

## บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง

จากบทที่ 2 เป็นการศึกษาทฤษฎีทั่วไปของหม้อแปลงเตสลา บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆ ของหม้อแปลงเตสลา

### 3.1 เจือไนในการออกแบบและค่าที่กำหนดของการสร้างหม้อแปลงเตสลา

การออกแบบสร้างหม้อแปลงเตสลาของงานวิจัยนี้ วัตถุประสงค์เพื่อนำเอาวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้กับหม้อแปลงเตสลา เพื่อทดสอบประจําลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน และเป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาต่อ งานวิจัยนี้ใช้ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน แบบ ก (แบบ 52-1) และลูกถ้วยก้านตรงแบบ ก (แบบ 55-5) เนื่องจากเป็นลูกถ้วยที่มีขนาดเล็ก และแรงดันที่ใช้ในการวางไฟไม่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับลูกถ้วยแบบอื่นๆ ซึ่งค่าที่กำหนดมีดังนี้

#### 3.1.1 ค่าแรงดันที่กำหนด

งานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบที่ 100 kV ขึ้นไป

#### 3.1.2 ค่าความถี่ที่กำหนด

มาตรฐาน ANSI C 29.1-1988 [11] กำหนดความถี่ของหม้อแปลงเตสลาสำหรับการทดสอบประจําของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน มีค่าประมาณ 200 kHz การเลือกความถี่ของหม้อแปลงเตสลาที่ออกแบบสร้างจึงเลือกให้สามารถสร้างความถี่อยู่ที่ 142 kHz เนื่องจากข้อจำกัดความเร็วของอุปกรณ์ในการสวิตช์ และออกแบบสร้างเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

### 3.2 ค่าความจุไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ

ค่าความจุไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ หมายถึง ค่าความจุไฟฟ้าด้านแรงสูงของหม้อแปลงเตสลา ซึ่งความถี่และขนาดแรงดันที่เกิดขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้า และค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด และในการออกแบบสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นสิ่งแรก คือ ขนาดของตัวเก็บประจุทางด้านแรงสูง  $C_2$  ซึ่งความจุไฟฟ้าด้านแรงสูง  $C_2$  จะประกอบไปด้วย ความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบซึ่งเป็นลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน ประมาณ 10-50 pF ขดลวดแรงสูงประมาณ 5-10 pF/m ของสายแรงสูงและแกปทรงกลม (Sphere gap) วัสดุแรงดันสูง ประมาณ 5-10 pF โดยที่ความจุไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิจะเป็นตัวกำหนดค่า

ความเหนี่ยวนำทางด้านแรงสูงเพื่อให้ได้ความถี่ที่กำหนด จึงเลือกใช้ผลรวมความจุไฟฟ้าประมาณ 45 pF

### 3.2.1 การออกแบบขดลวดแรงสูง ( $L_2$ )

จากค่าความถี่ที่เลือกในการออกแบบ และค่าความจุไฟฟ้ารวมทางด้าน  $C_2$  จะสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแรงสูง  $L_2$  ได้จากสมการที่ (3.1)

$$f_1 = f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (3.1)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} L_2 &= \frac{1}{4\pi^2 f_2^2 C_2} \\ &= \frac{1}{4\pi^2 (140 \times 10^3)^2 \times (45 \times 10^{-12})} \\ &= 28.71 \text{ mH} \end{aligned} \quad (3.2)$$

### 3.2.2 หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดแรงสูง

ขนาดของเส้นลวดที่จะนำมาพันขดลวดแรงสูง กำหนดด้วยความหนาแน่นของกระแส โดยคำนวณจากกระแสลัดวงจรของหม้อแปลงแรงดันสูงและความถี่สูง เมื่อใช้ทดสอบการเกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วย ซึ่งเปรียบเสมือนการลัดวงจรทางด้านแรงสูง ดังนั้นกระแสไหลในขดลวดแรงสูงจะถูกจำกัดด้วยอิมพีแดนซ์ สามารถคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรได้ดังนี้

$$I_{sc} = \frac{V_{rms}}{Z} = \frac{V_{rms}}{2\pi f_2 L_2} \quad (3.3)$$

แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} I_{sc} &= \frac{130 \times 10^3}{2\pi \times (142 \times 10^3) \times (28.71 \times 10^{-3})} \\ &= 5.07 \text{ A} \end{aligned} \quad (3.4)$$

กระแสประสิทธิผลที่ไหลผ่านขดลวดแรงสูงจึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 I_{eff} &= \sqrt{I_{sc} x \frac{\text{ช่วงเวลาที่มิกระแส 1 คาบ}}{\text{ช่วงเวลา 1 คาบ}}} \\
 &= 5.07 x \sqrt{\frac{3.52 x 10^{-6}}{10 x 10^{-3}}} \\
 &= 95.19 \text{ mA}
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

จากความหนาแน่นของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดซึ่งขึ้นอยู่กับค่าประสิทธิภาพ และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และยอมรับได้ โดยทั่วไปทองแดงมีค่าเท่ากับ  $2.5 \text{ A/mm}^2$  พื้นที่หน้าตัดขดลวดทองแดงจะหาได้จาก

$$A_{eff} = \frac{I_{eff}}{J} \tag{3.6}$$

เมื่อ  $J$  = ความหนาแน่นของกระแส  $\text{A/mm}^2$   
 $I_{eff}$  = กระแสประสิทธิผล  $\text{A}$   
 $A_{eff}$  = พื้นที่หน้าตัด  $\text{mm}^2$

แทนค่า

$$\begin{aligned}
 A_{eff} &= \frac{95.19 \text{ mA}}{2.5 \text{ A/mm}^2} \\
 &= 0.03 \text{ mm}^2 \\
 &= 0.36 x 10^{-3} \text{ cm}^2
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

เมื่อคิดผลของสภาพนำเชิงผิว (Skin effect) ที่มีความลึกของสภาพนำเชิงผิว ซึ่งสามารถคำนวณความลึกของสภาพนำเชิงผิวได้จาก

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \tag{3.8}$$

เมื่อ  $\delta$  = ค่าความลึกของสภาพนำเชิงผิว  
 $\sigma$  = สภาพนำไฟฟ้าของตัวนำ  $\Omega/\text{cm}$

