

บทที่ 3 การวิเคราะห์และการออกแบบวงจร

การออกแบบ และสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ให้ขนาดแรงดันเท่ากับ 6 kV รูปคลื่น 1.2/50 μ s

ข้อกำหนดของการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

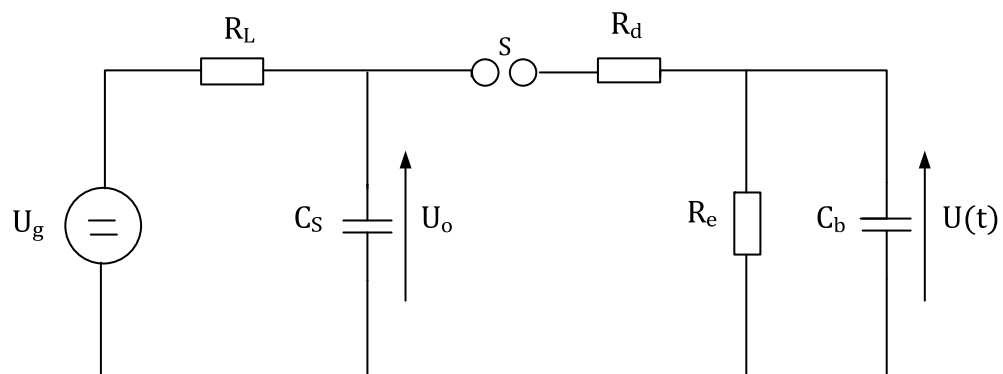
1. แรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิดเท่ากับ 6 kV ตามมาตรฐาน IEC 60439-1
2. ลักษณะรูปคลื่นของแรงดัน 1.2/50 μ s

ในส่วนของการดำเนินการดำเนินงานมีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องดังนี้

- 3.1 การออกแบบสร้างรูปคลื่นแรงดัน
- 3.2 การออกแบบวงจรอัดประจุ
- 3.3 การออกแบบสวิตช์แรงดันสูง
- 3.4 การสร้างสวิตช์แรงสูง
- 3.5 การสร้างวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ 6 kV รูปคลื่น 1.2/50 μ s

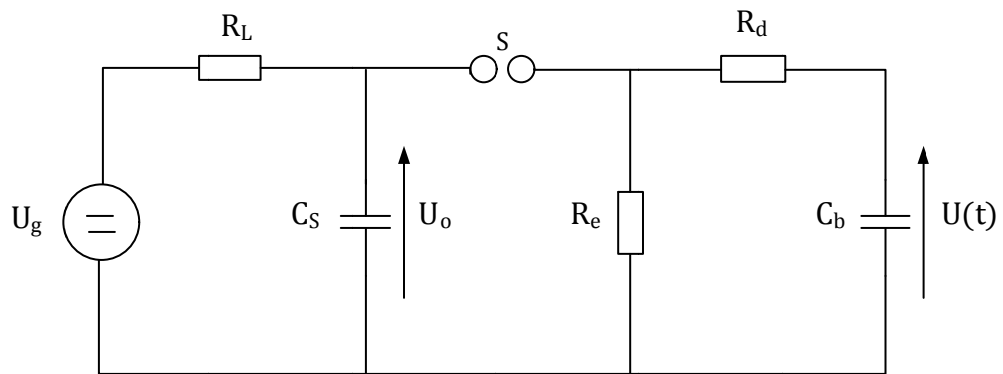
3.1 การออกแบบสร้างรูปคลื่นแรงดัน

การออกแบบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยอาศัยข้อกำหนดทางด้านเทคนิค แรงดันที่ต้องการสร้างคือแรงดัน 6 kV รูปคลื่น 1.2/50 μ s ตามมาตรฐาน IEC การออกแบบใช้วงจรพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก) และรูปที่ 3.1 (ข)



(ก)

