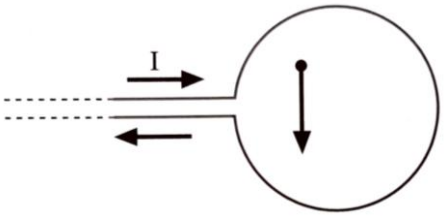


2.1. (ENT'42 มี.ค.) AB เป็นส่วนของลวดตรงยาวมีกระแส i จาก A ไป B และมีอิเล็กตรอนประจุ -e กำลังวิ่งผ่านจุด C ด้วยความเร็ว v ซึ่งมีทิศขนานกับ AB ดังรูป ขณะนั้นอิเล็กตรอนมีความเร่งตามข้อใด



1. มีความเร่งในทิศเข้าหาเส้น AB
2. มีความเร่งในทิศออกจากเส้น AB
3. มีความเร่งในทิศขนานกับการเคลื่อนที่
4. ไม่มีความเร่ง

2.2. (A-NET'50) อิเล็กตรอนกำลังเคลื่อนที่ลงล่างในระนาบของขดลวด เมื่อปล่อยกระแส I ไหลดังรูป แรงกระทำต่ออิเล็กตรอนจะเป็นตามข้อใด



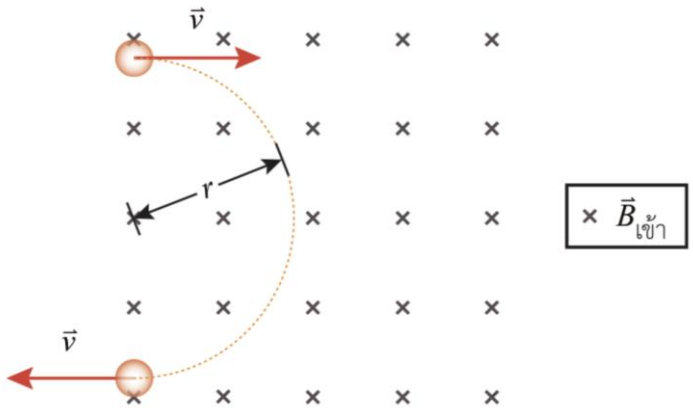
1. ไม่มีแรงกระทำ
2. แรงกระทำในทิศขึ้น
3. แรงกระทำไปทางขวา
4. แรงกระทำไปทางซ้าย

2.3. (สสวท'60-5-33-ตย.15.3) ในบริเวณหนึ่งมีสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอเท่ากับ 0.2 มิลลิเทสลา ในทิศทาง +x โปรตอนถูกยิงให้มีความเร็วในทิศทาง +y ด้วยอัตราเร็ว 3.0×10^{6} เมตรต่อวินาที จงหาทิศทางและขนาดของแรงที่กระทำต่อโปรตอน ณ ขณะนั้น (กำหนดให้โปรตอนมีประจุไฟฟ้า 1.6×10^{-19} คูลอมบ์)

2.4. (สสวท'60-5-110-5) อนุภาคแอลฟามีมวล 6.68×10^{-27} กิโลกรัม และมีประจุ $+3.20 \times 10^{-19}$ คูลอมบ์ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 3.0×10^{6} เมตรต่อวินาที ในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 1.0 เทสลา เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟาเป็นวงกลมที่มีรัศมีเท่าใด

HW-2.4 (สสวท'60-5-110-6) ดิวเทอรอนเป็นนิวเคลียสของดิวเทอเรียมมีมวล 3.34×10^{-27} กิโลกรัม และประจุ $+1.60 \times 10^{-19}$ คูลอมบ์ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 4.0×10^{6} เมตรต่อวินาที ในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ ทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของดิวเทอรอนเป็นวงกลมรัศมี 10 เซนติเมตร จงหาขนาดของสนามแม่เหล็ก

2.5. (สสวท'60-5-36-ตย.15.5) ในการทดลองวัดอัตราเร็วของอิเล็กตรอนที่ถูกยิงเข้าไปในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ดังรูป



พบว่าอิเล็กตรอนมีรัศมีการเคลื่อนที่ 8.5 เซนติเมตร สนามแม่เหล็กมีขนาด 0.2 มิลลิเทสลา

กำหนดให้อิเล็กตรอนมีมวล 9.1×10^{-31} กิโลกรัม และมีประจุไฟฟ้า 1.6×10^{-19} คูลอมบ์

จงหา

a) อัตราเร็วของอิเล็กตรอนที่ถูกยิงเข้าไป

b) ขนาดของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออิเล็กตรอน

HW-2.5 (ENT'24) ถ้าสังเกตเห็นได้ว่า รัศมีความโค้งของทางวิ่งของอิเล็กตรอน ประจุ e มวล m ในสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ดังที่เห็นในหลอดตาแมวว่าเป็น R แสดงว่าอิเล็กตรอนวิ่งด้วยอัตราเร็วเท่าใด

1. $\frac{eB}{mR}$
2. $\frac{eR}{mB}$
3. $\frac{e}{mB^2R^2}$
4. $\frac{eBR}{m}$

2.6. ถ้าให้โปรตอนและแอลฟา (ซึ่งมีประจุบวกเป็น 2 เท่าของโปรตอน และมีมวลเป็น 4 เท่าของโปรตอน) เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากัน เข้าไปในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอเดียวกัน โดยทิศความเร็วตั้งฉากกับทิศสนามแม่เหล็ก จงหาอัตราส่วนของรัศมีการเคลื่อนที่ของโปรตอนและแอลฟา

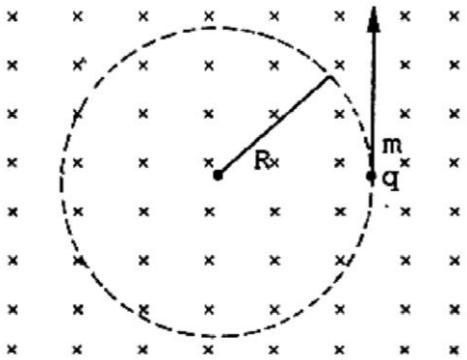
1. 1 : 1
2. 1 : 2
3. 1 : 8
4. 2 : 1

HW-2.6 (ENT'39) อนุภาคมวล m_1 และ m_2 มีประจุและความเร็วเท่ากันเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ มวล m_1 และ m_2 เคลื่อนที่ตามแนวโค้งวงกลมรัศมี 0.50 และ 0.60 เมตร ตามลำดับ มวล m_2 มีค่าเป็นกี่เท่าของมวล m_1

2.7. (ENT'46 ต.ค.) อนุภาคมวล m ประจุ +q กำลังเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กขนาด B เป็นวงกลมรัศมี R จงหาพลังงานจลน์ของอนุภาคนี้