$f$  = ความถี่ Hz

$\mu$  = ค่าความซึมซาบของตัวนำ

ในกรณีของทองแดง  $\sigma = 5.8 \times 10^9 \text{ } \Omega / \text{cm}$

ดังนั้นจะได้

$$\delta_{cu} = \frac{6.62}{\sqrt{f}} \text{ cm} \quad (3.9)$$

และความถี่ที่ต้องการ คือ 142 kHz จะได้

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{6.62}{\sqrt{142 \times 10^3}} \\ &= 0.01 \text{ cm} \end{aligned} \quad (3.10)$$

ถ้าใช้ลวดกลมในการพันขดลวดแรงสูง กระแสไหลผ่านเฉพาะที่ผิวรัศมี  $r_1$  ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งสามารถคำนวณหารัศมี  $r_1$  ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} (\pi r_1^2 - \pi r_2^2) &= A_{eff} \quad (3.11) \\ (\pi r_1^2 - \pi (r_1 - \delta)^2) &= 0.36 \times 10^{-3} \\ r_1 &= \frac{0.36 \times 10^{-3}}{2\pi \times 0.01} + \frac{0.01}{2} \\ &= 0.01 \text{ cm} \end{aligned}$$

ค่า  $r_1$  ที่คำนวณได้และคิดค่าความปลอดภัยอีก 50%

ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} r_1 &= (0.01 \times 0.5) + 0.01 \\ &= 0.01 \text{ cm} \end{aligned} \quad (3.12)$$

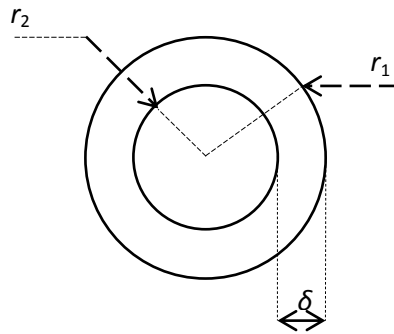
จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด

$$d_1 = 2r_1 \quad (3.13)$$

$$= 2 \times 0.01$$

$$= 0.03 \text{ cm}$$

นำค่าที่ได้จากการคำนวณไปเปิดหาขนาดเส้นลวดในภาคผนวก ก จะได้เส้นลวดทองแดงเบอร์ 28 SWG ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียง คือ 0.03 cm คุณสมบัติมีความต้านทาน 17.29  $\Omega$ /100 m ที่อุณหภูมิ 25°C



รูปที่ 3.1 บริเวณที่มีกระแสไหลเนื่องจากผลสภาพนำเชิงผิวของขดลวดทองแดง

เนื่องจากเลือกใช้ท่ออะคริลิก ขนาด 6 นิ้ว สำหรับพันขดลวดทางด้านแรงสูงจึงสามารถหาความสูงของการพันขดลวดได้จากอัตราส่วน 1/4 ซึ่งหมายความว่า ถ้าใช้ท่ออะคริลิกขนาด 1 นิ้ว จะพันขดลวดสูง 4 นิ้ว ดังนั้น กรณีเลือกใช้ท่ออะคริลิกขนาด 6 นิ้ว จะต้องพันขดลวดสูง 24 นิ้ว

จากลวดเบอร์ 28 SWG ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.03 cm หรือเท่ากับ 0.01 นิ้ว จะต้องพันสูง 24 นิ้ว

ดังนั้น จะได้จำนวนรอบ (N) ทั้งหมด

$$= \frac{24}{0.01}$$

$$= 1621.62 \text{ รอบ} \quad (3.14)$$

ในงานวิจัยนี้จะพัน 1630 รอบ และเมื่อทำการวัดค่าความเหนี่ยวนำจะได้ ค่าความเหนี่ยวนำทางด้านแรงสูง  $L_2$  เท่ากับ 28.25 mH ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่คำนวณเล็กน้อย

### 3.3 การออกแบบสร้างขดลวดแรงต่ำ ( $L_1$ )

การสร้างขดลวดแรงต่ำจะนำเอาท่อทองแดง ขนาด 1/4 นิ้ว เบอร์ 22 ซึ่งมีความหนาของส่วนที่เป็นท่อทองแดง เท่ากับ 0.02 นิ้ว นำมาพันเป็นแบบแนวตั้ง โดยมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของท่อแต่ละรอบ 1/2 นิ้ว ระยะห่างระหว่างขดแรกของขดลวดแรงต่ำกับขดลวดแรงสูง เท่ากับ 1.75 นิ้ว

ในการเลือกขนาดของท่อทองแดงจะคำนึงถึงความหนาที่เหมาะสมหรือไม่ โดยใช้สมการที่ (3.15) โดยจะคิดค่าความหนา ( $\delta_{cu}$ ) เป็นนิ้ว จะได้

$$\delta_{cu} = \frac{2.602}{\sqrt{f}} \quad (3.15)$$

แทนที่ความถี่ที่ 142 kHz ลงในสมการที่ (3.15) ดังนั้น จะได้

$$\begin{aligned} \delta_{cu} &= \frac{2.602}{\sqrt{142 \times 10^3}} \\ &= 0.006 \text{ นิ้ว} \end{aligned} \quad (3.16)$$

ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับความหนาของท่อของทองแดงที่ใช้พันมีความหนา 0.02 นิ้ว จะเห็นว่าค่าที่คำนวณได้มีขนาดที่น้อยกว่า นั่นแสดงว่าท่อทองแดงสามารถนำมาพันได้ และสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำทางด้านปฐมภูมิ  $L_1$  ของหม้อแปลงทดสอบได้จากสมการที่ (3.17)