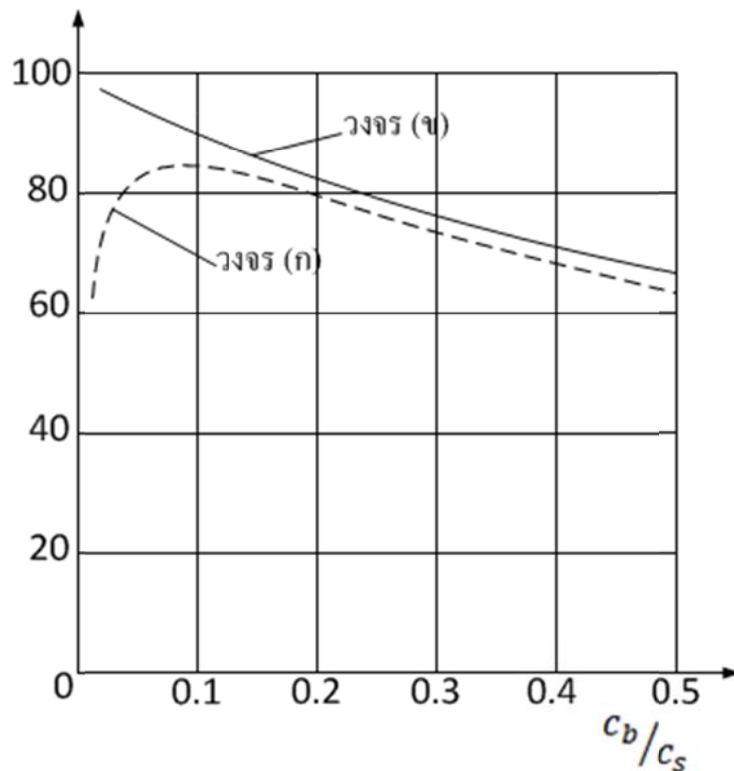
รูปที่ 3.1 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์



(ข)

รูปที่ 3.1 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (ต่อ)

ในการพิจารณาเลือกวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ ได้ทำการพิจารณาจากรูปวงจร 3.1 (ก) และ รูปที่ 3.1 (ข) โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจร เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรแล้วพบว่า วงจรรูปที่ 3.1 (ข) มีประสิทธิภาพที่สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ดังนั้นจึงเลือกวงจรรูปที่ 3.1 (ข) ในการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในการวิจัยในครั้งนี้



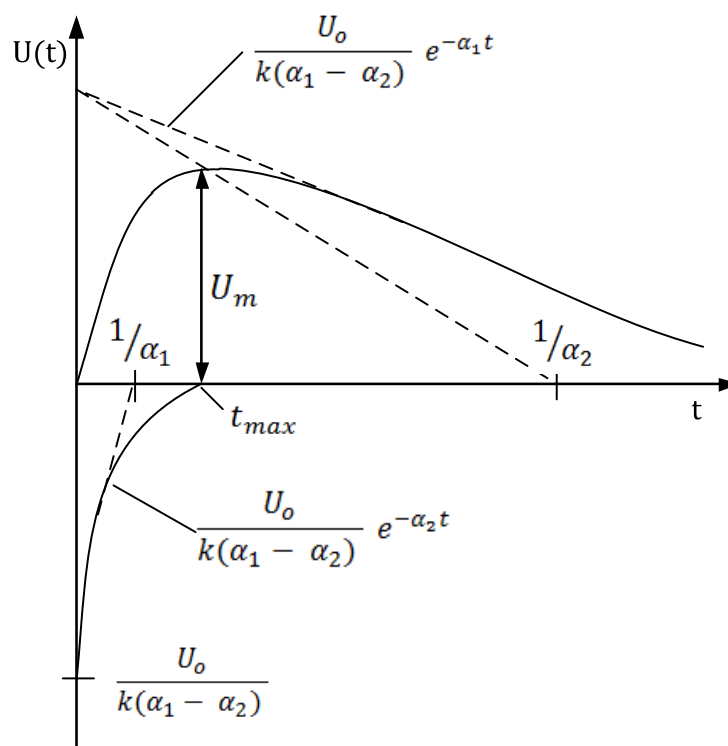
รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

ในการออกแบบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์นั้นจะเริ่มจากการวิเคราะห์วงจรโดยใช้ลาปลาซ ทรานฟอร์มและเมื่อจัดรูปสมการให้อยู่ในเทอมของเวลาจะได้สมการแรงดันอิมพัลส์ในเทอมของเวลาดังสมการที่ 3.1

$$U(t) = \frac{U_0}{k} \cdot \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \cdot (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}) \quad (3.1)$$