1. $\frac{1}{2}\frac{(BqR)^2}{m}$
2. $\frac{1}{2}m\left(\frac{Bq}{R}\right)^2$
3. $\frac{1}{2}m(BqR)^2$
4. $\frac{1}{2}\frac{R}{m}(Bq)^2$

2.8. (ENT'24) ในเครื่องเร่งอนุภาคแบบไซโคลตรอน อนุภาคมวล m ประจุ q จะถูกบังคับให้วิ่งเป็นวงกลมด้วยสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับระนาบที่วิ่งขนาด B, คาบ หรือเวลาของการเคลื่อนที่หนึ่งรอบ ซึ่งจะต้องเข้าจังหวะกับการเร่งด้วยสนามไฟฟ้าจะเป็นเท่าใด

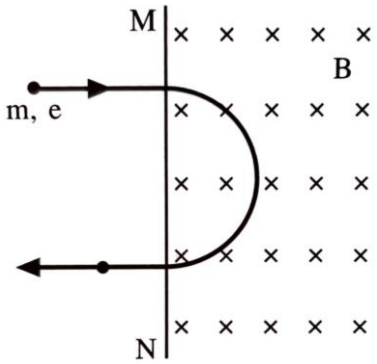


1. $\frac{2\pi q}{mB}$
2. $\frac{2\pi m}{qB}$
3. $\frac{2\pi B}{mq}$
4. $\frac{2\pi qB}{m}$

HW-2-8 (ENT'33) ในเครื่องเร่งอนุภาคบางแบบ อนุภาคจะถูกให้วิ่งเป็นวงกลมโดยใช้สนามแม่เหล็กที่มีทิศตั้งฉากกับแนวที่อนุภาควิ่ง ถ้าสนามแม่เหล็กมีขนาด B และอนุภาคมีมวล m ประจุ q เวลาที่อนุภาควิ่งแต่ละรอบจะต้องเป็นเท่าใด

1. $\frac{2\pi q}{mB}$
2. $\frac{2\pi m}{qB}$
3. $\frac{2\pi B}{mq}$
4. $\frac{2\pi qB}{m}$

2.9. (A-NET'52) ทางขวามือของเส้นตรง MN มีสนามแม่เหล็ก B ชี้เข้าหน้ากระดาษ อิเล็กตรอนมวล m ประจุมีขนาด e เคลื่อนที่เข้าไปในทิศตั้งฉากกับ MN อิเล็กตรอนนี้จะเคลื่อนที่อยู่ในสนามแม่เหล็กนี้เป็นเวลานานเท่าใด



1. $\frac{2\pi m}{eB}$
2. $\frac{\pi m}{eB}$
3. $\frac{eB}{2\pi m}$
4. $\frac{eB}{\pi m}$

HW-2.9 (ENT'29) อิเล็กตรอนมวล m กิโลกรัม เคลื่อนที่เข้าไปในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก B เทสลา ในทิศที่ตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็ก อยากทราบว่าจะใช้เวลาอย่างน้อยเท่าไร ทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจึงจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่เมื่ออิเล็กตรอนเริ่มเข้ามาในบริเวณสนามแม่เหล็ก (กำหนดให้ประจุของอิเล็กตรอนมีค่า q คูลอมบ์)

1. $qB/2\pi m$ วินาที
2. $qB/4\pi m$ วินาที
3. $\pi m/qB$ วินาที
4. $2\pi m/qB$ วินาที

2.10. (ENT'36) อิเล็กตรอนมวล m กิโลกรัม ประจุ e คูลอมบ์ เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงตัว v เมตร/วินาที เข้าไปในบริเวณสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด B เทสลา ในทิศที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่เป็นวงกลม อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ได้กี่รอบต่อวินาทีในสนามแม่เหล็กนั้น

1. $\frac{eB}{2\pi m}$
2. $\frac{2\pi m}{eBv}$
3. $\frac{2\pi m}{eB}$
4. $\frac{eBv}{2\pi m}$

HW-2.10 (ENT'47 มี.ค.) อนุภาคประจุ +q เคลื่อนที่เป็นวงกลมในสนามแม่เหล็กขนาดสม่ำเสมอ B โดยมีความถี่ในการเคลื่อนที่เป็น f จงหามวลของอนุภาคนี้

1. $2\pi fqB$
2. $\frac{qB}{2\pi f}$
3. $2\pi f\frac{q}{B}$
4. $2\pi f\frac{B}{q}$

แรงแม่เหล็กกระทำต่อลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน

เมื่อเส้นลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน I ยาว l วางอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ พบว่ามีแรงแม่เหล็กกระทำต่อเส้นลวดตามสมการ

$$\boxed{\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}}$$

พิสูจน์ $\boxed{\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}}$

กระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำเส้นตรงเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระด้วยความเร็วลอยเลื่อน $\vec{v}_d$ ดังนั้นเมื่อลวดตัวนำวางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ จะเกิดแรงแม่เหล็กกระทำต่ออิเล็กตรอนอิสระประจุ e เหล่านี้ตามสมการ

$$\vec{F}_e = e\vec{v}_d \times \vec{B}$$

พิจารณาตลอดความยาวลวดมีอิเล็กตรอนอิสระจำนวน N อนุภาคอยู่ภายในลวดตัวนำ ดังนั้นขนาดแรงลัพธ์ $\vec{F}$ ที่กระทำต่อลวดตัวนำเท่ากับผลรวมแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออิเล็กตรอนอิสระ N อนุภาค ตามสมการ

$$\vec{F} = N(e\vec{v}_d \times \vec{B})$$
$$\vec{F} = Q\vec{v}_d \times \vec{B}$$

ถ้าประจุไฟฟ้า Q เคลื่อนที่ผ่านภาคตัดขวางของลวดตัวนำในเวลา t เป็นระยะทางเท่ากับความยาวลวดตัวนำ l ที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก จากนิยามของกระแสไฟฟ้าเขียนได้ว่า

