บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สนามแม่เหล็ก [1][2][3]

สนามแม่เหล็ก หมายถึง บริเวณที่แม่เหล็กสามารถส่งอำนาจหรือแรงแม่เหล็กไปถึง หรือบริเวณที่มีแรงทางแม่เหล็กกระทำบนอนุภาคหรือประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านบริเวณนั้น

ฟลักซ์แม่เหล็ก หมายถึง คือปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กหรือจำนวนของเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งจากขั้วหนึ่งไปยังขั้วหนึ่ง ของแท่งแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ (Weber,Wb)

ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก หรือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก คือ จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วย พื้นที่ที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่านตั้งฉากเป็นปริมาณเวกเตอร์ มีหน่วยเป็น เวเบอร์ต่อตารางเมตร (Wb/m^2)หรือ เทสลา (Tesla,T)

ถ้าให้ B = ขนาดของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเวเบอร์ต่อตารางเมตร หรือ เทสลา

$\emptyset$ = ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ มีหน่วยเวเบอร์

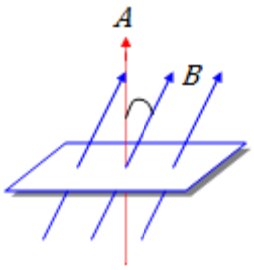
A = พื้นที่ตั้งฉากกับฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยตารางเมตร

จะได้

$$B = \frac{\emptyset}{A} \tag{2.1}$$

ถ้าสนามแม่เหล็กไม่ตั้งฉากกับพื้นที่ ทำให้ทิศสนามแม่เหล็กกับทิศของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยพื้นที่ทำมุมต่อกัน θ การหาฟลักซ์แม่เหล็ก หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กและความเข้มสนามแม่เหล็กดังสมการ

$$\emptyset = B \cdot A = AB\cos\theta \tag{2.2}$$



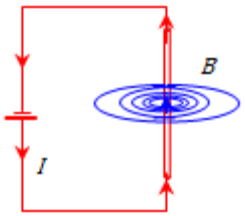
ภาพที่ 2.1 ฟลักซ์แม่เหล็กในสนามแม่เหล็กทิศทำมุมใด ๆ

2.2 กระแสไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก

ในปี พ.ศ. 2363 ฮานส์ เออร์สเตต พบว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำนั้น ที่มีรูปร่างต่างๆกัน

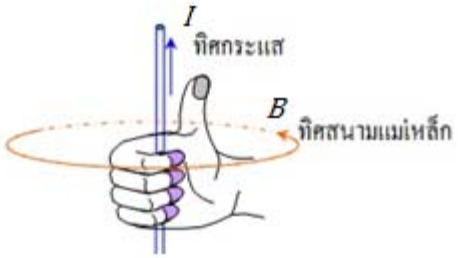
2.2.1 สนามแม่เหล็กของลวดตัวนำตรง

เมื่อปล่อยให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในลวดตัวนำตรง จะมีอำนาจแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบ ๆ ลวดตัวนำนั้น ซึ่งสังเกตได้จากการดูเข็มทิศเล็ก ๆ ที่วางอยู่รอบลวดตัวนำมีการเรียงตัวเป็นวงกลม ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าในเส้นลวดตัวนำตรง

ทิศของสนามแม่เหล็กหาได้จาก **กฎมือขวา** โดยนิ้วมือทั้งสี่กำรอบเส้นลวด หัวแม่มือชี้ไปทางทิศของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวด นิ้วทั้งสี่ที่กำรอบเส้นลวดจะแสดงทิศของสนามแม่เหล็กดังภาพที่ 2.3



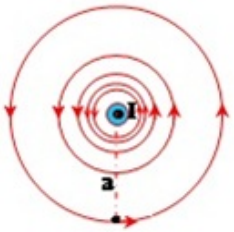
ภาพที่ 2.3 กฎมือขวาพิจารณาทิศสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำตรง[3]

ขนาดของสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านลวดตัวนำ และระยะห่างจากลวดตัวนำ ถึงตำแหน่งที่พิจารณา ถ้าลวดตัวนำยาวมาก เมื่อมีกระแสไฟฟ้า *(I)* ไหลผ่านขนาดของสนามแม่เหล็ก *(B)* ที่ตำแหน่งห่าง จากลวดตัวนำเป็นระยะใด ๆ *(a)* จะมีค่าตามสมการ

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} = 2 \times 10^{-7} \frac{I}{a} \tag{2.3}$$

เมื่อ

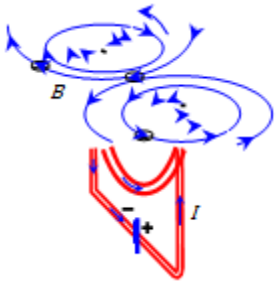
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \qquad \left[\frac{Wb}{A}\right] \tag{2.4}$$



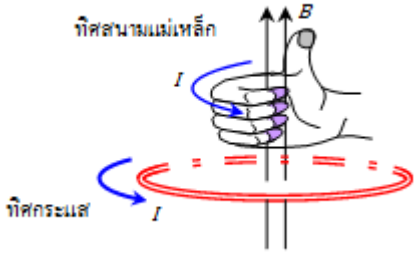
ภาพที่ 2.4 สนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งห่างจากลวดตัวนำ เมื่อ a คือขดลวดตัวนำ

2.2.2 สนามแม่เหล็กของลวดวงกลม

เมื่อกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านลวดตัวนำที่ถูกขดให้เป็นวงกลมกระแสไฟฟ้าจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมารอบ ๆ เส้นลวดทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรวมกันที่ภายในขดลวดวงกลม (ภาพที่ 2.5) โดยทิศของสนามแม่เหล็กในขดลวดวงกลมเป็นไปตาม กฎมือขวา โดยให้นิ้วมือขวาทั้งสี่กำรอบเส้นลวดวงกลมตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า หัวแม่มือที่ชี้ไปจะแสดงทิศของสนามไฟฟ้าภายในขดลวด (ภาพที่2.6)



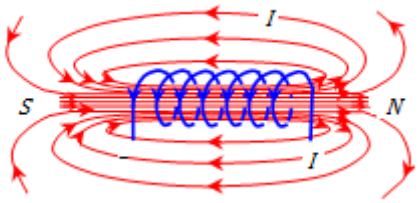
ภาพที่ 2.5 ทิศทางของสนามไฟฟ้าภายในขดลวด[3]



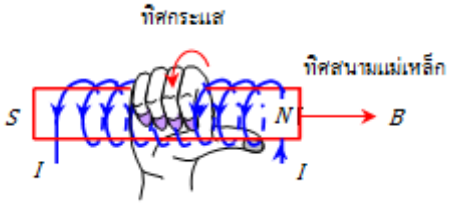
ภาพที่ 2.6 กฎมือขวาพิจารณาทิศสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำวงกลม

2.2.3 สนามแม่เหล็กของโซเลนอยด์

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำที่มีฉนวนหุ้มมาขดเป็นวงกลมหลาย ๆ วง เรียงซ้อนกันเป็นรูปทรงกระบอก ขดลวดที่ได้นี้เรียกว่า **โซเลนอยด์ (Solenoid)** เมื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดโซเลนอยด์ จะมีสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆเส้นลวดทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรวมกันที่ภายในขดลวดโซเลนอยด์ ส่งผลให้ปลายทั้งสองของโซเลนอยด์กลายเป็นขั้วแม่เหล็ก (ภาพที่ 2.7) การหาทิศสนามแม่เหล็กหรือขั้วแม่เหล็กภายในขดลวดโซเลนอยด์ เป็นไปตามกฎมือขวา โดยให้นิ้วมือทั้งสี่กำรอบขดลวดวงกลมที่เรียงซ้อนกันตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า หัวแม่มือที่ชี้ไปจะแสดงทิศสนามแม่เหล็กภายในขดลวดโซเลนอยด์ และปลายขดลวดด้านที่หัวแม่มือชี้ไปจะเป็นขั้วแม่เหล็กเหนือ (ภาพที่ 2.8)



ภาพที่ 2.7 สนามแม่เหล็กของขดลวดโซเลนอยด์[3]



ภาพที่ 2.8 กฎมือขวาพิจารณาทิศสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำโซเลนอยด์[3]

ขนาดของสนามแม่เหล็กภายในขดลวดโซเลนอยด์ ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า *(I)* ไหลผ่านขดลวดโซเลนอยด์ที่มีจำนวนรอบของขดลวดที่พันต่อหน่วยความยาว *(n)* จะมีค่าตามสมการ

$$B = \mu_0 \cdot nI = 4\pi \times 10^{-7} \cdot nI \tag{2.5}$$

2.3 อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าในสนามแม่เหล็ก

ในส่วนอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าอยู่ในสนามแม่เหล็กนั้นถ้าประจุไฟฟ้าหยุดนิ่งหรือเคลื่อนที่ขนานกับทิศทางของสนามแม่เหล็กประจุไฟฟ้าจะไม่มีแรงกระทำจากสนามแม่เหล็ก แต่ถ้าให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนในแนวทำมุมใด ๆ ที่ไม่ขนานกับทิศทางของสนามแม่เหล็กประจุไฟฟ้าจะมีแรงกระทำจากสนามแม่เหล็กทันทีและเรียกแรงนี้ว่า **แรงแม่เหล็ก หรือ แรงลอเรนซ์**

แรงจากสนามแม่เหล็กนี้ขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า สามารถสรุปความสัมพันธ์ของแรงจากสนามแม่เหล็กจากการศึกษาของ **เฮนดริก อันโตน ลอเรนซ์** ดังสมการต่อไปนี้

$$F = q(v \times B) \tag{2.6}$$

เมื่อ F = แรงจากสนามแม่เหล็ก มีหน่วยนิวตัน

q = ประจุไฟฟ้า มีหน่วยคูลอมบ์

v = ความเร็วของประจุไฟฟ้า มีหน่วยเมตรต่อวินาที

B = ความเข้มสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเทสลา

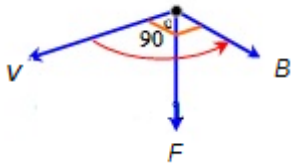
จะได้ขนาดของแรง

$$F = qvB \sin\theta \tag{2.7}$$

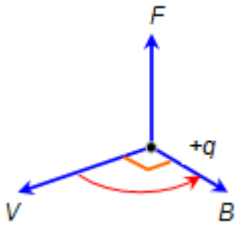
เมื่อ θ = มุมระหว่างความเร็วกับสนามแม่เหล็ก

ในการหาทิศของแรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนซึ่งเป็นอนุภาคประจุไฟฟ้าลบ เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก จะเป็นไปตามหลักการคูณของเวกเตอร์แบบครอส ซึ่งใช้มือขวาพิจารณา โดยให้นิ้วทั้งสี่ไปทางทิศความเร็ว ($\vec{v}$) แล้ววนนิ้วทั้งสี่ไปหาทิศสนามแม่เหล็ก ($\vec{B}$) นิ้วหัวแม่มือจะชี้ไปทางทิศ

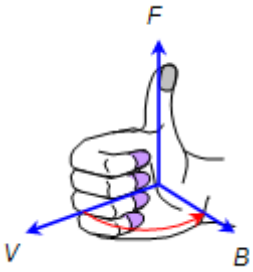
ตรงข้ามกับทิศของแรง ($\vec{F}$) ดังภาพที่ 2.9 ก สำหรับการหาทิศของแรงที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวก ยังคงใช้มือขวา นิ้วหัวแม่มือจะชี้ไปทางทิศของแรง ($\vec{F}$) ดังภาพที่ 2.9 ข



ก. อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบ



ข. อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวก



ค. กฎมือขวาหาทิศทางของแรงกระทำ

ภาพที่ 2.9 การหาทิศของแรงที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า[3]

2.4 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าในสนามแม่เหล็ก

2.4.1 อนุภาคเคลื่อนที่ในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก

เมื่ออนุภาคที่มีประจุ *(q)* เคลื่อนที่ในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก อนุภาคจะถูกกระทำด้วยแรงทางแม่เหล็กที่มีทิศตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ตลอดเวลาทำให้แนวการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุเป็นรูปวงกลมรัศมีค่าหนึ่ง ซึ่งรัศมีการเคลื่อนที่นี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณประจุ ความเร็ว และมวลของอนุภาคที่มีประจุนั้น และแรงที่ทำหน้าที่เข้าสู่ศูนย์กลางคือแรงแม่เหล็ก

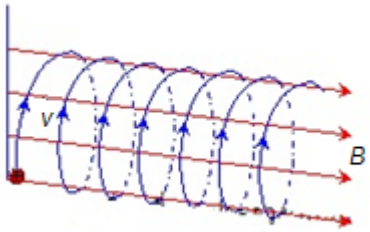
$$\sum F_c = \frac{mv^2}{r} = qvB \tag{2.8}$$

จะได้รัศมีการเคลื่อนที่ของประจุ *(q)* ,มวล *(m)* เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว *(v)* ตั้งฉากกับทิศสนามแม่เหล็ก *(B)* ตามสมการ

$$r = \frac{mv}{qB} \tag{2.9}$$

2.4.2 อนุภาคเคลื่อนที่ในทิศทำมุมใด ๆ กับสนามแม่เหล็ก

เมื่ออนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่ในทิศทำมุมใดๆกับสนามแม่เหล็กอนุภาคจะถูกกระทำด้วยแรงทางแม่เหล็กค่าหนึ่งทำให้แนวการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุเป็นรูปเกลียวคล้ายสปริง



ภาพที่ 2.10 การเคลื่อนที่ของประจุเป็นรูปเกลียว[3]

2.5 แรงกระทำต่อลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านและอยู่ในสนามแม่เหล็ก

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระด้วยความเร็ว ดังนั้นเมื่อลวดตัวนำวางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงกระทำต่ออิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้ ตามสมการ $F = qvB$ เนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระอยู่ภายในเส้นลวดตัวนำ ดังนั้นแรงที่เกิดขึ้นจึงทำให้ลวดตัวนำเคลื่อนที่ในทิศของแรงนั้น

- ถ้าประจุไฟฟ้า q เคลื่อนที่ผ่านลวดตัวนำในเวลา t จากนิยามของกระแสไฟฟ้าจะได้ว่า $q = It$
- ถ้าให้ L เป็นระยะทางที่ประจุไฟฟ้า q เคลื่อนที่ได้ในเวลา t จะได้ว่า $L = vt$