เมื่อ	$U(t)$	คือ	แรงดันอิมพัลส์เปลี่ยนแปลงตามเวลา
	U_0	คือ	แรงดันอิมพัลส์กระแสตรง
	k	คือ	ค่าคงตัวของรูปคลื่นแรงดัน
	α_1, α_2	คือ	ค่าคงตัวเวลา (Time Constant)
	t	คือ	เวลาที่เปลี่ยนแปลง

จากสมการแรงดันที่ได้จากวงจรอิมพัลส์จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในเทอมของเวลาประกอบด้วยเทอมเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม ซึ่งมีค่าคงตัวเวลา (Time Constant) เท่ากับ $\frac{1}{\alpha_1}$ และ $\frac{1}{\alpha_2}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แรงดันอิมพัลส์ในเทอมของเวลา

จากสมการของแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานจะมีช่วงเวลาหน้าคลื่น T_1 และหางคลื่น T_2 โดยมีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลา $\frac{1}{\alpha_1}$ และ $\frac{1}{\alpha_2}$ จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ T_1/T_2 อันเป็นตัวแสดงลักษณะของรูปคลื่น การหาค่า T_1 และ T_2 ได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.2 และ 3.3

$$T_1 = \frac{k_2}{\alpha_2} \quad (3.2)$$

$$T_2 = \frac{k_1}{\alpha_1} \quad (3.3)$$

ค่า k_1 และ k_2 เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับรูปคลื่นดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าแฟกเตอร์ k_1 และ k_2 สำหรับรูปคลื่นมาตรฐาน

T_1/T_2	k_1	k_2	$\frac{1}{\alpha_1} (\mu s)$	$\frac{1}{\alpha_2} (\mu s)$
1.2/5	1.44	1.49	3.47	0.805
1.2/50	0.73	2.96	68.5	0.405
1.2/200	0.70	3.15	286	0.381
250/2500	0.87	2.41	2875	104.0

3.1.1 การคำนวณหาค่าองค์ประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

การหาองค์ประกอบของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ จะคำนวณหาได้จากสมการในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าองค์ประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

	วงจรรูปที่ 3.1 (ก)	วงจรรูปที่ 3.1 (ข)
T_1	$k_2 \frac{R_d R_e}{(R_d + R_e)} \cdot \frac{C_b C_s}{(C_b + C_s)}$	$k_2 R_d \cdot \frac{C_b C_s}{(C_b + C_s)}$
T_2	$k_1 (R_d + R_e) \cdot (C_b + C_s)$	$k_1 R_e (C_b + C_s)$
η	$\frac{R_c C_s}{(R_d + R_e) \cdot (C_b + C_s)}$	$\frac{C_s}{C_s + C_b}$

การหาค่าประกอบของวงจร จะทำการหาความจุของค่าตัวเก็บประจุ C_s ก่อน เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลักของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์จะต้องมีการสะสมพลังงานได้มากพอที่จะจ่ายพลังงานไปให้กับโหลด และการเลือกตัวเก็บประจุต้องคำนึงถึงขนาดของแรงดันที่จะนำไปใช้งานด้วย และที่สำคัญการหาตัวเก็บประจุที่มีขนาดตั้งแต่ $1 \mu F$ ขึ้นไปที่สามารถทนแรงดัน ได้สูงนั้นหาได้ยากและมีราคาแพงมาก แต่สามารถนำตัวเก็บประจุที่ทนแรงดันต่ำมาต่ออนุกรมกันเพื่อให้สามารถทนแรงดันได้ตามที่ต้องการใช้งาน การนำตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกันแล้วมาต่อขนานกันหลายๆ ชุด ก็จะได้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดความจุมากพอและสามารถทนแรงดันได้สูง แต่การนำตัวเก็บประจุ มาต่อกันจำนวนมากๆ เมื่อมีตัวเก็บประจุตัวใดตัวหนึ่งเสียก็จะทำให้ค่าของความจุรวมเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นจึงเลือกค่า $C_s = 4 \mu F$ โดยใช้ตัวเก็บประจุขนาด $8 \mu F$ แรงดัน $4000 V$ จำนวน 2 ตัวต่ออนุกรมกัน จะได้ความจุรวมเท่ากับ $4 \mu F$ ทนแรงดันได้ $8000 V$ และเมื่อนำค่าความจุของตัวเก็บประจุ C_s มาคำนวณหาพลังงาน จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จากสมการพลังงาน} \quad w &= \frac{1}{2} C_s U_0^2 \\ w &= \frac{1}{2} \cdot (4 \times 10^{-6}) \cdot (6000)^2 \\ &= 72 \text{ J} \end{aligned}$$