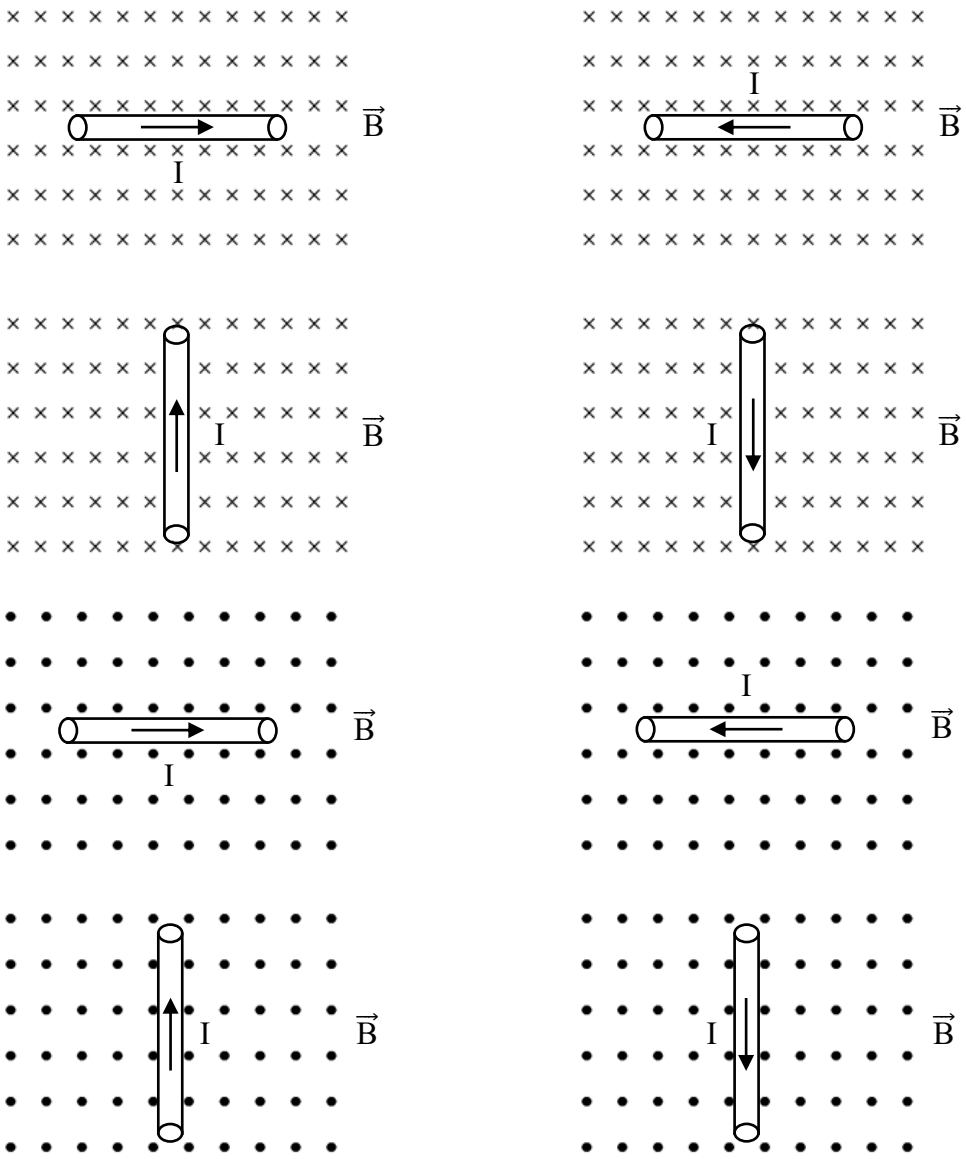
$$Q = It \quad \text{และ} \quad v_d = \frac{l}{t}$$

จะได้ $$\vec{F} = (It)\left(\frac{\vec{l}}{t}\right) \times \vec{B}$$

$$\boxed{\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}}$$

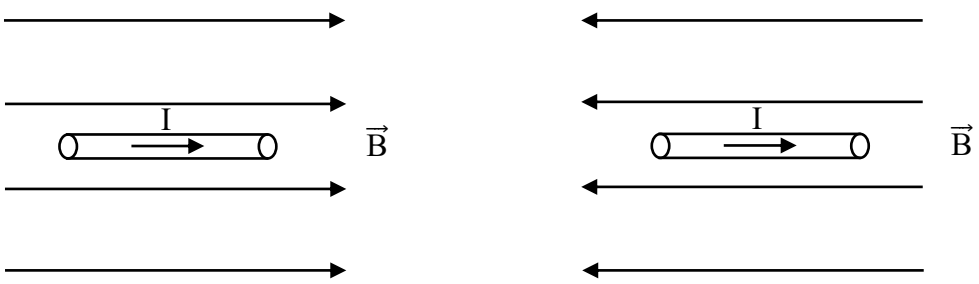
- **ลวดตัวนำวางตัวในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก**

  กฎมือขวา: ใช้มือขวาชี้นิ้วทั้งสี่ไปตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า I แล้ววนนิ้วทั้งสี่ไปหาทิศทางสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ นิ้วโป้งจะชี้ทิศทางของแรง $\vec{F}$

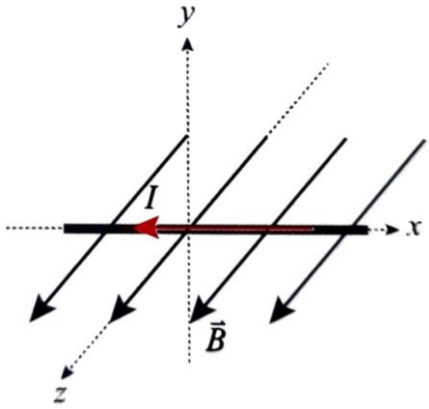


- **ลวดตัวนำวางตัวในแนวขนานกับสนามแม่เหล็ก**

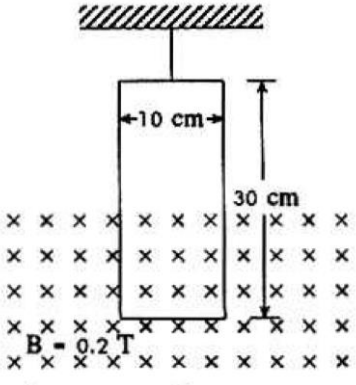
  จะไม่มีแรงแม่เหล็กกระทำต่อเส้นลวด



2.11. (สสวท'60-5-43-ตย.15.6) ลวดตัวนำเส้นหนึ่งมีความยาว 20 เซนติเมตร วางในแนวแกน x อยู่ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอทิศทาง +z ขนาด 0.4 เทสลา ถ้าเส้นลวดนี้มีกระแสไฟฟ้าผ่าน 0.5 แอมแปร์ ในทิศทาง -x ดังรูป ขนาดและทิศทางของแรงที่กระทำต่อลวดตัวนำเป็นเท่าใด



2.12. (ENT'37) ขดลวดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 10 เซนติเมตร × 30 เซนติเมตร แขวนยึดติดเพดานด้วยเชือก ปลายล่างของขดลวดอยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีความเข้ม 0.2 เทสลา ทิศทางดังรูป จะต้องมีกระแสไหลในขดลวดเท่าใด และมีทิศทางใด จึงจะทำให้ความตึงในเส้นเชือกที่แขวนขดลวดไว้มีขนาด 6×10^{-2} นิวตัน ในที่นี้ไม่คิดมวลของขดลวด