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.17)$$

นั่นก็หมายความว่า ความถี่ด้านแรงต่ำจะต้องเท่ากับความถี่ด้านแรงสูง จะได้

$$f_1 = f_2 \quad (3.18)$$

เมื่อ  $f_1 =$  ความถี่ด้านแรงต่ำ  
 $f_2 =$  ความถี่ด้านแรงสูง

จากสมการที่ (3.19)

$$f_1 = f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (3.19)$$

เพราะฉะนั้น

$$L_1C_1 = L_2C_2 \quad (3.20)$$

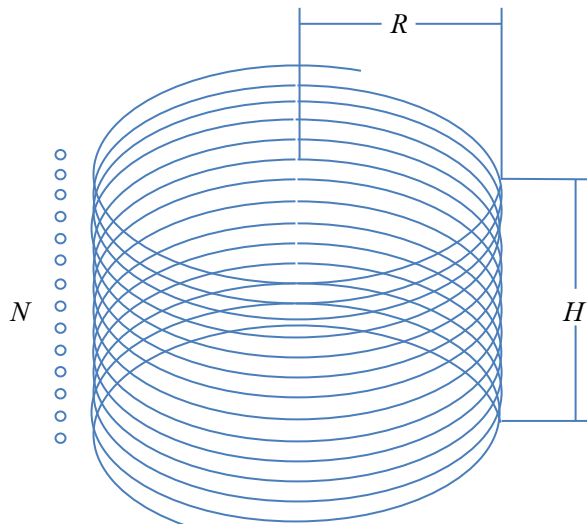
จะได้สมการหาค่าความเหนี่ยวนำ  $L_1$

$$L_1 = \frac{L_2C_2}{C_1} \quad (3.21)$$

แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{26.77 \times 10^{-3} \times 45 \times 10^{-12}}{43.70 \times 10^{-9}} \\ &= 27.56 \mu\text{H} \end{aligned} \quad (3.22)$$

ออกแบบสร้างขดลวดแรงต่ำแบบแนวตั้ง (Helical coil)



รูปที่ 3.2 ลักษณะของ Helical coil

การคำนวณหาความเหนี่ยวนำทั้งหมดด้านปฐมภูมิ  $L_1$  แบบแนวตั้ง (Helical coil) หาได้จากสมการที่ (3.23)

$$L = \frac{(NR)^2}{9R + 10H} \quad (3.23)$$

เมื่อ  $L$  = ค่าความเหนี่ยวนำ  $\mu\text{H}$   
 $H$  = ความสูงของขดลวด  
 $R$  = ค่าเฉลี่ยของรัศมีขดลวด  
 $N$  = จำนวนรอบ

จำนวนรอบที่พันทั้งหมด      14      รอบ  
 ความสูงของขดลวดทั้งหมด      6.12      นิ้ว  
 รัศมีของขดลวด      6.30      นิ้ว

แทนค่าลงในสมการ

$$\begin{aligned} L &= \frac{(14 \times 6.3)^2}{(9 \times 6.3) + (10 \times 6.12)} \\ &= 65.95 \mu\text{H} \end{aligned} \quad (3.24)$$

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบ ( $N$ ) และค่าความเหนี่ยวนำ  $L_1$  ของขดลวดแรงต่ำแบบแนวตั้งที่ได้จากการคำนวณ

จำนวนรอบ ( $N$ )	1	2	3	4	5	6	7
ค่าความเหนี่ยวนำ $L_1$ ( $\mu\text{H}$ )	0.64	2.42	5.11	8.55	12.62	17.22	22.27
จำนวนรอบ ( $N$ )	8	9	10	11	12	13	14
ค่าความเหนี่ยวนำ $L_1$ ( $\mu\text{H}$ )	27.70	33.46	39.51	46.81	52.33	59.05	65.95

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบ ( $N$ ) และค่าความเหนี่ยวนำ  $L_1$  ของขดลวดแรงต่ำ แบบแนวตั้งที่ได้จากการวัด

จำนวนรอบ ( $N$ )	1	2	3	4	5	6	7
ค่าความเหนี่ยวนำ $L_1$ ( $\mu\text{H}$ )	1.13	2.96	5.66	9.03	13.04	17.57	22.54
จำนวนรอบ ( $N$ )	8	9	10	11	12	13	14
ค่าความเหนี่ยวนำ $L_1$ ( $\mu\text{H}$ )	27.91	33.66	39.69	46.05	52.68	59.61	66.78

### 3.4 การออกแบบตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำ ( $C_1$ )

การออกแบบตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำสามารถหาได้จากสมการที่ (3.29)

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.25)$$

นั่นหมายความว่า ความถี่ด้านแรงต่ำจะต้องเท่ากับความถี่ด้านแรงสูง จะได้

$$f_1 = f_2 \quad (3.26)$$

เมื่อ  $f_1 =$  ความถี่ด้านแรงต่ำ  
 $f_2 =$  ความถี่ด้านแรงสูง

ดังนั้น

$$f_1 = f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (3.27)$$

จะได้

$$L_1 C_1 = L_2 C_2 \quad (3.28)$$

ค่าตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำจะได้

$$C_1 = \frac{L_2 C_2}{L_1} \quad (3.29)$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{26.77 \times 10^{-3} \times 45 \times 10^{-12}}{27.91 \times 10^{-6}} \\ &= 43.15 \text{ nF} \end{aligned} \quad (3.30)$$

ตัวเก็บประจุที่ใช้เป็นชนิดโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) นำมาต่อขนานและอนุกรมกัน ซึ่งตัวเก็บประจุย่อยแต่ละตัวมีค่าความจุ 0.1  $\mu\text{F}$  2 kV

การออกแบบตัวเก็บประจุต้องออกแบบให้ได้ค่าความจุที่เหมาะสม และสามารถทนแรงดันได้ การคำนวณเพื่อหารูปแบบการต่อตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันต่ำ เพื่อให้ได้ค่าความจุที่กำหนดสามารถหาได้ ดังนี้

นำตัวเก็บประจุย่อย 6 ตัว มาต่อขนานกันจะได้ค่าความจุรวม คือ

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 \quad (3.31)$$

$$C_p = 0.1 \mu\text{F} + 0.1 \mu\text{F} + 0.1 \mu\text{F} + 0.1 \mu\text{F} + 0.1 \mu\text{F} + 0.1 \mu\text{F}$$

$$C_p = 600 \text{ nF}$$

จากนั้นนำ  $C_p$  6 ชุดมาต่ออนุกรมกัน จะได้

$$\frac{1}{C_{pri}} = \frac{1}{C_{p1}} + \frac{1}{C_{p2}} + \frac{1}{C_{p3}} + \frac{1}{C_{p4}} + \frac{1}{C_{p5}} + \frac{1}{C_{p6}} \quad (3.32)$$

$$\frac{1}{C_{pri}} = \frac{1}{600\text{nF}} + \frac{1}{600\text{nF}} + \frac{1}{600\text{nF}} + \frac{1}{600\text{nF}} + \frac{1}{600\text{nF}} + \frac{1}{600\text{nF}}$$

$$C_{pri} = 100\text{nF}$$

จากนั้นนำ  $C_{pri}$  2 ชุด มาต่ออนุกรมกันจะได้

$$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_{pri1}} + \frac{1}{C_{pri2}} \tag{3.33}$$