ดังนั้น จาก

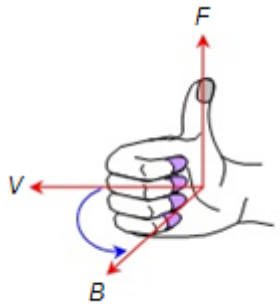
$$F = q(v \times B) = \ (It)v \times B$$

จะได้ขนาดของแรง

$$F = ILB \sin\theta \qquad (2.10)$$

เมื่อ θ = มุมระหว่างทิศของกระแสไฟฟ้ากับทิศสนามแม่เหล็ก

ในการหาทิศของแรงที่กระทำต่อลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอยู่ในสนามแม่เหล็ก จะเป็นไปตามหลักการคูณของเวกเตอร์แบบครอส โดยให้หัวแม่มือแทนทิศแรง *(F)* นิ้วทั้งสี่กำ มีทิศจากทิศของกระแสไฟฟ้า *(I)* ไปหาทิศสนามแม่เหล็ก *(B)* ดังภาพที่ 2.11

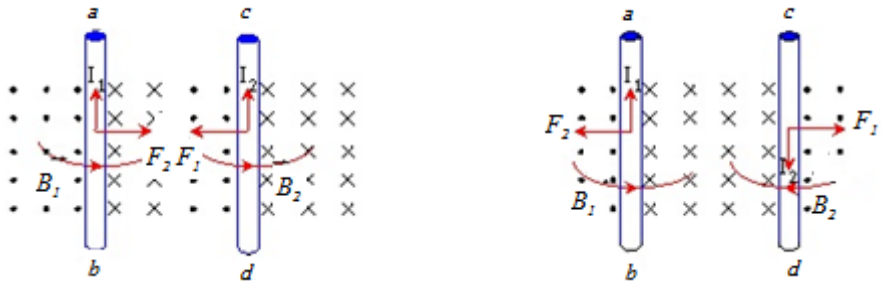


ภาพที่ 2.11 การใช้มือขวาหาทิศของแรงที่กระทำต่อลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน[3]

2.5.1 แรงระหว่างลวดตัวนำสองเส้นที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านและวางขนานกัน

พิจารณาลวดตัวนำ ab และ cd ที่วางขนานกัน เมื่อลวด ab มีกระแสไฟฟ้า I_1 ผ่าน รอบ ๆ ลวดตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็ก B_1 ขึ้น ดังนั้นลวดตัวนำ cd ที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านจะอยู่ในสนามแม่เหล็ก B_1 ด้วยเหตุนี้เมื่อกระแสไฟฟ้า I_2 ผ่านลวด cd ในทิศเดียวกับ I_1 จะทำให้เกิดแรง F_1 กระทำต่อลวดตัวนำ cd ขณะเดียวกัน ลวด ab ก็อยู่ในสนามแม่เหล็ก B_2 ที่เกิดจากลวดตัวนำ cd และจะมีแรง F_2 กระทำต่อลวดตัวนำ ab ด้วย ดังภาพที่ 2.12 ก จึงทำให้ลวดตัวนำทั้งสองดูดกัน และถ้าให้กระแสไฟฟ้า I_1 ผ่านลวด cd ในทิศตรงข้ามกับ I_1 จะทำให้เกิดแรง F_1 กระทำต่อลวดตัวนำ cd ขณะเดียวกัน ลวด ab ก็อยู่ในสนามแม่เหล็ก B_2 ที่เกิดจากลวดตัวนำ cd และจะมีแรง F_2 กระทำต่อ

ลวดตัวนำ ab ด้วย ดังภาพที่ 2.12 ข จึงทำให้ลวดตัวนำทั้งสองผลักกันโดยขนาดของแรงดูดหรือแรงผลักที่เกิดขึ้นกับเส้นลวดแต่ละเส้น



ก. กระแสไฟฟ้าไหลทิศเดียวกัน ข. กระแสไฟฟ้าไหลทิศตรงข้ามกัน

ภาพที่ 2.12 แรงระหว่างลวดตัวนำสองเส้นที่ขนานกันและมีกระแสไฟฟ้าไหล

2.6 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.6.1 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในลวดตัวนำ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น และในทางตรงข้ามถ้ามีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นก็น่าจะมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ ความคิดนี้ **ฟาราเดย์ (Michael Faraday)** ได้ทำการทดลองและสรุปผลไว้ดังนี้ คือ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก ณ บริเวณใดการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นที่ตัวนำซึ่งนำไปวางอยู่ ณ บริเวณนั้น การเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กอาจเกิดจากสาเหตุต่อไปนี้ เช่น ขยับแท่งแม่เหล็กเข้าหรือออกจากตัวนำ ขยับตัวนำเข้าหรือออกตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กปิดหรือเปิดสวิตซ์ทันทีทันใด เพิ่มหรือลดกระแสไฟฟ้าเพิ่มหรือลดความต้านทานในวงจรเป็นต้น

เมื่อนำขดลวดหมุนตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กหรือทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดกับขดลวดตัวนำ พบว่าจะมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ตัวนำ เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า **การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า** และเรียกกระแสที่เกิดขึ้นว่า **กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ** การเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้เป็นผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดกับขดลวดตัวนำ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น เมื่อหยุดเคลื่อนที่สิ่งใดสิ่งหนึ่งกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะไม่เกิดขึ้น เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดกับตัวนำ

2.6.2 การหาขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อพุ่งแท่งแม่เหล็กเข้าสู่ขดลวดหรือพุ่งขดลวดเข้าสู่แท่งแม่เหล็กหรือไม่ก็หมุนขดลวดตัดกับเส้นแรงแม่เหล็ก จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านขดลวดเกิดการเปลี่ยนแปลงจึงเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดในทิศที่ต้านต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ($\mathcal{E}$) ฟาราเดย์ได้หาความสัมพันธ์ตามสมการดัง

$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\emptyset}{\Delta t} \qquad (2.11)$$

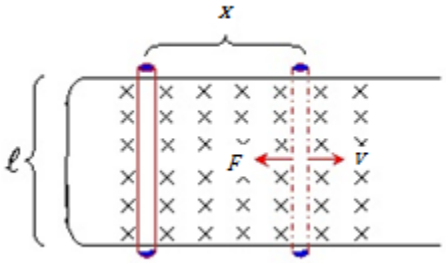
เมื่อ

$\Delta\emptyset$ = ฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง

Δt = เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก

N = จำนวนรอบของขดลวด

เครื่องหมาย $\mathcal{E}$ เป็นลบหมายถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะสร้างสนามแม่เหล็กในทิศต้านการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กในกรณีเคลื่อนตัวนำตัดฟลักซ์แม่เหล็ก

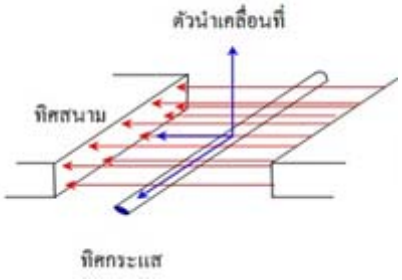


ภาพที่ 2.13 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากการเคลื่อนตัวนำตัดฟลักซ์แม่เหล็กในแนวราบ