การหาค่าตัวเก็บประจุ C_b จะสามารถคำนวณโดยใช้สมการประสิทธิภาพดังสมการ 3.4

$$\eta = \frac{U}{U_0} \leq \frac{C_s}{(C_s + C_b)} \quad (3.4)$$

จากสมการประสิทธิภาพถ้าต้องการให้ประสิทธิภาพของแรงดันมีค่าสูงๆ ควรเลือกใช้ ค่าความจุของตัวเก็บประจุ C_s มีค่ามากกว่าค่าความจุของตัวเก็บประจุ C_b มากๆ ในที่นี้เลือกใช้ ค่าความจุของตัวเก็บประจุ $C_b = 9.4 \text{ nF}$ นำตัวเก็บประจุค่าความจุ 4.7 nF ทนแรงดัน $2000 V$ มาต่ออนุกรมกันจำนวน 4 ตัว จำนวน 2 ชุด จากนั้นนำตัวเก็บประจุทั้ง 2 ชุดมาต่อขนานกันทำให้ได้ค่าความจุรวม 9.4 nF ทนแรงดัน $8000 V$ และสามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของวงจรได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{C_s}{(C_s + C_b)} \\ &= \frac{4 \times 10^{-6}}{(4 \times 10^{-6} + 9.4 \times 10^{-9})} \\ &= 0.9976 \\ &= 99.76\% \end{aligned}$$

จากนั้นนำได้ค่า $C_s = 4 \mu F$ และ $C_b = 9.4 \text{ nF}$ นำมาแทนค่าเพื่อหาค่าของความต้านทาน R_d และ R_c ดังนี้

$$T_1 = k_2 R_d \cdot \frac{C_b C_s}{(C_b + C_s)}$$

$$\begin{aligned}
 R_d &= \frac{1.2 \times 10^{-6}}{(2.96 \times 9.37 \times 10^{-9})} \\
 &= 43.26 \, \Omega
 \end{aligned}$$