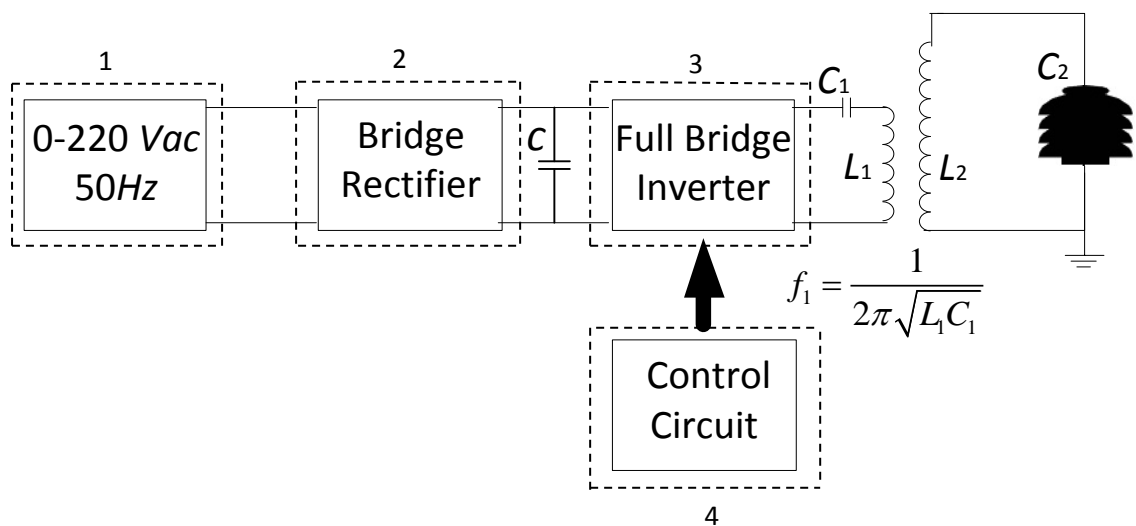
$$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{100\text{nF}} + \frac{1}{100\text{nF}}$$

$$C_1 = 50\text{nF} \text{ และทนแรงดัน } 12\text{ kV}$$

จากค่าที่คำนวณจะได้ค่า  $C_1$  เท่ากับ 50 nF ทนแรงดันได้ 12 kV แต่ในทางปฏิบัติ ค่าตัวเก็บประจุ ที่ได้จากการวัดจะมีค่า 43.7 nF

### 3.5 ส่วนประกอบของหม้อแปลงเตสลาแบบใช้สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ส่วนประกอบต่างๆที่ใช้ทำหม้อแปลงเตสลาซึ่งแสดงในรูปที่ 3.3 มีส่วนประกอบดังนี้คือ



รูปที่ 3.3 หม้อแปลงเตสลาแบบใช้สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

1. แหล่งจ่ายไฟ 0-220 V<sub>ac</sub> 50 Hz
2. วงจร Bridge Rectifier
3. วงจร Full Bridge Inverter
4. วงจรควบคุม Control Circuit

### 3.5.1 แหล่งจ่ายไฟ 0-220 V<sub>ac</sub> 50 Hz และวงจร Bridge Rectifier

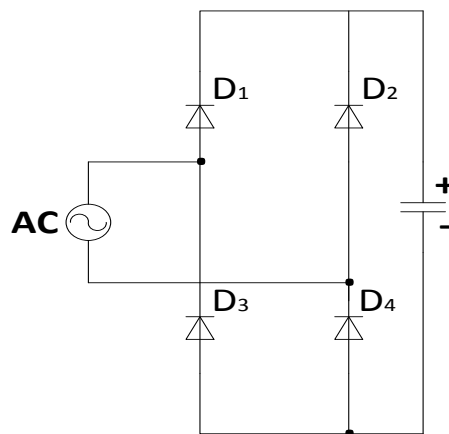
แหล่งจ่ายไฟ 0-220 V<sub>ac</sub> 50 Hz จะใช้วารีแอก ในการเพิ่มและลดแรงดันทางด้านอินพุตซึ่งสามารถปรับค่าแรงดันได้ เพื่อจ่ายไฟให้วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier) ซึ่งวงจรจะทำหน้าที่แปลงแรงดันกระแสสลับ 0-220 V<sub>ac</sub> 50 Hz ให้เป็นกระแสตรงประมาณ 0-310V<sub>dc</sub> โดยใช้ไดโอดเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge-Rectifier) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.34)

$$V_{dc} = \sqrt{2} V_s - 2V_d \quad (3.34)$$

$$V_s = \text{แรงดันที่ใช้งาน (V)}$$

$$V_d = \text{แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด (V)}$$

$$\begin{aligned} V_{dc} &= (\sqrt{2} \times 220) - (2 \times 0.7) \\ &= 310 V_p \end{aligned}$$



รูปที่ 3.4 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier)

การหาขนาดของตัวเก็บประจุฟิวดเตอร์ เพื่อลดแรงดันกระเพื่อม โดยปกติแรงดันกระเพื่อมที่ยอมรับจะไม่เกิน 10% จึงกำหนดให้แรงดันกระเพื่อมมีค่า 5% เพื่อค่าแรงดันกระเพื่อมจะมีน้อยยิ่งขึ้นเพื่อประสิทธิภาพในการทำงานเนื่องจากโหลดถูกด้วยฉนวนไฟฟ้าเป็นโหลดไม่คงที่จึงกำหนดกำลังไฟฟ้าให้สูงไว้ก่อนเพื่อไม่ให้อุปกรณ์เสียหายซึ่งสามารถหาขนาดตัวเก็บประจุได้จากสมการที่ (3.35)

$$C = \frac{I_{in(rms)} \times \Delta t}{\Delta V_{ripple}} \quad (3.35)$$

$$\Delta V_{ripple} = 0.05 \times 310 = 15.5 \text{ V}$$

$$I_{out} = \frac{P_{out}}{V_{dc}} = \frac{2000}{310} = 6.45 \text{ A}$$

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

$$\Delta t = \frac{1}{f} = \frac{1}{50 \text{ Hz}} = 20 \text{ ms}$$

คำนวณเฉพาะครึ่งไซเคิลจะได้  $\Delta t = 10 \text{ ms}$

หาขนาด  $C$  ฟิวดเตอร์ ได้จากสมการ (3.35)