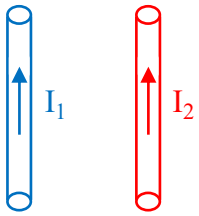


1. 3 A ตามเข็มนาฬิกา
2. 3 A ทวนเข็มนาฬิกา
3. 1 A ตามเข็มนาฬิกา
4. 1 A ทวนเข็มนาฬิกา

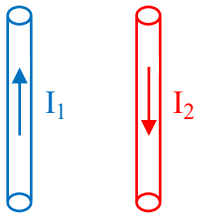
แรงระหว่างลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้า

เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำเส้นตรงจะเกิดสนามแม่เหล็กโดยรอบ เราสามารถหาทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ เส้นลวดเส้นที่หนึ่งโดยใช้กฎของ Oersted

หากนำลวดตัวนำเส้นตรงสองเส้นมาวางใกล้กันเมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำทั้งสองจะเกิดแรงระหว่างลวดตัวนำ เราสามารถหาทิศของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อเส้นลวดแต่ละเส้นโดยใช้กฎมือขวา



เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำทั้งสองในทิศทางเดียวกัน จะเกิดแรง_____ระหว่างลวดตัวนำทั้งสอง

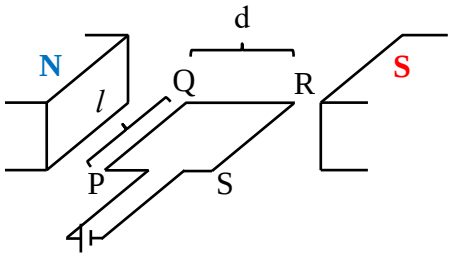


เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำทั้งสองในทิศทางตรงข้ามกัน จะเกิดแรง_____ระหว่างลวดตัวนำทั้งสอง

3. โมเมนต์ของแรงคู่ควบกระทำต่อขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก

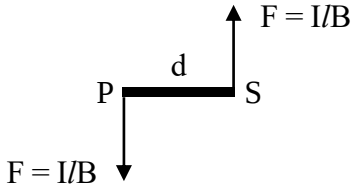
โมเมนต์ของแรงคู่ควบ (moment of a couple)

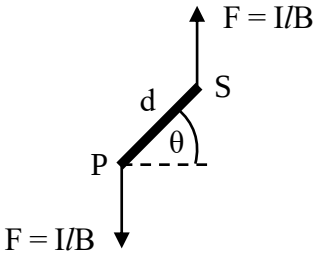
พิจารณาขดลวดตัวนำรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (PQRS) วางให้ระนาบขดลวดขนานกับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ดังรูป



เมื่อให้กระแสไฟฟ้า I ผ่านขดลวดในทิศทาง $P \rightarrow Q \rightarrow R \rightarrow S$ จะเกิดแรงแม่เหล็กกระทำต่อแต่ละส่วนของขดลวดดังนี้

- ด้าน PS และ QR กระแสไฟฟ้าขนานกับสนามแม่เหล็ก ไม่เกิดแรงกระทำ
- ด้าน PQ และ RS กระแสไฟฟ้าตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก เกิดแรงกระทำต่อด้านทั้งสองมีขนาดเท่ากัน (เท่ากับ $F = Il B$) แต่ทิศทางตรงข้ามกัน จึงเป็นแรงคู่ควบ ทำให้เกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบ





โมเมนต์ของแรงคู่ควบ = ขนาดของแรงใดแรงหนึ่ง × ระยะทางตั้งฉากระหว่างแนวแรงทั้งสอง

$$M_c = Il B \times d$$

ถ้าวางขดลวดให้ระนาบขดลวดทำมุม θ กับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ จะได้ว่า

$$M_c = Il B \times d \cos\theta$$

กำหนดให้ A เป็นพื้นที่ของขดลวด มีค่าเท่ากับ ld ดังนั้น

$$M_c = IAB \cos\theta$$

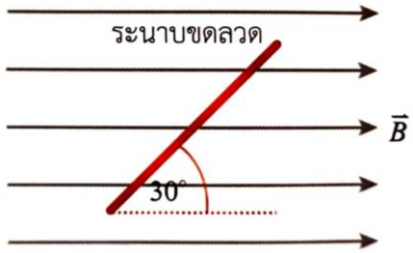
ในกรณีขดลวดตัวนำจำนวน N รอบ จะทำให้เกิดโมเมนต์คู่ควบกระทำต่อขดลวดเป็นจำนวน N เท่าของขดลวด 1 รอบ

$$\boxed{M_c = NIAB \cos\theta}$$

เมื่อ θ คือ มุมระหว่างระนาบขดลวดตัวนำกับสนามแม่เหล็ก

3.1. (สสวท'60-5-111-10) ขดลวดระนาบมีพื้นที่ 800 ตารางเซนติเมตร จำนวน 20 รอบ และระนาบของขดลวดขนานกับสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอมีขนาด 0.3 เทสลา ถ้ามีกระแสไฟฟ้าผ่าน 0.5 แอมแปร์ ขนาดของโมเมนต์ของแรงคู่ควบที่กระทำต่อขดลวดมีค่าเท่าใด

3.2. (สสวท'60-5-56-ตย.15.8) ขดลวดสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีพื้นที่ 100 ตารางเซนติเมตร มีจำนวน 200 รอบ และมีกระแสไฟฟ้าผ่าน 0.1 แอมแปร์ ขดลวดนี้วางอยู่ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 0.5 เทสลา โดยระนาบของขดลวดทำมุม 30 องศากับสนามแม่เหล็ก ดังรูป โมเมนต์ของแรงคู่ควบที่กระทำต่อขดลวดมีค่าเท่าใด

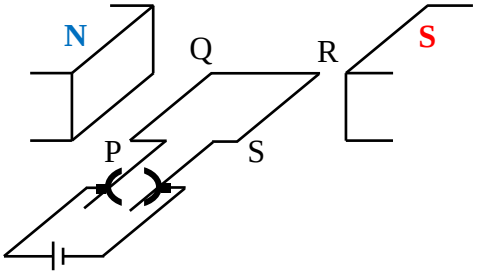


3.3. (ENT'42 ต.ค.) ขดลวดตัวนำรูปสี่เหลี่ยมมีพื้นที่ 12 ตารางเซนติเมตร มีระนาบอยู่ในแนวระดับ วางตัวอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก 4 เทสลาในแนวดิ่ง ถ้าจำนวนขดของลวดตัวนำเท่ากับ 500 รอบ จงหาโมเมนต์ของแรงคู่ควบที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งนั้น ถ้าค่าของกระแสที่ผ่านขดลวดเท่ากับ 5 แอมแปร์