2.6.3 การหาทิศกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

1) กฎมือขวาของเฟลมมิง

เมื่อกางนิ้วหัวแม่มือ นิ้วชี้และนิ้วกลางของมือขวาออกให้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยให้นิ้วหัวแม่มือชี้ทิศการเคลื่อนที่ของตัวนำ นิ้วชี้ชี้ทิศของสนามแม่เหล็ก และนิ้วกลางชี้ทิศการไหลของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำ ดังภาพที่ 2.14



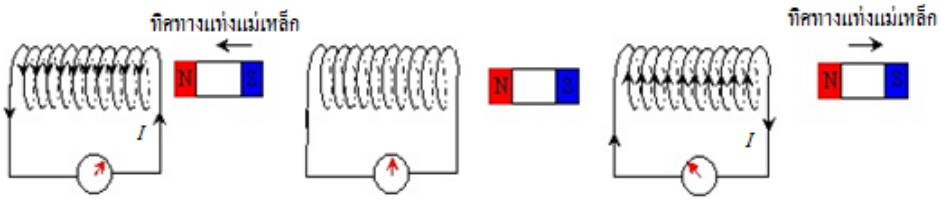
ภาพที่ 2.14 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากการเคลื่อนตัวนำตัดฟลักซ์แม่เหล็กในแนวตั้ง

2) ครอสจากทิศการเคลื่อนที่ไปหาทิศของสนามแม่เหล็ก

ทิศผลการครอสที่เกิดขึ้น คือทิศของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตัวนำ

3) กฎของเลนซ์

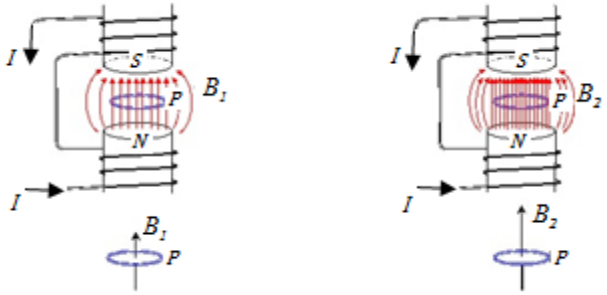
เมื่อตัวนำและเส้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเคลื่อนที่ตัดกัน กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนตัวนำนั้น ๆ ย่อมจะไหลในทิศที่ก่อให้เกิดแรงกระทำมาขัดขืนต่อการเคลื่อนที่ซึ่งก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้น เช่น พุ่งปลายแม่เหล็กขั้วเหนือ (N) เข้าสู่ขดลวดโซเลนอยด์จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กพุ่งตัดกับขดลวดโซเลนอยด์ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดโซเลนอยด์ ในทิศที่ทำให้ปลายขดลวดโซเลนอยด์ด้านที่ขั้วแม่เหล็กพุ่งเข้าหาเป็นขั้วแม่เหล็กเดียวกับขั้วแม่เหล็ก ที่พุ่งเข้าหา ทั้งนี้เพื่อต้านการเคลื่อนที่ของขั้วแม่เหล็กนั้น ดังภาพที่ 2.15 ก ในกรณีที่พุ่งปลายแม่เหล็กขั้วเหนือ (N) ออกจากขดลวดโซเลนอยด์จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กพุ่งตัดกับขดลวดโซเลนอยด์ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดโซเลนอยด์ในทิศที่ทำให้ปลายขดลวดโซเลนอยด์ด้านที่ขั้วแม่เหล็กพุ่งออกเป็นขั้วแม่เหล็กตรงข้ามกับขั้วแม่เหล็กที่พุ่งออก ทั้งนี้เพื่อต้านการเคลื่อนที่ของขั้วแม่เหล็กนั้น ดังภาพที่2.15 ค



ก. เมื่อแท่งแม่เหล็กขยับเข้า ข. เมื่อแท่งแม่เหล็กอยู่นิ่ง ค. เมื่อแท่งแม่เหล็กขยับออก

ภาพที่ 2.15 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กจากการขยับแท่งแม่เหล็ก

พิจารณาขดลวดตัวนำ P ที่อยู่ระหว่างขั้วของแม่เหล็ก ดังภาพที่ 2.16 ก ถ้าสนามแม่เหล็กในบริเวณขดลวดมีค่าสม่ำเสมอเท่ากับ B_1 เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า ทำให้สนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น B_2 ดังภาพที่ 2.16 ข



ก.สนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ ข.เมื่อเพิ่มกระแสให้สนามแม่เหล็ก

ภาพที่ 2.16 การเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดตัวนำ [3]

สนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง (ΔB) ในลักษณะเพิ่มขึ้น แสดงว่า ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดตัวนำ P ก็เปลี่ยนแปลงด้วย ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดตัวนำ P ในทิศที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก (B_i) ในทิศทางต่อต้านสนามแม่เหล็กเดิม ดังภาพที่ 2.17 ก ตามกฎของเลนซ์ ในทำนองเดียวกัน ถ้าสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง (ΔB) ในลักษณะลดลง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในขดลวดตัวนำ P ในทิศที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก (B_i) ในทิศทางเสริมกับสนามแม่เหล็กเดิม ดังภาพที่ 2.17 ข

ก. เมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ข. สนามแม่เหล็กมีค่าลดลง

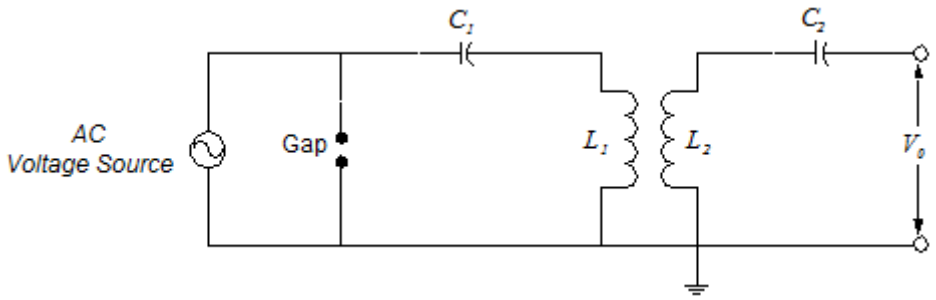
ภาพที่ 2.17 การเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง

2.7 ขดลวดเทสลา (Tesla Coil) [4][5]

เทสลา เป็นผู้พัฒนาการกระจายสัญญาณวิทยุ โดยก่อนนี้ มาโคนิ(Maconi) สามารถส สัญญาณ วิทยุ ข้ามทะเลแอตแลนติก (Atlantic) ทำให้ เทสลา มองถึงการส่งผ่านพลังงาน ณ จุดนี้เอง เป็นจุดเริ่มต้นให้ เทสลา เกิดแนวคิดว่าหากสามารถส่งผ่านสัญญาณได้แล้ว การส่งผ่านพลังงานย่อมทำได้เช่นกัน จึงทำให้เกิดการทดลองของ เทสลา ขึ้นในที่สุดเทสลา ก็ประดิษฐ์ ขดลวดเทสลาขึ้นมา ในปี ค.ศ. 1892 ซึ่งเป็นขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductive Coil)