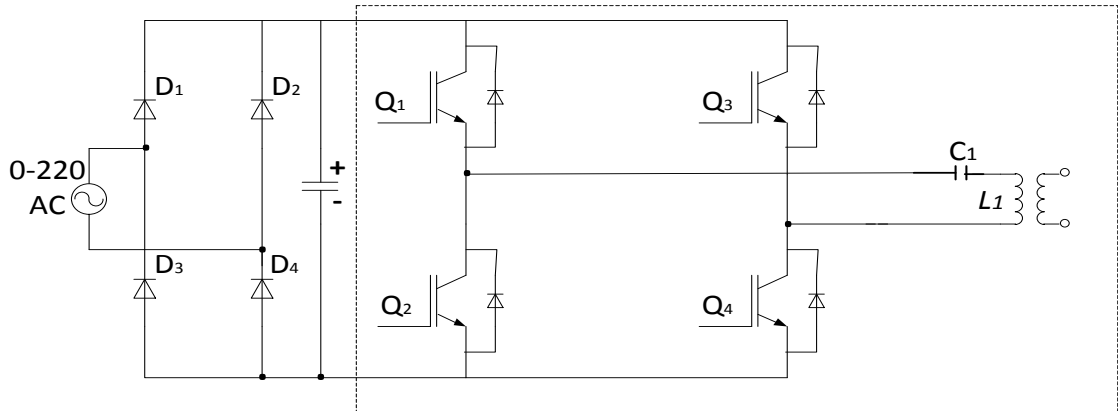
$$C = \frac{I_{in(rms)} \times \Delta t}{\Delta V_{ripple}}$$

$$C = \frac{6.45 \times 10 \times 10^{-3}}{15.5} = 4161.29 \mu\text{F}$$

เลือกตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์ขนาดเท่ากับ  $4700 \mu\text{F}$  ทนแรงดัน  $V_{dc}$  ได้ 450 V

### 3.5.2 วงจร Full Bridge Inverter

การออกแบบหาขนาดของไอจีบีที (IGBT) จากกระแสสูงสุดของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ มีแรงดันตกคร่อมมอสเฟตเพียงค่าเดียว ดังนั้น แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินพุต ที่แรงดันสูงสุด 20% ของแรงดันอินพุต ของมอสเฟตจะต้องทนแรงดันตกคร่อมสูงสุดได้ไม่ต่ำกว่า  $310 V_{dc}$  และความถี่ที่สวิตช์ 146 kHz การคำนวณหาค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มหยุดนำกระแสได้จากสมการที่ (3.36)



รูปที่ 3.5 วงจร Full Bridge Inverter

$$I_p = \frac{P_{out} \times T}{2\eta \times V_{in(\min)} \times t_{on(\max)}} \quad (3.36)$$

เมื่อใช้งานที่ความถี่ 146 kHz

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{146\text{kHz}} = 7.04\mu\text{s}$$

$$t_{on(\max)} = 0.4T = 0.4 \times 7 \times 10^{-6} = 2.8\mu\text{s}$$

กระแสสูงสุดของ ไอจีบีทีคือ

$$I_p = \frac{2000 \times 7.04 \times 10^{-6}}{2 \times 0.8 \times 310 \times 2.75 \times 10^{-6}} = 10.32 \text{ A}$$

ดังนั้น เลือก ไอจีบีทีที่สามารถทนแรงดันได้ไม่ต่ำกว่า 310 V และทนกระแสได้ไม่ต่ำกว่า 20.65 A ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ ไอจีบีทีเบอร์ GA200SA60U เนื่องจากโหนดที่ใช้ทดสอบเป็นโหนดไม่คงที่และความถี่ในการสวิตช์จะใช้ความถี่ไม่สูงมากเนื่องจากความเร็วในการสวิตช์ของ ไอจีบีทีจะช้ากว่ามอดเฟต

### 3.5.3 วงจร Control

ภาคควบคุมและขับเคลื่อน ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

#### วงจรสร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์และวงจรขับนำเกต

หลักการใช้อิซี TL494 สำหรับสร้างพัลส์และกำเนิดการทำงานแบบ Push-Pull Configuration เพื่อควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ วงจรของ TL494 เป็นวงจรพัลส์วิดมอดูเลชันที่ความถี่คงที่ คาบเวลาการทำงานของเอาต์พุตพัลส์กำหนดโดยค่า  $R_T$  และ  $C_T$  จากภายนอกที่ขา 6 และขา 5 ของอิซี ค่าคาบเวลาการทำงานกำหนดคาบเวลาการทำงานของวงจรพัลส์วิดมอดูเลชันที่ 142 kHz โดยการเลือกค่า  $C_T$  เท่ากับ 220pF และหาค่า  $R_T$  สามารถหาได้จากสมการที่ (3.38)

$$\text{จากสูตร} \quad T = \frac{1}{f} \quad (3.37)$$

$$T = \frac{1}{142 \text{ kHz}}$$

$$= 7.04 \mu\text{S}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad R_T = \frac{T \times 1.1}{C_T} \quad (3.38)$$

$$= \frac{7.04 \times 10^{-6} \times 1.1}{200 \times 10^{-12}}$$

$$= 38.73 \text{ k}\Omega$$

เนื่องจากค่าความต้านทานค่า 38.73 k $\Omega$  นั้นไม่มีจำหน่ายจึงเลือกใช้ค่าความต้านทาน 40 k $\Omega$