1. 1.2×10^{6} N.m
2. 6×10^{5} N.m
3. 12.0 N.m
4. 0 N.m

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (direct-current motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้ ประกอบด้วยขดลวดทองแดงเคลือบฉนวน พันเป็นรูปสี่เหลี่ยมติดกับแกนหมุนได้คล่องในสนามแม่เหล็ก และส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางของกระแสไฟฟ้าในขดลวด คือ คอมมิวเทเตอร์วงแหวนผ่าซีก (split-ring commutator) และแปรงสัมผัส (contact brush)

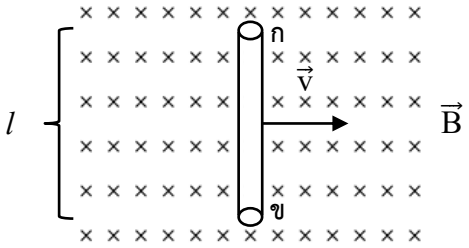


เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดตัวนำในทิศทาง P → Q → R → S จะเกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบหมุนขดลวดรอบแกนหมุนทวนเข็มนาฬิกา เมื่อขดลวดหมุนไปจนระนาบของขดลวดตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก โมเมนต์ของแรงคู่ควบมีค่าเป็นศูนย์ แต่เนื่องจากความเฉื่อยจึงทำให้ขดลวดหมุนต่อไป โดยแปรงสัมผัสจะเปลี่ยนจากสัมผัสคอมมิวเทเตอร์ด้านหนึ่งไปสัมผัสกับคอมมิวเทเตอร์อีกด้านหนึ่ง ทำให้กระแสฟ้าในขดลวดมีทิศทาง S → R → Q → P โมเมนต์ของแรงคู่ควบที่เกิดขึ้นในขณะนี้จะทำให้ขดลวดหมุนในทางเดิมต่อไป

4. กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำและอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ (induced electric current and induced EMF)

จากการศึกษากฎของเออร์สเตดพบว่ากระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำ ในทางกลับกัน สนามแม่เหล็กก็สามารถทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำได้เช่นกัน

เมื่อออกแรงดึงลวดตัวนำตรงยาว l ให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว $\vec{v}$ ตัดกับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ซึ่งตั้งฉากกับลวด จะเกิดแรงแม่เหล็กกระทำต่ออิเล็กตรอนอิสระบนลวดในทิศลง ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังปลาย ข ของเส้นลวด จึงเกิดสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ ขึ้นภายในเนื้อเส้นลวดในทิศทางจาก ก ไป ข (บวกไปลบ)



อิเล็กตรอนจะค่อยๆ เคลื่อนที่ไปยังปลาย ข เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดแรงไฟฟ้า (ทิศขึ้น) ต้านกับแรงแม่เหล็ก (ทิศลง) ที่กระทำต่ออิเล็กตรอนได้พอดี อิเล็กตรอนจะอยู่ในสภาพสมดุล นั่นคือ

$$qE = qvB$$

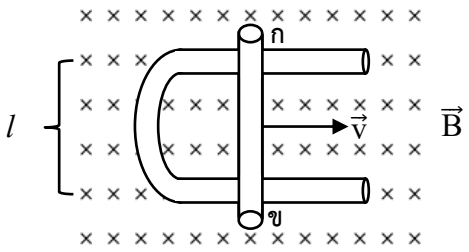
$$E = vB$$

เมื่อปลายทั้งสองของเส้นลวดมีประจุต่างชนิดกันทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า ΔV ระหว่างปลายทั้งสองของเส้นลวด ตามสมการ

$$\Delta V = El$$

$$\boxed{\Delta V = vBl}$$

ถ้าต่อเส้นลวดตรงนี้ให้ครบวงจร โดยต่อกับรางลวดรูปตัว U ดังรูป

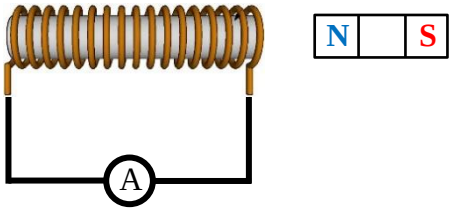


เมื่อจากนั้นออกแรงดึงเส้นลวดตรงให้เคลื่อนที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในวงจร โดยเส้นลวดตรงทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า E ตามสมการ

$$\boxed{E = vBl}$$

กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's law of induction)

จากการทดลองโดยใช้ขดลวดและแท่งแม่เหล็กพบว่า ขณะแท่งแม่เหล็กอยู่นิ่งจะไม่มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น แต่เมื่อเคลื่อนแท่งแม่เหล็กเข้าหาขดลวดจะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในขดลวดในทิศทางหนึ่ง และเมื่อเคลื่อนแท่งแม่เหล็กออกจากขดลวดจะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในทิศทางตรงข้าม นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเคลื่อนแท่งแม่เหล็กให้เร็วขึ้นจะเกิดกระแสไฟฟ้ามากขึ้นด้วย



การเคลื่อนแท่งแม่เหล็กเป็นการทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดขดลวดเปลี่ยนแปลงจึงทำให้เกิด '**กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ** (induced electric current)' ในขดลวด และเรียกการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในตัวนำด้วยสนามแม่เหล็กว่า '**การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า** (electromagnetic induction)'

ฟาราเดย์ ได้เสนอกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ สรุปได้ว่า "เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดขดลวดตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิด**อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ (induced electromotive force: E)** ในขดลวดตัวนำนั้น มีค่าขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดขดลวดตัวนำ" ตามสมการ

$$E = -\frac{\Delta \phi_B}{\Delta t}$$

ส่วนทิศทางของกระแสเหนี่ยวนำเป็นไปตามกฎของเลนซ์ เครื่องหมายลบในสมการเป็นไปตามกฎของเลนซ์ มีความหมายว่าอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น มีทิศทางต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่มาเหนี่ยวนำ