ขดลวดเทสลา นี้จะถูกนำมาใช้ในแลป (Lab) และมีประโยชน์อย่างสูงในการนำมาประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ เช่น ใช้ในโทรทัศน์ เป็นตัวสร้างสัญญาณที่แรงดันสูง (High-Voltage) ความถี่สูง(High-Frequency) เพื่อเป็นตัวกระตุ้น (Operate) การทำงานของหลอดแคโถด (Cathode Ray) และเป็นตัวไปเริ่มต้น (Start) การติดของหลอดไฟ ที่ถูกออกแบบมาใช้งานกับ ขดลวดเทสลา

2.7.1 ทฤษฎีและส่วนประกอบของขดลวดเทสลา



ภาพที่ 2.18 วงจรของขดลวดเทสลา

- แหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ (AC Voltage Source)
- ความต้านทานที่ทำหน้าที่ในการกำจัดกระแส (R_L)
- ตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำ (C_1)
- ตัวเก็บประจุทางด้านแรงสูง (C_2)
- สปาร์กแกป (Spark Gap)
- ขดลวดทางด้านแรงต่ำ (Primary Coil) (L_1)
- ขดลวดทางด้านแรงสูง (Secondary Coil) (L_2)

2.7.2 ลักษณะของขดลวดเทสลา

ขดลวดเทสลา จะมีขดลวดแรงต่ำ (Primary Coil) กับขดลวดแรงสูง (Secondary Coil) ซึ่งมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน โดยขดลวดแรงสูง (Secondary Coil) จะถูกเหนี่ยวนำ (Induce) จาก ขดลวดแรงต่ำ (Primary Coil) ซึ่งไม่มีการต่อเชื่อมใดๆ ถึงกัน (แต่อาจจะมีการต่อเชื่อมกราวด์ถึงกันอยู่ก็ได้)

เมื่อพิจารณาที่ขดลวดจะเห็นว่า ขดลวดเทสลา มีลักษณะเหมือนกับขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Coil) ทั่วๆไป ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับสิ่งประดิษฐ์ของ ฟาราเดย์ (Faraday) แต่ในความเป็นจริงแล้วมีสิ่งที่แตกต่างกันอยู่ ดังต่อไปนี้

- ขดลวดแรงต่ำ (Primary Coil) และ ขดลวดแรงสูง(Secondary Coil) ถูกพันอยู่โดยห้อมล้อมด้วยอากาศ ไม่ใช่เหล็กอ่อนตามแบบขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Coil) แบบปกติ
- ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ที่อยู่ทางด้านแรงต่ำ (Primary) และทางด้านแรงสูง (Secondary) สามารถเกิดการเรโซแนนซ์ (Resonance) กันได้ ทำให้เกิดการเพิ่มของแรงดันระหว่างขดลวดทั้งสองในค่าที่สูงมาก
- ความถี่ของสัญญาณทางด้านแรงต่ำ (Primary) และทางด้านแรงสูง (Secondary) ของ Tesla Coil มีค่าที่ไม่เท่ากันได้

ค่าแรงดันเอาท์พุท (Output Voltage) และความถี่เอาท์พุท (Output Frequency) ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ (Parameter) หลายอย่างร่วมกัน ได้แก่ การเกิดการเรโซแนนซ์ของวงจร, ค่าตัวเก็บประจุ (Capacitance) จากตัวเก็บประจุหลัก (Main Capacitor) , ระยะของสปาร์กแก็ป (Spark Gap) , ขนาดของขดลวดแรงสูง (Secondary Coil)

2.7.3 ลักษณะการทำงานของขดลวดเทสลา

วงจรการใช้งานของ Tesla Coil สามารถอธิบายได้ดังนี้ แหล่งจ่ายพลังงานอาจเป็นได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ จะทำการจ่ายแรงดันออกมาผ่านความต้านทาน *(R)* จะได้กระแสผ่านไปยังตัวเก็บประจุ (Capacitor, C_1) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการอัดประจุจนกระทั่งได้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 (V_0) มีค่าเพียงพอที่จะทำให้เกิดการสปาร์กในช่องอากาศ (Spark Gap) เมื่อเกิดการสปาร์กขึ้น จะทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 (V_0) ถูกถ่ายเทไปยังทางด้านขดลวดแรงต่ำ (Primary Coil) (L_1) จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดด้านแรงสูง (Secondary Coil) (L_2) และจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ปลายที่ขดลวดด้านแรงสูง (Secondary Coil) (L_2) เมื่อ

พลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุ C_1ลดลงจะทำให้การสปาร์กที่อากาศลดลงตาม จากนั้นตัวเก็บประจุ C_1 จะทำการสะสมพลังงานอีกครั้งจนเพียงพอที่จะทำให้เกิดการสปาร์กในช่องอากาศ (Spark Gap)อีกครั้ง และจะเกิดขึ้นในลักษณะนี้ไปเรื่อยๆ เรียกว่าเกิดการออสซิเลชั่น (Oscillation) จากการเกิดออสซิเลชั่น จะได้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ปลายที่ขดลวดด้านแรงสูง(Secondary Coil) (L_2) และยังได้ค่าความถี่สูงอีกด้วยซึ่งเป็นสิ่งที่เราต้องการเพื่อนำไปใช้งาน

ค่าความถี่ที่เกิดจากการออสซิเลชั่น (Oscillation) ซึ่งเป็นค่าความถี่ทั่วไป(Normal frequency : F_0) หาได้จากสมการคือ

$$F_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.12}$$

ค่าความถี่ที่จ่ายออกจากขดลวดด้านแรงต่ำ (Primary Coil) (L_1) หาได้จาก

$$F_1 = F_0 \cdot \left(\frac{\left(\frac{1}{\sqrt{(1-K)}}\right) + \left(\frac{1}{\sqrt{(1-K)}}\right)}{2} \right)$$

เมื่อ $K = \frac{M^2}{L_1 C_1}$ ซึ่งถือว่ามีค่าน้อยมากๆ ดังนั้นจะได้

$$F_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \tag{2.13}$$

และจะได้ค่าความถี่ขดลวดด้านแรงสูง (Secondary coil) (L_2) หาได้จาก

$$F_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \tag{2.14}$$

หากเราสามารถปรับให้ $L_1C_1 = L_2C_2$ เราจะได้ค่าความถี่ทั้งสองด้านมีค่าเท่ากัน ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าและค่าความถี่ด้านขดลวดด้านแรงสูง (Secondary Coil) (L_2) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะเป็นสิ่งที่เราต้องการ

2.7.4 ส่วนประกอบของขดลวดเทสลา

1. ตัวปรับโวลเตจ (Variable Transformer, Variacs)

เป็นหม้อแปลงชนิดขดลวดเดียวใช้แทนที่หม้อแปลง (Standard Power Supply Transformer) แบบ 2 ขดลวดซึ่งตัวปรับแรงดัน (Variable Autotransformer หรือ Variacs) จะประกอบด้วย Torroidaliron Core โดยนำตัวปรับแรงดัน **(**Variacs) มาใช้ใน ขดลวดเทสลา คือ