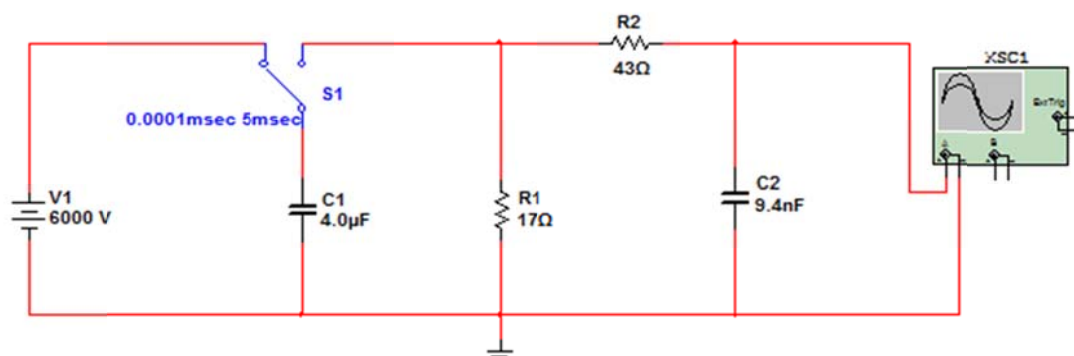
หาค่า R_e จากสมการ

$$T_2 = k_1 R_e \cdot (C_b + C_s)$$

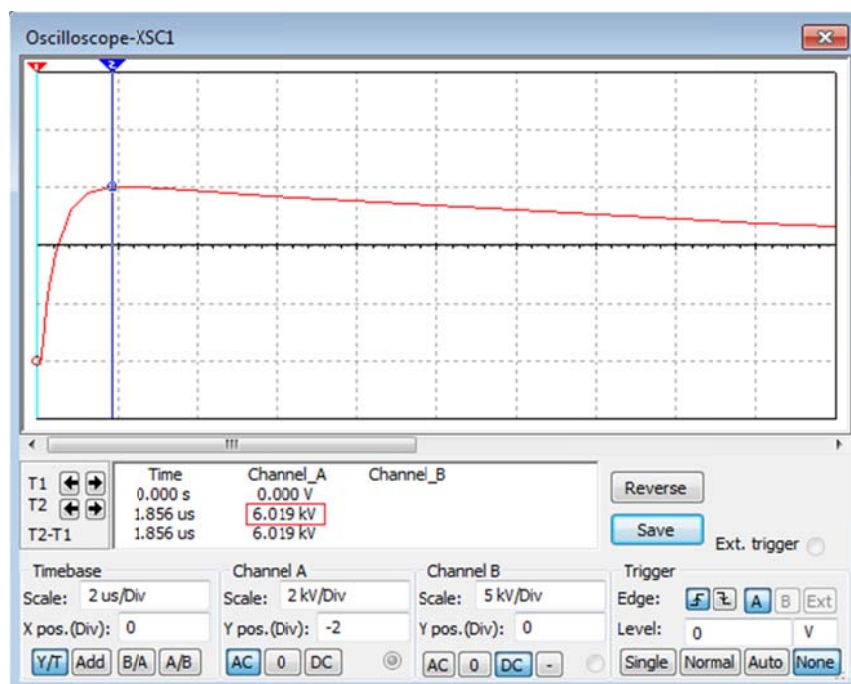
$$\begin{aligned}
 R_e &= \frac{50 \times 10^{-6}}{(0.73 \times 4009.4 \times 10^{-6})} \\
 &= 17.08 \, \Omega
 \end{aligned}$$

3.1.2 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เมื่อกำหนดหาค่าประกอบของวงจรได้แล้ว จากนั้นนำค่าที่ได้จากการคำนวณ มาจำลอง การทำงานของวงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ได้ใช้โปรแกรม Electronics Work Bench ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปมีความเชื่อถือได้ วงจรการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4