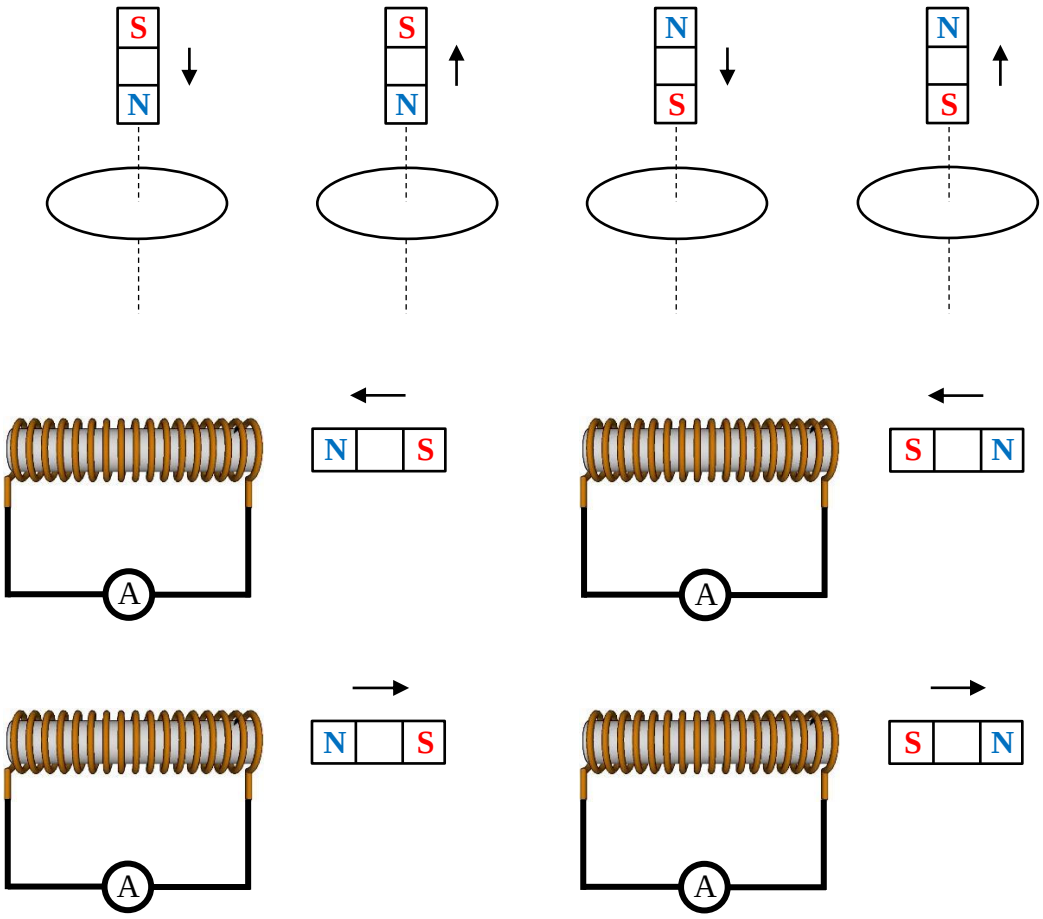
กฎของเลนซ์ (Lenz's law)

"กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดจะเกิดขึ้นในทิศทางที่ทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กใหม่ต้านการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กเดิม"

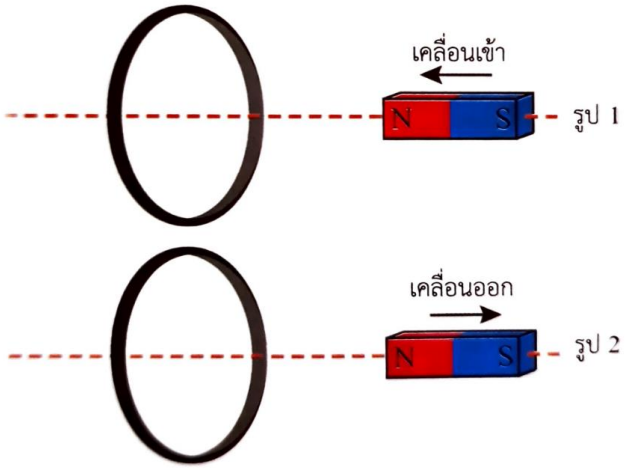
ขั้นตอนการหาทิศของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดจากการเคลื่อนแท่งแม่เหล็กเข้าหา-ออกจากขดลวด

1. หาทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็กเดิมที่ตัดผ่านขดลวด
2. พิจารณาว่าการเคลื่อนแท่งแม่เหล็กเข้าหรือออกจากขดลวดมีผลต่อฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดอย่างไร
   - ถ้าเคลื่อนแท่งแม่เหล็กเข้าหาขดลวด จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดเพิ่มขึ้น
   - ถ้าเคลื่อนแท่งแม่เหล็กออกจากขดลวด จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดลดลง
3. ถ้าฟลักซ์แม่เหล็กเดิมที่ตัดผ่านขดลวดเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดต้องเกิดในทิศทางที่ทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กใหม่ชี้ไปในทิศทางตรงข้ามกับฟลักซ์แม่เหล็กเดิม เพื่อหักล้างให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดยังคงเท่าเดิม

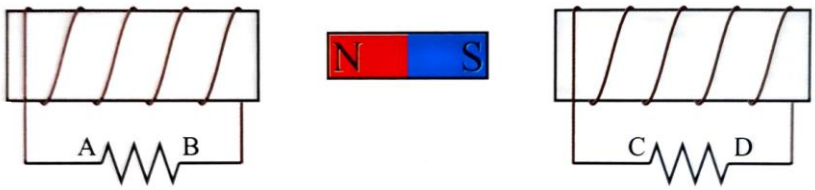
   แต่ถ้าฟลักซ์แม่เหล็กเดิมที่ตัดผ่านขดลวดลดลง กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดต้องเกิดในทิศทางที่ทำให้เกิด ฟลักซ์แม่เหล็กใหม่ชี้ไปในทิศทางเดียวกันกับฟลักซ์แม่เหล็กเดิม เพื่อชดเชยให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดยังคงเท่าเดิม



4.1. (สสวท'60-5-84-3) จากรูป 1 ถ้าเคลื่อนขั้ว N ของแท่งแม่เหล็กเข้าหาศูนย์กลางของขดลวด และจากรูป 2 เคลื่อนขั้ว N ของแม่เหล็กออกจากศูนย์กลางของขดลวด จงเขียนทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในลวดทั้งสอง



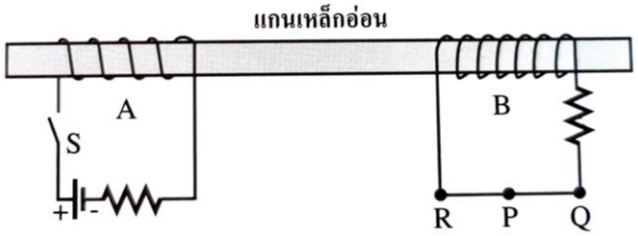
4.2. (สสวท'60-5-83-2) จากรูป กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะผ่านตัวต้านทาน AB และ CD ในทิศทางใด เมื่อ



a) เคลื่อนแท่งแม่เหล็กไปทางขวา

b) เคลื่อนแท่งแม่เหล็กไปทางซ้าย

4.3. (A-NET'51) เมื่อสับสวิทช์ S ให้ครบวงจร จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร B ในทิศใด