- ใช้ในการจ่ายแรงดันกระแสสลับ (Ac Voltage) สำหรับหม้อแปลงนีออน (Neon Transformer)โดยการปรับตัวแรงดันที่จ่ายออกไปจากหม้อแปลงนีออน (Neon Transformer) จะไปขับทำให้สปาร์คแก็ป(Spark Gap) เกิดการเปลี่ยนแปลง
- ใช้ในการกำหนดกระแส โดยจะใช้ ตัวปรับแรงดัน **(**Variacs) ในการปรับ Inductor ซึ่งต่ออนุกรมกับทางด้านแรงต่ำของ หม้อแปลงนีออน (Neon Transformer)

2. เซฟตี้แก็ป (Safety Gap)

ในการทำงานของขดลวดเทสลา ค่าแรงดันทางด้านแรงสูง สามารถเพิ่มสูงขึ้นตามแหล่งจ่าย (Supply) จึงทำให้เกิดการสปาร์คอย่างรุนแรง ตัวเซฟตี้แก็ป (Safety Gap) จะเป็นตัวป้องกันความเสียหาย จากแหล่งจ่าย (Supply) การปรับระยะของ เซฟตี้แก็ป (Safety Gap) ให้ได้ จะเป็นการสร้างโอกาสในการสปาร์คของแกป (Gap) ซึ่งจะเกิดที่บริเวณขอบหรือริม ของจุดรวมของการเกิดการสปาร์คแก็ป (Mainspark Gap Spacing)

3. เซฟตี้โช็ค (Safety Chokes)

เป็นการออกแบบเพื่อแยกสัญญาณความถี่ของทางด้านแรงต่ำจากแหล่งจ่าย (Power Supply) ในหม้อแปลงนีออน (Neon Transformer) โดยโช๊ค (Chokes) จะเป็นตัวป้องกันความเสียหายฉนวนของหม้อแปลงนีออน ซึ่งจะช่วยให้ตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำ (Primary Capacitor) สามารถเรโซแนนซ์ (Resonance) กับ Leakage Inductance ของ Neon Secondary

4. สปาร์คแก็ป (Spark Gaps)

สามารถสร้างโดยใช้ ควีนชิ่งแก็ป (Quenching Gap) ที่หมุนด้วยความเร็วสูงและแรงดันสูง (High Voltage Speed) ระยะของ สปาร์คแก็ป (Spark Gaps) ขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อน ตัวสปาร์คแก็ปจะทำหน้าที่ กำหนดขนาดแรงดันอัดประจุที่ป้อนเข้าทางด้านแรงต่ำและทำให้เกิดการสปาร์คผ่านแก็ป เพื่อให้เกิดการถ่ายทอดพลังงานของตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำ และขดลวดเหนี่ยวนำ

ทางด้านแรงสูงเพื่อให้เกิดการออสซิเลชั่น (Oscillation) นอกจากนั้นยังทำหน้าที่ในการดับอาร์คในช่องแก็ปด้วย

5. ขดลวดเทสลาแรงต่ำ (Tesla coil Primary)

ประกอบด้วย Spiral, Solenoids หรือ Inverted Conical Coil ของขดลวด (Wire หรือ Tubing) เราสามารถออกแบบหรือสร้างตามค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ที่ต้องการ

6. กราวด์ของขดลวดเทสลาแรงสูง (Grounding of the Secondary)

ขดลวดแรงสูง (Secondary Coil) ของขดลวดเทสลาจะมีกระแสที่กราวด์ (Ground) ในส่วนฐานมีค่าสูงกว่าในส่วนบนของขดลวดแรงสูง ส่วนฐานจะมีค่าของกระแสสูงแรงดันต่ำในทางตรงกันข้ามส่วนบนค่าของกระแสจะต่ำแรงดันสูง ดังนั้นเราควรมีจุดกราวด์ (Ground Point) ที่ดีซึ่งมีความต้านทานต่ำเพื่อให้กระแสในส่วนฐานของขดลวดแรงสูงสามารถไหลผ่านได้ ถ้าหากกราวด์ไม่ดีจะทำให้ได้แรงดันเอาท์พุท (Output Voltage) ที่ได้ต่ำลง เนื่องมาจากการ Discharge ที่ Terminal นอกจากนี้กราวด์ ยังมีค่าเหนี่ยวนำ (Inductance) เล็กน้อยซึ่งนำไปสู่การ Short heavy Flat จากลวดทองแดงสู่กราวด์อีกด้วย

7. การคายประจุที่จุดปลาย (Discharge Terminals (Toroids / Spheres))

- ทำหน้าที่เก็บประจุ (Toroids) ซึ่งมีผลต่อการเรโซแนนซ์ ของทางด้านขดลวด ทางด้านแรงสูงของ ขดลวดเทสลาโดยถ้ามีขั้วขนาดโตที่จุดปลาย (Terminal) ก็จะได้ค่าตัวเก็บประจุ (Capacitance) ที่สูงตามไปด้วย ขณะที่ขดลวดเหนี่ยวนำทำงานจะทำให้เกิดการไอออไนซ์ของอากาศรอบๆ เทอรอยด์ (Toroid) และจะทำให้ค่าประจุ (Capacitance) สูงขึ้น และวัตถุที่อยู่ใกล้เคียงบริเวณนั้นก็จะมีค่าประจุ (Capacitance) เพิ่มขึ้นด้วย

- จะทำให้ความเรียบ (Smooth) ของสนามไฟฟ้ารอบๆส่วนบนของขดลวดด้านแรงสูง จุดประสงค์นี้พยายามที่จะลดความลาดชันของแรงดัน (*dv/dt*) ที่เกิดขึ้นที่ส่วนบนของขดลวดเหนี่ยวนำ ให้มีค่าน้อยที่สุด นั้นคือระดับของแรงดันจะมีค่าสูงขึ้นกว่าแต่ก่อน การที่แรงดันมีค่าสูงขึ้นทำให้ผลของการสปาร์คมีระยะที่ยาวขึ้นด้วย

- สร้างสนามไฟฟ้าบนขดลวดแรงสูง ซึ่งช่วยระงับการเกิดการเบรคดาวน์(Break Down) บนส่วนบนของขดลวดได้ อีกทั้งยังช่วยหน่วงเวลาในการรวมตัวเพื่อเกิดการคายประจุ (Discharge) ทำให้ได้แรงดันที่ได้มีค่าสูงขึ้น

รูปแบบของการเกิดการคายประจุ (Discharge) ที่จุดปลาย (Terminal) โดยปกติจะเกิดขึ้นที่สเฟียร์ (Sphere หรือ Toroid) ในทางอุดมคติกล่าวคือ ปราศจาคการเกิดการเบรคดาวน์ (Break Down) ของอากาศจะทำให้เกิดแรงดันที่สูงที่สุดได้ โดย เทอรอยด์ (Toroid) จะสร้างสนามไฟฟ้าเป็นตัวช่วยป้องกันการเกิดเบรคดาวน์ (Break Down) เป็นการเป็นการป้องกันขดลวดด้านแรงสูงด้วยเหตุผลนี้เอง ทำให้ขดลวดเทสลา จำเป็นจะต้องมี เทอรอยด์ (Toroid) ที่จุดปลาย (Terminal)