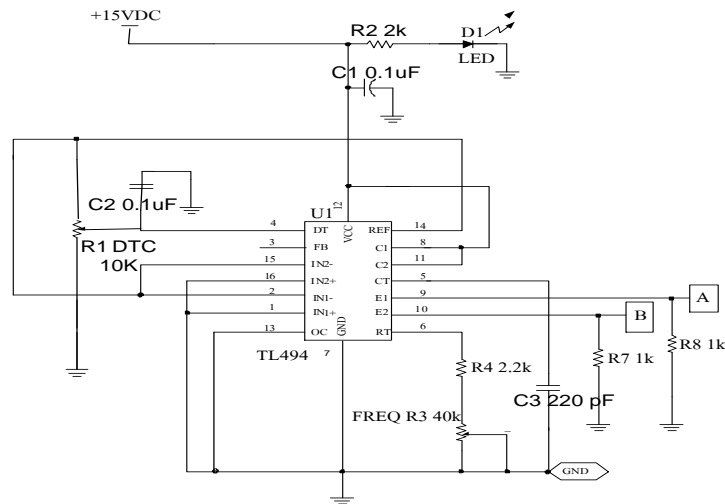
การกำหนดค่าเวลาเพื่อ  $T_D$

$$\text{โดยกำหนด} \quad T_D = 0.1T \quad (3.39)$$

$$= 0.1 \times 7.04 \times 10^{-6}$$

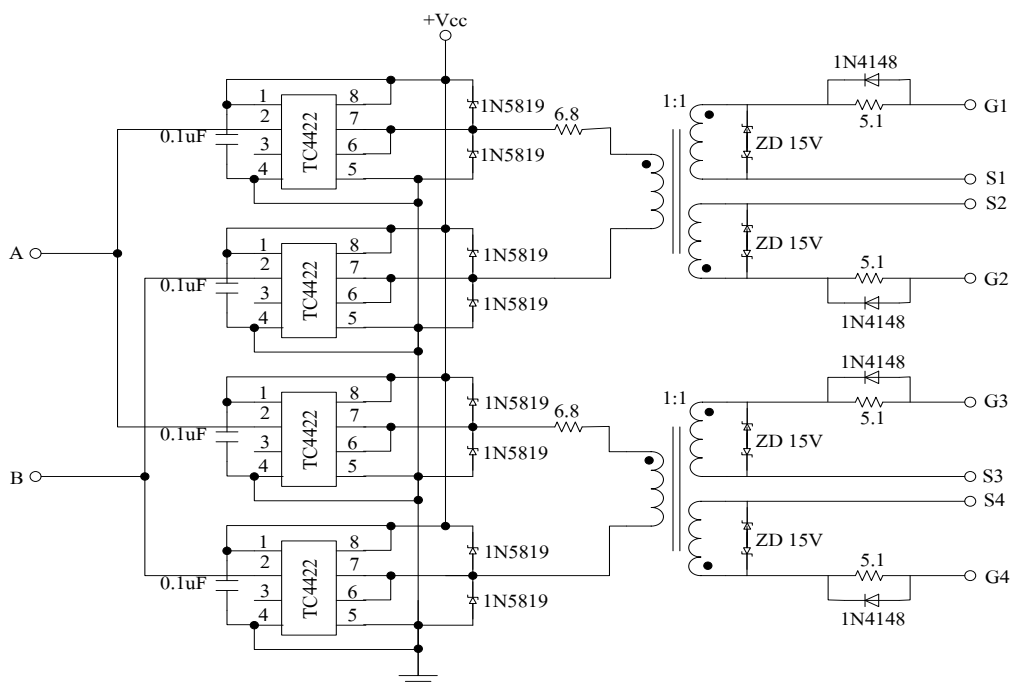
$$= 0.70 \times 10^{-6}$$

การกำหนดค่าเวลาเพื่อของวงจร โดยการจ่ายแรงดันปรับค่าได้ที่ขา 4 ที่ 10 k $\Omega$  และจะนำสัญญาณที่ได้จากขา 9 และขา 10 ของ TL494 ไปเข้าขาของอิซีไคร์ขยายกำลังเบอร์ TC4422 ในการปรับความถี่จะปรับได้จาก R3 และปรับค่าควิตซ์ไซ้เกิดจาก R1



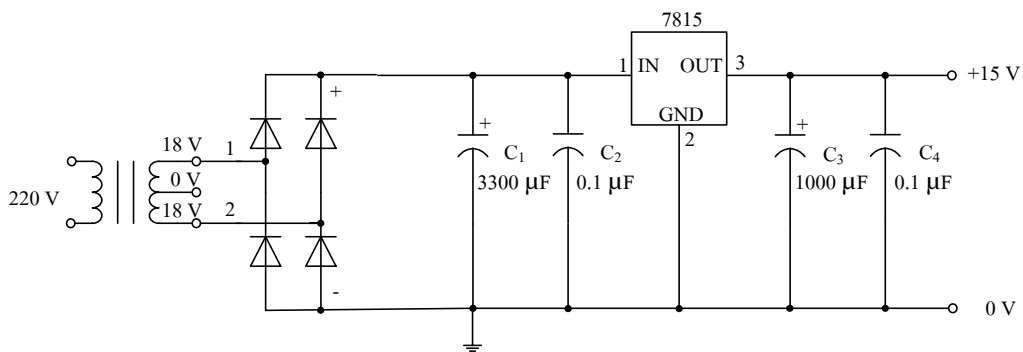
รูปที่ 3.6 วงจร Control กำเนิดสัญญาณพัลส์

วงจรขั้วนำเกิดใช้ไอซีเบอร์ TC4422 วงจรชุดขั้วนำเกิดนี้จะทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าไปขับให้ไอจีบีทีทำงานโดยรับสัญญาณควบคุมการทำงานจากวงจรกำเนิดสัญญาณ TL494 และผ่านไอซีขยายแรงดันและกระแส เพื่อขยายส่งให้หม้อแปลงพัลส์การใช้หม้อแปลงพัลส์มีข้อดีคือสามารถแยกกราวด์ของไอจีบีทีแต่ละตัวออกจากกันส่วนการเลือกใช้หม้อแปลงพัลส์เลือกใช้หม้อแปลงมีอัตราส่วน 1:1 เพื่อให้สามารถขับแรงดันป้อนให้ขาเกิดได้ดีขึ้นและเป็นการแยกทางไฟฟ้า (Isolated) ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรขั้วนำเกิด

ภาคแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงให้กับวงจรภาคควบคุมและวงจรขับนำเกต วงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแสดงดังรูปที่ 3.8 โดยใช้ไอซีเรกกูเลเตอร์เบอร์ 7815 จะจ่ายไฟบวก 15 โวลต์ การทำงานของวงจรมีดังนี้ เมื่อเปิดไฟสลับเข้าห้อม้อแปลงจะมีแรงดันไฟสลับออกมาจากห้อม้อแปลงแรงดันไฟสลับนี้จะถูกเรียกกระแสโดยไดโอดเป็นไฟตรง ซึ่งถูกต่อแบบบริดจ์จากนั้นจะผ่านการกรองแรงดันให้เรียบขึ้นโดยตัวเก็บประจุ และถูกทำให้แรงดันคงที่ด้วยไอซีเรกกูเลเตอร์ที่ 15V

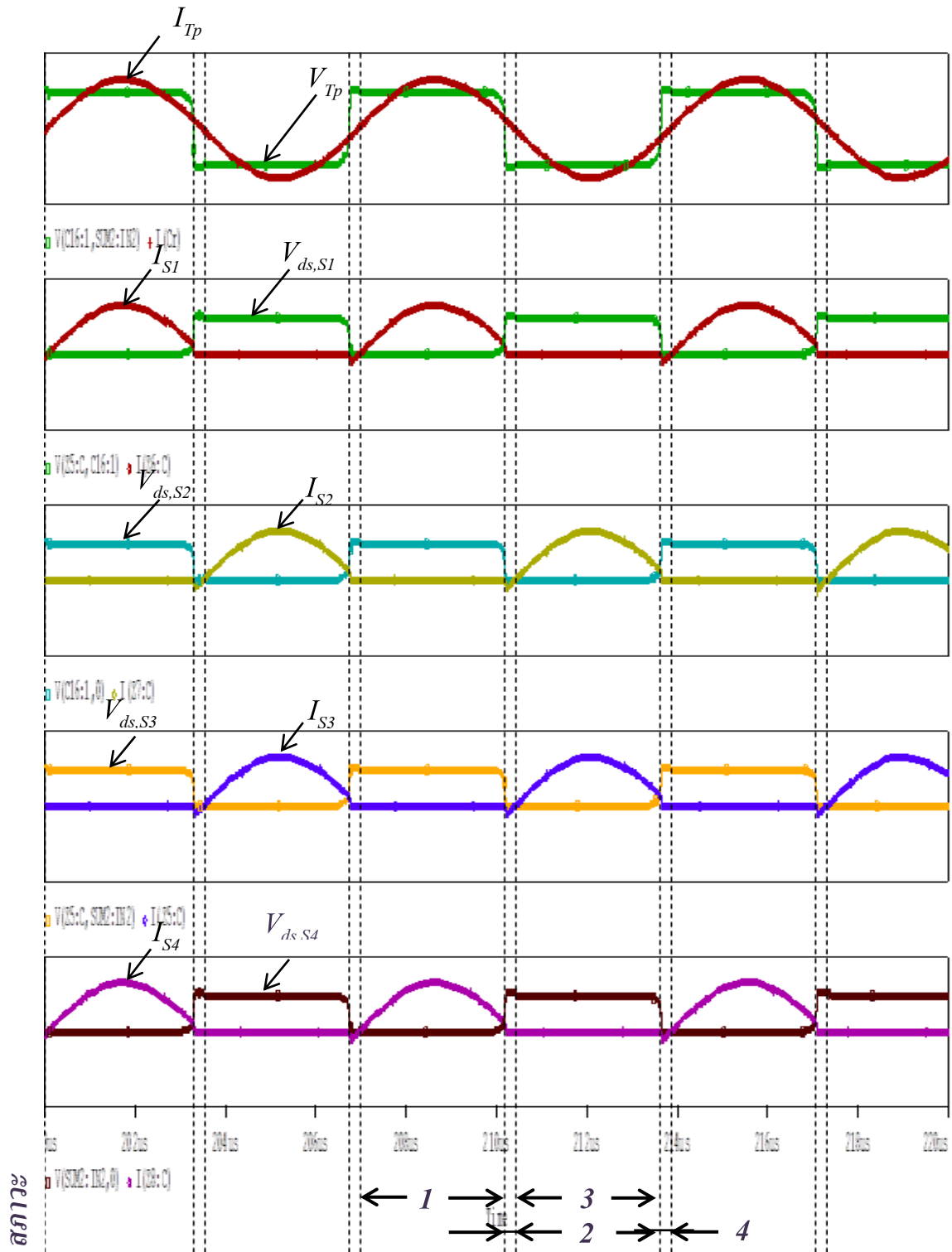


รูปที่ 3.8 วงจรไฟเลี้ยง 15V

### 3.6 การจำลองสถานะการทำงานของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยโปรแกรม

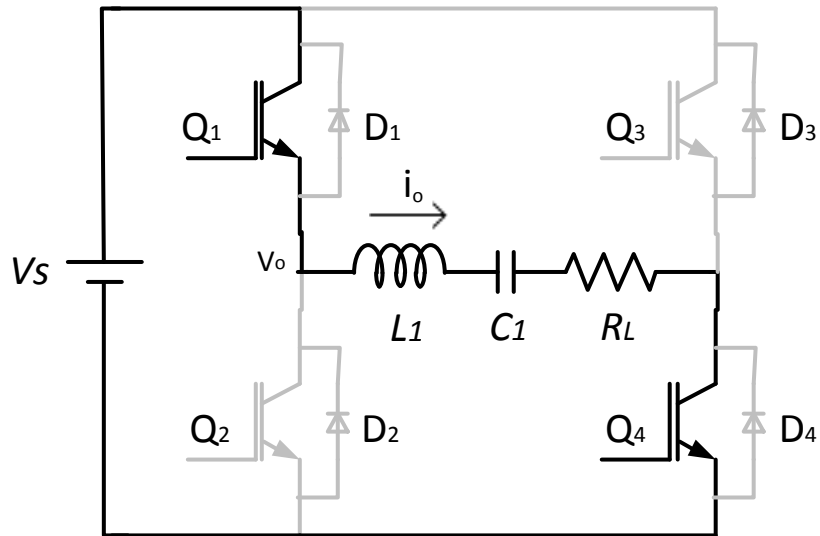
#### OrCAD

จากรูปที่ 3.9 เป็นการจำลองห้อม้อแปลงทดสอบแบบใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งจะดูผลการทำงานของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