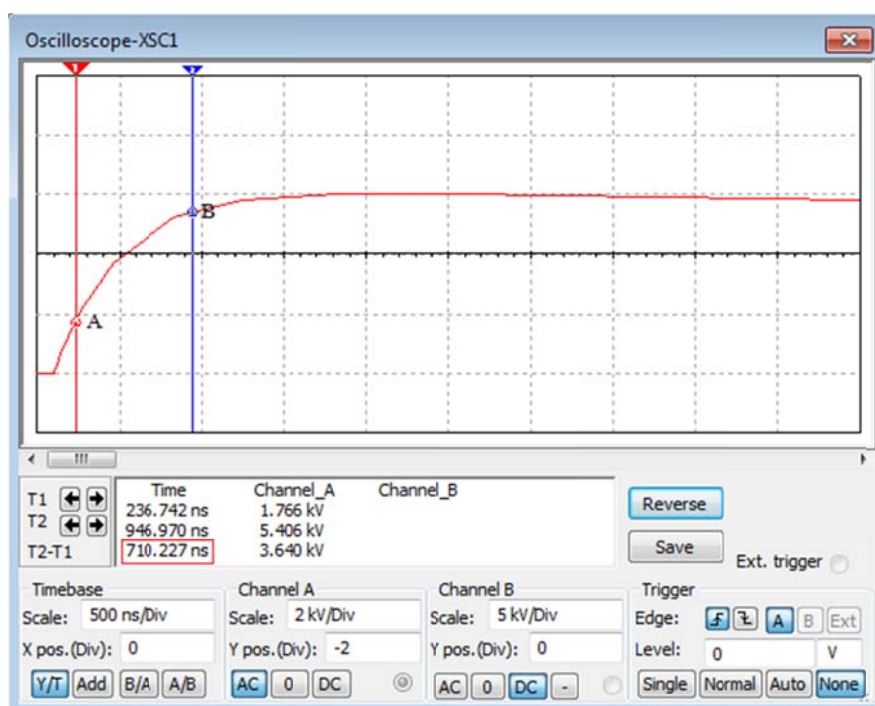


รูปที่ 3.4 วงจรการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



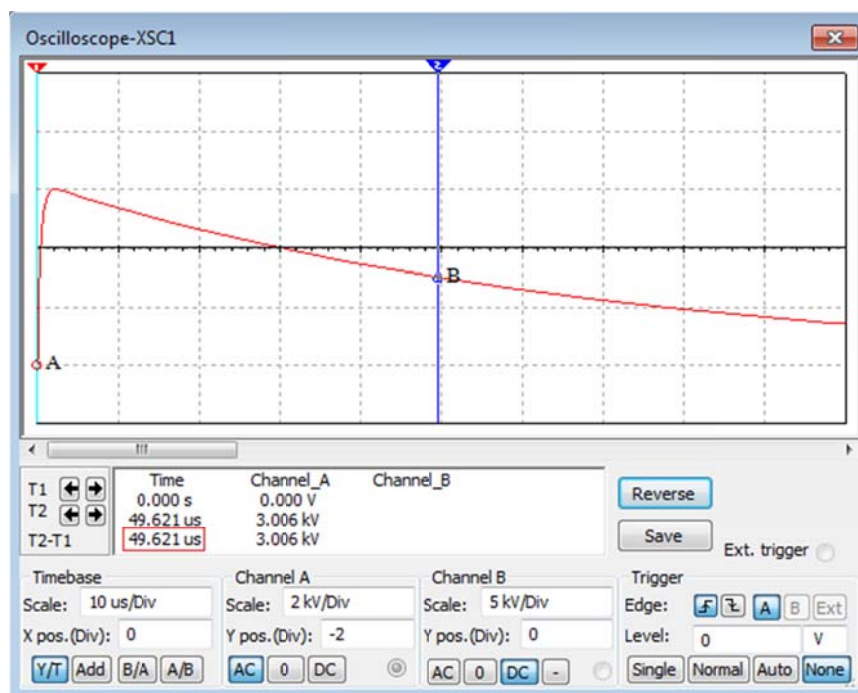
รูปที่ 3.5 แรงดันอิมพัลส์จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ตั้งค่า 2 kV/div และ 2 μ s/div)

จากรูปที่ 3.5 เมื่อทำการจำลองการทำงานของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถวัดแรงดันอิมพัลส์ได้ 6.019 kV



รูปที่ 3.6 เวลาหน้ากลิ่นของแรงดันอิมพัลส์จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ตั้งค่า 2 kV/div และ 500 ns/div

จากรูปที่ 3.6 เมื่อทำการวัดเวลาหน่วงคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยจุด A คือตำแหน่ง T_{30} และจุด B คือตำแหน่ง T_{90} จะได้ค่าช่วงเวลา $T = 710.2 \text{ ns}$ เมื่อนำมาแทนค่าในสมการ $T_1 = 1.67T$ จะได้ค่า $T_1 = 1.18 \text{ } \mu\text{s}$



รูปที่ 3.7 เวลาทางคลื่นของแรงดันอิมพัลส์จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ตั้งค่า 2 kV/div และ 10 $\mu\text{s}/\text{div}$)

จากรูปที่ 3.7 เมื่อทำการวัดเวลาทางคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากการจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยจุด A คือตำแหน่ง 0_1 และจุด B คือตำแหน่ง T_{50} จะได้ค่าช่วงเวลา $T_1 = 49.62 \text{ } \mu\text{s}$

นำค่าที่ได้จากรูปที่ 3.5 - 3.7 มาคำนวณหาช่วงเวลาของหน้าคลื่นและหางคลื่น ผลที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ผลการวัดรูปคลื่นที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากรูปที่ 3.5 - รูปที่ 3.7

ตำแหน่ง	เวลา	แรงดัน	ค่ามาตรฐาน	ค่าผิดพลาด	ค่าผิดพลาดมาตรฐาน
1.0 (100 %)	-	6.01 kV	6.00 kV	0.17%	$\pm 3 \%$
0.9 (t_{90})	0.94 μs	5.4 kV	5.40 kV	0.00 kV	-
0.5 (t_{50})	49.62 μs	3.00 kV	3.00 kV	0.00 kV	-