ในทางอุดมคติสเฟียร์ (Sphere หรือ Toriod) จะต้องมีผิวที่เรียบแต่มันเป็นเรื่องยากในทางปฏิบัติ เราควรให้ความสำคัญกับขนาดซึ่งขึ้นอยู่กับความโหนกของผิวการยุบตัวต่างๆวัสดุพื้นฐานที่ใช้ทำเทอรอยด์ (Toriod) ควรเป็นตัวนำที่มีความยืดหยุ่นแห้งและระบายอากาศได้โดยปกตินิยมเลือกตัวนำที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว หรือ 6 นิ้ว ซึ่งทำให้ได้ค่าความถี่ที่นิยมใช้

2.7.5 ข้อพึงระวังเกี่ยวกับขดลวดเทสลา

เนื่องจาก ขดลวดเทสลา กำเนิดค่าแรงดัน (Voltage) และค่าความถี่ (Frequency) ที่สูงมากออกมา ขณะทำการทดลองเราไม่ควรจะเข้าไปอยู่ใกล้บริเวณที่มีความถี่สูงๆ ถึงแม้ว่าเราจะไม่ได้สัมผัสกับอุปกรณ์หรือมีการ สปาร์ค (Spark) เข้าสู่ร่างกายของเรา แต่ก็สามารถทำให้เกิดอันตรายได้เช่นกัน ดังจะเห็นได้จากตัวอย่างดังต่อไปนี้ บุคคลผู้หนึ่งเขาพบว่าเขามีสุขภาพที่แย่ลงโดยอัตราการเต้นของหัวใจของเขามีค่าน้อยลง เมื่อเขาได้รับแรงดัน 250,000 volt จากขดลวดเทสลา

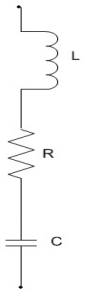
อีกทั้งในส่วนของสปาร์คแก็ป(Spark Gap) จะกำเนิดแสงอุลตร้าไวโอเลต (Ultra Violate) ซึ่งสามารถที่จะทำลายดวงตาดังนั้นควรหลีกเลี่ยงที่จะมองแสงจาก ของสปาร์คแก็ป (Spark Gap) นอกจากนี้การ ของสปาร์ค (Spark) ยังทำให้เกิด Toxic Ozone ขึ้นมา สถานที่ทำการทดลองควรจะเป็นห้องเปิด มีอากาศถ่ายเทที่สะดวกด้วย

2.8 เรโซแนนซ์ [6][7]

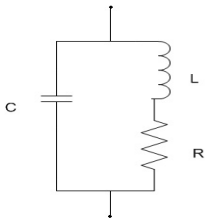
เรโซแนนซ์ คือการเกิดปรากฏการณ์ของสัญญาณไฟสลับความถี่หนึ่งผ่านวงจรไฟฟ้าได้ดีที่สุด หรือน้อยที่สุด (วงจรอนุกรมสัญญาณจะผ่านได้สูงสุดวงจรขนานจะผ่านได้ต่ำสุด) ปรากฏการณ์นี้สำคัญมากในทางสื่อสาร ในวงจรสวิตซ์สายส่ง ระบบควบคุม เป็นต้น

วงจรเรโซแนนซ์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ดังภาพที่ 2.19
- วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน ดังภาพที่ 2.20



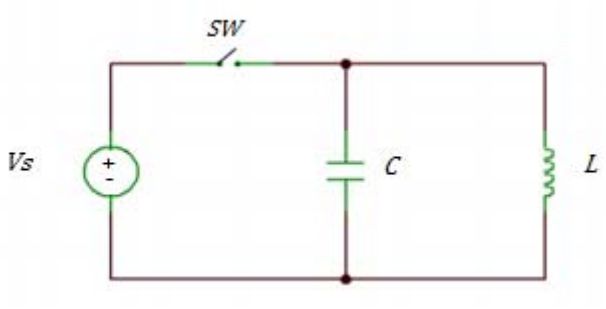
ภาพที่ 2.19 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม



ภาพที่ 2.20 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

2.8.1 ผลของวงจรเรโซแนนซ์ต่อวงจรกระแสตรง

เมื่อจ่ายแรงดันกระแสตรงให้แก่วงจรเรโซแนนซ์ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อระดับแรงดัน ที่ตกคร่อมในวงจรกลายเป็นกระแสสลับตกคร่อมในวงจร โดยค่าความถี่ที่เกิดขึ้นจากการที่สร้างวงจรกระแสสลับของวงจรเรโซแนนซ์ มีลักษณะของวงจรดังแสดงในภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 การสร้างสัญญาณกระแสสลับของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

จากภาพที่ 2.21 ช่วงเวลาที่ 1 เมื่อเปิดสวิตช์ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) จะทำการเก็บประจุเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสูงขึ้นจนเท่ากับแหล่งจ่าย

ช่วงเวลาที่ 2 เมื่อปิดสวิตช์ตัวเก็บประจุ (Capacitor) จะคลายประจุให้ขดลวด เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบขดลวดซึ่งทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (Capacitor) ลดต่ำลง

ช่วงเวลาที่ 3 เมื่อตัวเก็บประจุ (Capacitor) คายประจุให้ขดลวดหมดแล้ว เส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายตัวรอบๆ ขดลวดจะยุบตัวลงตัดกับขดลวด เกิดกระแสเหนี่ยวตนเองจ่ายจากขดลวดไปอัดประจุเข้าตัวเก็บประจุ(Capacitor) ทางแผ่นเพลทด้านล่าง ซึ่งทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (Capacitor) ในทิศทางตรงกันข้ามกับช่วงเวลาที่ 1 คือ แผ่นเพทด้านบนมีค่าแรงดันเป็นลบ และด้านล่างมีแรงดันเป็นบวก

ช่วงเวลาที่ 4 เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กยุบตัวหมดแล้ว จะไม่มีกระแสไหลจากขดลวดไปอัดประจุตัวเก็บประจุ (Capacitor) จะทำให้ตัวเก็บประจุทำการคายประจุนั่นกลับไปขดลวดอีก โดยส่งจากแผ่นเพทด้านล่างไปให้ปลายขดลวดดังกล่าวผ่านขึ้นไปด้านบน จึงเกิดเส้นแรงแม่เหล็กพองตัวรอบๆขดลวดขึ้นอีกแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจึงลดต่ำลงเรื่อยๆจนเป็น 0 เมื่อตัวเก็บประจุคายประจุหมดแล้ว จากช่วงเวลาที่ 1 – 4 จะเป็นแรงดันกระแสสลับครบ 1 รอบตกคร่อมวงจรเรโซแนนซ์

ช่วงเวลาที่ 5 เมื่อตัวเก็บประจุ (Capacitor) คายประจุหมดแล้ว เส้นแรงแม่เหล็กที่ขดลวดจะยุบตัว เกิดกระแสเหนี่ยวนำตัวเองจ่ายเข้าไปอัดตัวเก็บประจุ (Capacitor) ทางแผ่นเพทด้านบน ซึ่งทำให้แผ่นเพทด้านบนมีแรงดันเป็นบวก และแผ่นเพทด้านล่างมีแรงดันเป็นลบ เกิดเป็นส่วนกระแสสลับในช่วงต่อไป