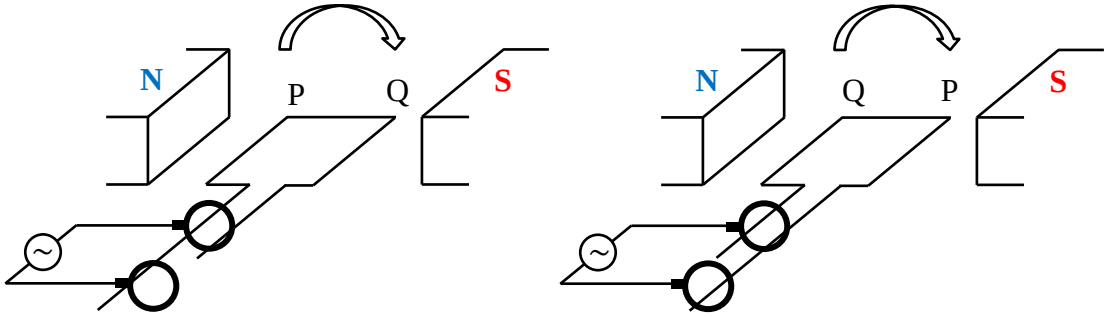
1. ไม่มีกระแสไหล
2. กระแสไฟฟ้าไหลในทิศ R ⟶ P ⟶ Q
3. กระแสไฟฟ้าไหลในทิศ Q ⟶ P ⟶ R
4. กระแสไฟฟ้าไหลในทิศ R ⟶ P ⟶ Q แล้วกลับทิศเป็น Q ⟶ P ⟶ R

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (electric generator)

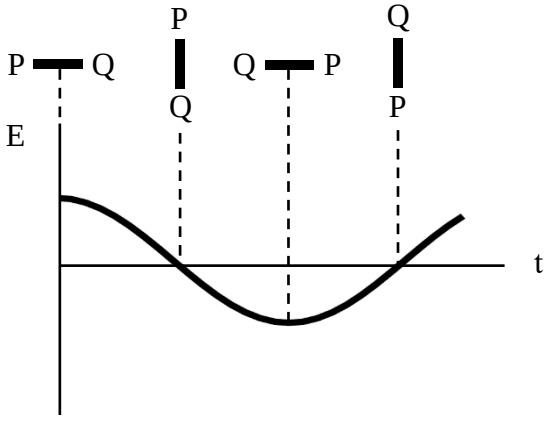
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ประกอบด้วยขดลวดหมุนได้คล่องอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็ก ปลายขดลวดแต่ละด้านต่ออยู่กับวงแหวนและแตะอยู่กับแปรงสัมผัสซึ่งต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอก เมื่อหมุนขดลวดตัดสนามแม่เหล็กจะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในขดลวดตามกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์

- **เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ**

ปลายขดลวดแต่ละด้านต่อกับวงแหวนแยก (slip rings) ที่หมุนไปพร้อมกับขดลวด และแตะอยู่กับแปรงสัมผัสอันเดิมตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าจากแปรงสัมผัสไปผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอกมีทิศทางสลับไปมา เรียกว่ากระแสสลับ (Alternating Current: AC)



เมื่อขดลวดหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ω คงตัว ครบหนึ่งรอบโดยใช้เวลา T กราฟการเปลี่ยนแปลงของอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์



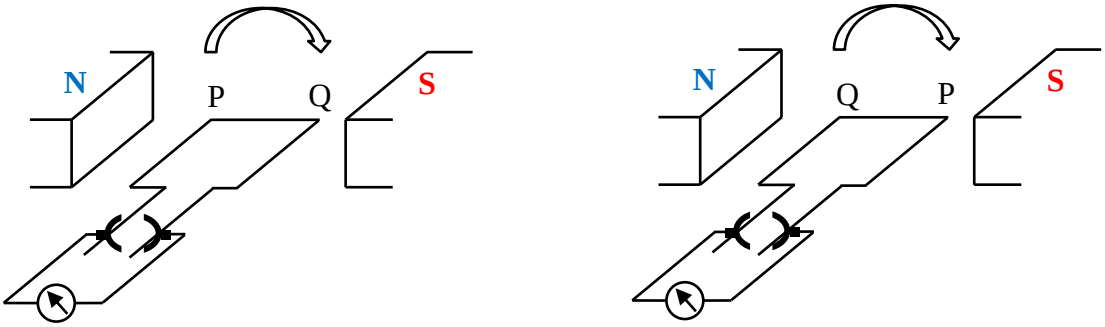
สามารถเขียนสมการอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ E ที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับขณะเวลา t ใดๆ ได้ดังนี้

$$E(t) = E_{max} \sin(\omega t)$$

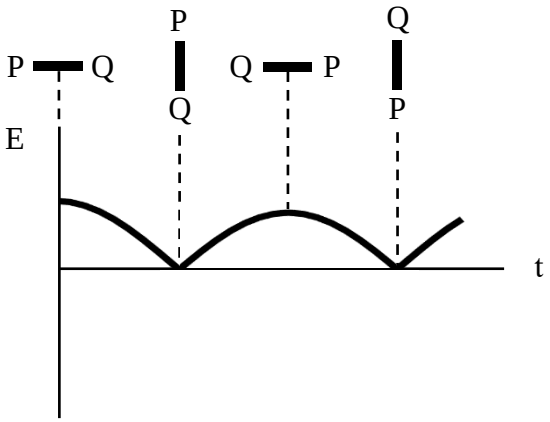
เมื่อ $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ คือ ความถี่เชิงมุม (rad/s)

- **เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง**

ปลายขดลวดแต่ละด้านต่อกับวงแหวนผ่าซีก (split rings) ที่หมุนไปพร้อมกับขดลวด และสลับการแตะกับแปรงสัมผัสทุกครึ่งรอบ ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าจากแปรงสัมผัสไปผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอกมีทิศทางเดียว เรียกว่า กระแสตรง (Direct Current: DC)



สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำกับเวลา ได้ดังรูป

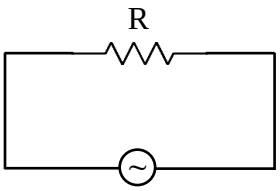


5. ไฟฟ้ากระแสสลับ

จากการพิจารณาการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับทำให้ทราบว่าอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเปลี่ยนแปลงตามเวลาตามสมการ

$$E\,(t) = E_{max} \sin(\omega t)$$

หากนำตัวต้านทาน R มาต่อกำแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเป็นวงจร ความต่างศักย์ระหว่างปลายตัวต้านทานและกระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรูปของฟังก์ชันแบบไซน์เช่นเดียวกับอีเอ็มเอฟ โดยความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ามีค่ามากที่สุดพร้อมกัน และเป็นศูนย์พร้อมกัน กล่าวคือมีเฟสตรงกัน