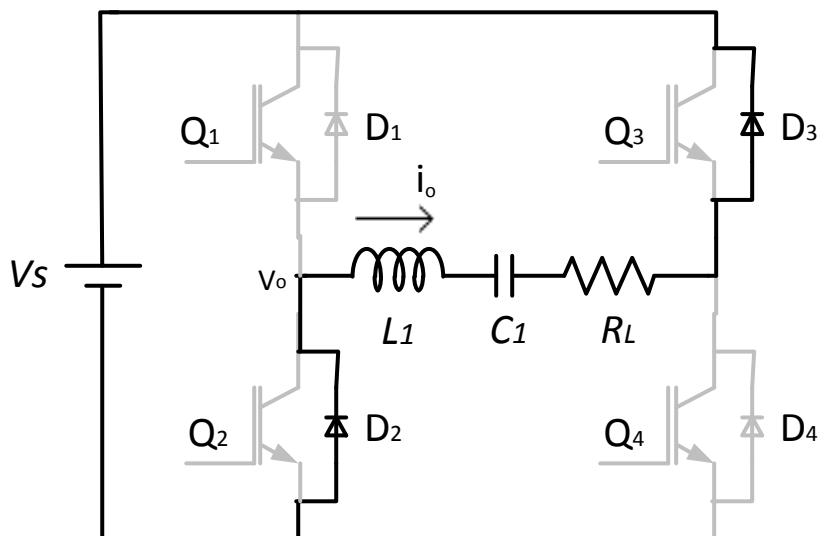


รูปที่ 3.9 แรงดันและกระแสของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

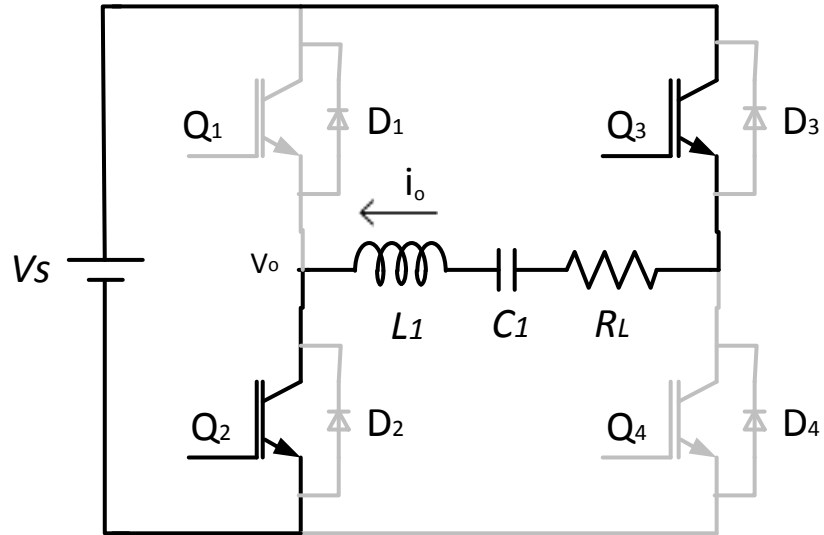
จากรูปที่ 3.9 สามารถอธิบายสถานะการทำงานได้ดังนี้



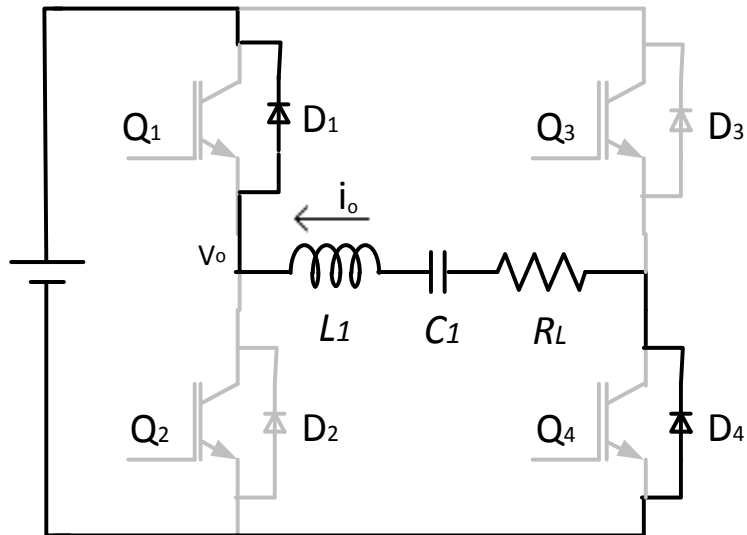
**สถานะการทำงานที่ 1 (Powering Mode) :** กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายดีซีจะจ่ายไปยังโหลดผ่านสวิตช์  $Q_1$  และ  $Q_4$  ในสถานะการทำงานนี้ ทั้งแรงดันและกระแสเอาต์พุต  $v_o, i_o$  จะเป็นบวก



**สถานะการทำงานที่ 2 (Regenerating Mode) :** กำลังไฟฟ้าที่สะสมไว้ที่ตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  และตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะถูกป้อนคืนสู่แหล่งจ่ายดีซีผ่านไดโอด  $D_2$  และ  $D_3$  ในสถานะการทำงานนี้ แรงดันเอาต์พุต  $v_o$  จะเป็นลบแต่กระแสเอาต์พุต  $i_o$  ยังคงเป็นบวก



**สถานะการทำงานที่ 3 (Powering Mode) :** กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายดีซีจะจ่ายไปยังโหลดผ่านสวิตช์  $Q_2$  และ  $Q_3$  ในสถานะการทำงานนี้ ทั้งแรงดันและกระแสเอาต์พุต  $v_o, i_o$  จะเป็นลบ



**สถานะการทำงานที่ 4 (Regenerating Mode) :** กำลังไฟฟ้าที่สะสมไว้ที่ตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  และตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะถูกป้อนคืนสู่แหล่งจ่ายดีซีผ่านไดโอด  $D_1$  และ  $D_4$  ในสถานะการทำงานนี้ แรงดันเอาต์พุต  $v_o$  จะเป็นบวกแต่กระแสเอาต์พุต  $i_o$  ยังคงเป็นลบ