ค่าความถี่เรโซแนนซ์หาได้จาก

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.15}$$

2.8.2 แรงดันกระแสสลับกับวงจรเรโซแนนซ์

วงจรเรโซแนนซ์ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor) และขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งมีผลต่อกระแสไฟฟ้าสลับตรงกันข้ามกัน กล่าวคือ ตัวเก็บประจุจะมีค่าความต้านทานต่อไฟกระแสสลับ ในส่วนแปรผกผันต่อความถี่ คือค่าความถี่สูงจะผ่านตัวเก็บประจุได้ดี ค่าความต้านทานต่อกระแสสลับของตัวเก็บประจุ (Capacitor)

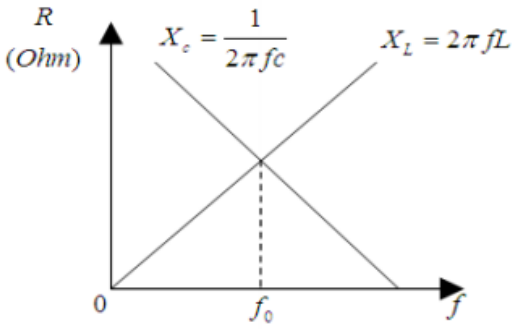
(X_c) หาได้จาก

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \tag{2.16}$$

สำหรับขดลวดเหนี่ยวนำจะมีคุณสมบัติต้านไฟกระแสสลับในทางตรงกันข้ามกับตัวเก็บประจุ (Capacitor) คือมีสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนผ่านซึ่งเป็นดังสมการ

$$X_L = 2\pi fL \tag{2.17}$$

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับวงจรเรโซแนนซ์ ผลที่ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของวงจรเรโซแนนซ์นั่นเป็นแบบอนุกรมหรือขนาน แต่ผลที่ได้เหมือนกันคือ ถ้าค่าความถี่สูงค่า X_L จะมากและค่า X_C จะต่ำ ซึ่งจะเห็นว่าค่า X_L และ X_C จะมีค่าทิศทางสวนกัน ดังนั่นหากมีค่าความถี่ที่ทำให้ X_L และ X_C มีค่าเท่ากันจะทำให้ค่ารีแอคแตนซ์หักร้างกันหมด จึงเหลือเฉพาะค่าความต้านทาน (R) ซึ่งค่าความถี่ที่จะทำให้เกิดผลดังกล่าวนั่น เราเรียกว่า ความถี่เรโซแนนซ์



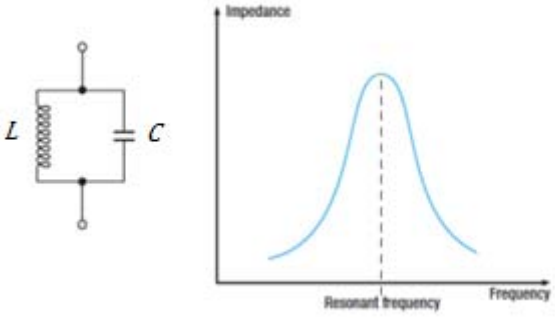
ภาพที่ 2.22 ผลของ L และ C ที่ทีต่อกระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ

2.8.3 ผลของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานที่มีต่อสัญญาณกระแสสลับ

เมื่อสัญญาณกระแสสลับที่ป้อนเข้ามามีค่าความถี่ต่ำกว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร ค่า X_L จะน้อยกว่า X_C เปรียบเหมือน C เปิดวงจร ค่าแรงดันที่ตกคร่อม L ขณะนั่นจะน้อย เนื่องจาก X_L ต่ำ เมื่อความถี่ต่ำวงจรจึงแสดงคุณสมบัติของขดลวด ทำให้เฟสของแรงดันที่ตกคร่อมวงจรเร็วกว่าเฟสของกระแสที่ไหลผ่านในวงจร

เมื่อความถี่ของสัญญาณกระแสสลับที่ป้อนเข้ามาสูงกว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรค่าของ X_C จะน้อยกว่า X_L โดย L ขณะนั่นเหมือนเปิดวงจรแรงดันที่ตกคร่อมค่า C ขณะนั่นจะมีค่าต่ำที่ค่าความถี่สูงจะทำให้ค่าความต้านทานของ C ลดลง ทำให้เฟสของกระแสที่ไหลในวงจรเร็วกว่าเฟสของแรงดันที่ตกคร่อมในวงจร

ถ้าค่าความถี่ที่ป้อนเข้ามา มีค่าเท่ากับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรค่าของ X_L และ X_C จะมีค่าเท่ากันและหักล้างกันหมด จะเหลือเพียงค่าความต้านทานที่สูงทำให้กระแสที่ไหลผ่านวงจรได้น้อยทำให้แรงดันตกคร่อมวงจรมีค่าสูงเฟสของกระแสที่ไหลในวงจรและแรงดันที่ตกคร่อมในวงจรจะมีเฟสทีตรงกันคุณสมบัติของวงจรคือจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงที่ความถี่เรโซแนนซ์ ทำให้กระแสไหลได้ต่ำแต่แรงดันที่ได้สูง



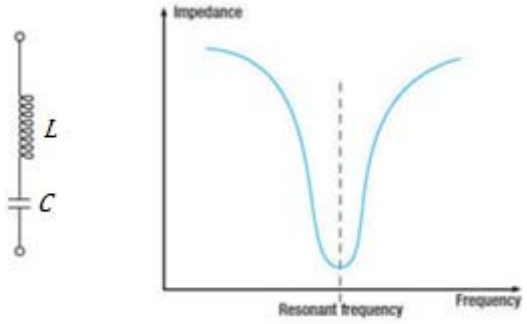
ภาพที่ 2.23 ผลของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานที่มีต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ

2.8.4 ผลของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมที่มีต่อสัญญาณกระแสสลับ

เมื่อสัญญาณอินพุทมีค่าความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ค่า X_L จะมีค่าต่ำแต่ค่า X_C จะมีค่าสูงกระแสจะไหลผ่านวงจรได้น้อย และได้แรงดันตกคร่อมวงได้สูง วงจรแสดงค่า X_C ทำให้กระแสที่ไหลในวงจรมีเฟสเร็วกว่าแรงดันที่ตกคร่อมในวงจร

เมื่อสัญญาณอินพุทมีค่าความถี่สูงกว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์ ค่า X_C จะมีค่าต่ำ แต่ค่า X_L มีค่าสูงกระแสจะไหลผ่านวงจรได้น้อย และได้แรงดันตกคร่อมวงจรสูง วงจรแสดงค่า X_L ทำให้กระแสที่ไหลในวงจรมีเฟสช้ากว่าแรงดันที่ตกคร่อมในวงจร

ถ้าค่าความถี่ที่ป้อนเข้ามา มีค่าเท่ากับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรค่าของ X_L และ X_C จะมีค่าเท่ากันและหักล้างกันหมดจะเหลือเพียงค่าความต้านทานที่สูงทำให้กระแสที่ไหลผ่านวงจรได้น้อย ทำให้แรงดันตกคร่อมวงจรมีค่าสูง เฟสของกระแสที่ไหลในวงจรและแรงดันที่ตกคร่อมในวงจรจะมีเฟสที่ตรงกันคุณสมบัติของวงจรคือ จะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่ความถี่เรโซแนนท์ทำให้กระแสไหลได้สูง แต่แรงดันที่ได้ต่ำ



ภาพที่ 2.24 ผลของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมที่มีผลต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