สามารถเขียนความต่างศักย์ระหว่างปลายตัวต้านทานและกระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานได้ดังนี้

$$V\,(t) = V_{max} \sin(\omega t)$$

$$I\,(t) = I_{max} \sin(\omega t)$$

ค่าอาร์เอ็มเอส (rms) ของ V กับ I

ในชีวิตประจำวันค่าความต่างศักย์ (และกระแสไฟฟ้า) ถูกวัดหรือระบุเป็นค่าคงตัว เช่น ความต่างศักย์ที่ใช้ตามบ้านเรือนมีค่า _____ โวลต์ การวัดหรือระบุค่าเช่นนี้เป็นการเทียบค่ากับไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเรียกว่า '**ค่ายังผล** (effective value)' หรือเป็นค่าที่ได้จากเครื่องวัดเรียกว่า '**ค่ามิเตอร์** (meter value)' ค่านี้จะเป็น '**ค่า**_____ (root mean square)' หรือ '**ค่าอาร์เอ็มเอส** (rms value)'

ค่าอาร์เอ็มเอสของความต่างศักย์ (และกระแสไฟฟ้า) คำนวณได้จาก

$$V_{rms}=\sqrt{\overline{V^2}} \qquad I_{rms}=\sqrt{\overline{I^2}}$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (และกระแสไฟฟ้า) ยกกำลังสองกับเวลา จะได้ดังรูป

เราสามารถหาค่าเฉลี่ยของความต่างศักย์ (และกระแสไฟฟ้า) ยกกำลังสองจากพื้นที่ใต้กราฟในช่วงเวลาหนึ่งคาบ ซึ่งมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดยกกำลังสอง จะได้

$$\overline{V^2}=\frac{V_{max}^2}{2} \qquad \overline{I^2}=\frac{I_{max}^2}{2}$$

$$\sqrt{\overline{V^2}}=\sqrt{\frac{V_{max}^2}{2}} \qquad \sqrt{\overline{I^2}}=\sqrt{\frac{I_{max}^2}{2}}$$

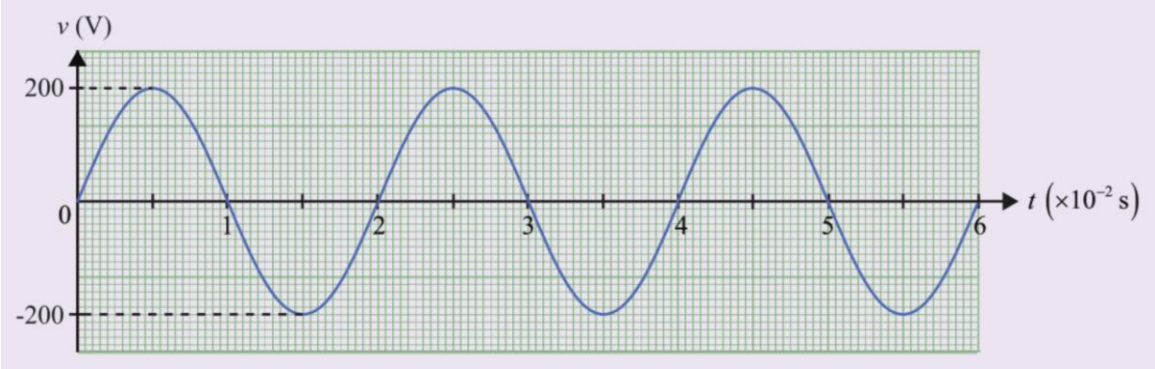
$$\boxed{V_{rms}=\frac{V_{max}}{\sqrt{2}}} \qquad \boxed{I_{rms}=\frac{I_{max}}{\sqrt{2}}}$$

5.1. (สสวท'60-5-89-ตย.15.11) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับต่ออยู่กับตัวต้านทานตัวหนึ่ง จงหา

a) ความต่างศักย์สูงสุดระหว่างปลายของตัวต้านทานนี้ เมื่อวัดความต่างศักย์ได้ 45 โวลต์

b) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ผ่านตัวต้านทาน เมื่อวัดกระแสไฟฟ้าได้ 2.5 แอมแปร์

5.2. (สสวท'60-5-114-17) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ V ที่เวลา t ใดๆ ของไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นดังกราฟ



จงหา

a) ความต่างศักย์สูงสุด

b) ความต่างศักย์อาร์เอ็มเอส

c) คาบของไฟฟ้ากระแสสลับ

d) ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ

5.3. (สสวท'60-5-101-1) ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีกระแสไฟฟ้า I และเวลา t ตามสมการ

$$I = 2 \sin 314t$$

จงหา

a) กระแสไฟฟ้าสูงสุด

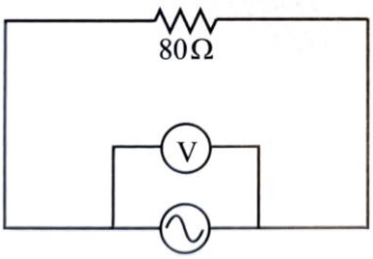
b) ความถี่

c) กระแสไฟฟ้ายังผล

5.4. (ENT'45 มี.ค.) โวลต์มิเตอร์ตัวหนึ่งอ่านค่าความต่างศักย์ของไฟบ้านซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 50 เฮิรตซ์ ได้ 200 โวลต์ ถ้า V เป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างคู่สายที่เวลา t ใดๆ ข้อใดต่อไปนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V และ t ได้ถูกต้อง

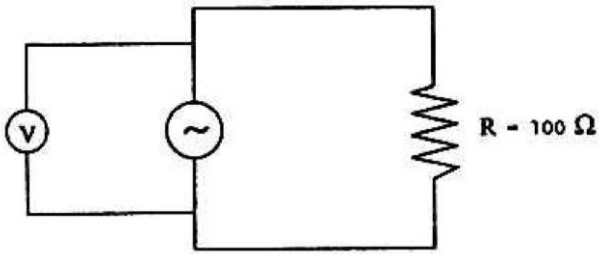
1. $V = 283 \sin (100\pi t)$
2. $V = 200 \sin (100\pi t)$
3. $V = 283 \sin (50\pi t)$
4. $V = 200 \sin (50\pi t)$

5.5. (สสวท'60-5-101-2) ตัวต้านทานที่มีความต้านทาน 80 โอห์ม ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับโดยมีโวลต์มิเตอร์อยู่ในวงจร ดังรูป



โวลต์มิเตอร์วัดความต่างศักย์ได้ 120 โวลต์ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ผ่านตัวต้านทานนี้มีค่าเท่าใด

HW-5.5 (ENT'41 ต.ค.) ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับดังรูป ถ้าโวลต์มิเตอร์ V อ่านค่าความต่างศักย์ได้ 200 โวลต์ จงหากระแสสูงสุดที่ผ่านความต้านทาน R



1. 0.70 A
2. 1.41 A
3. 2.0 A
4. 4.8 A