ตารางที่ 3.3 ผลการวัดรูปคลื่นที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากรูปที่ 3.5 - รูปที่ 3.7 (ต่อ)

ตำแหน่ง	เวลา	แรงดัน	ค่ามาตรฐาน	ค่าผิดพลาด	ค่าผิดพลาดมาตรฐาน
0.3 (t_{30})	0.23 μ s	1.76 kV	1.80 kV	- 0.04 kV	-
T ($t_{90} - t_{30}$)	0.71 μ s	-	-	-	-
T ₁ (1.67T)	1.18 μ s	-	1.2 μ s	- 0.02 μ s	$\pm 0.36\mu$ s
T ₂	49.62 μ s	-	50 μ s	- 0.39 μ s	$\pm 10\mu$ s

ผลที่ได้ตามตารางที่ 3.3 ค่า T₁ และ T₂ ที่ได้จากวงจรจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน จึงสามารถนำค่าที่คำนวณได้ไปสร้างวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้

3.2 การออกแบบวงจรอัดประจุ

การออกแบบวงจรอัดประจุโดยอาศัยหลักการของวงจร RC-Transient ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยมี สมการแรงดันและสมการที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ

สมการแรงดันอัดประจุ

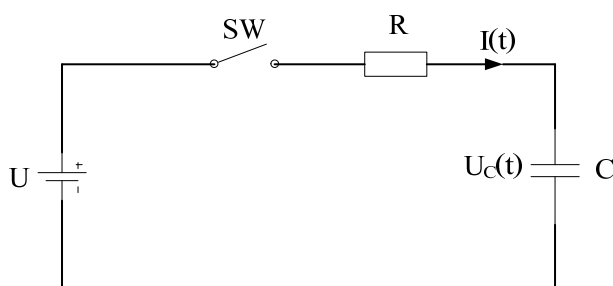
$$U_c(t) = U \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (3.5)$$

สมการกระแส

$$i(t) = \frac{E}{R} \left(e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (3.6)$$

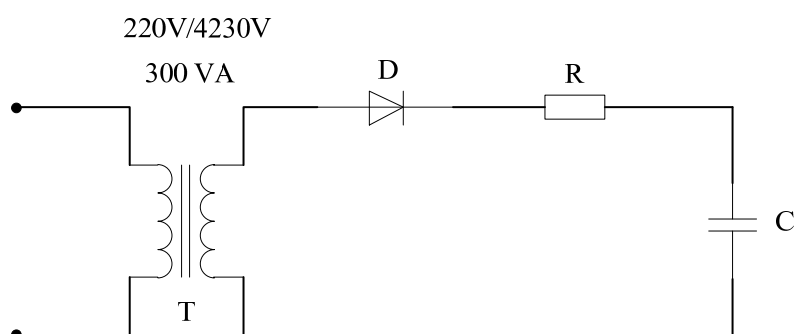
ค่าคงที่ของเวลาในการอัดประจุ

$$\tau = RC \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.8 วงจร RC-Transient

ในการออกแบบวงจรอัดประจุจะต้องคำนึงถึงกระแสสูงสุดในขณะที่สวิตช์ปิดวงจร (เมื่อเวลา $t=0$) จะทำให้มีกระแสไหลในวงจรสูงที่สุดมีขนาดเท่ากับ U/R ดังนั้นจำเป็นต้องคำนวณหาความต้านทาน ที่มีค่าเหมาะสมโดยต้องคำนึงถึงกระแสสูงสุดที่หม้อแปลงจ่ายได้ โดยคำนวณจากพิกัดกำลังของหม้อแปลง (VA)หารด้วยแรงดันสูงสุด (V) ของหม้อแปลงที่จ่ายออก จากรูปที่ 3.9 หม้อแปลง T ขนาดพิกัดกำลัง 300 VA แรงดันสูงสุด 4230 V เป็นตัวจ่ายแรงดันให้กับวงจรอัดประจุ



รูปที่ 3.9 วงจรอัดประจุ

ดังนั้นต้องทำการคำนวณหากระแสสูงสุดที่หม้อแปลงตัวที่จ่ายได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} I_{\max} &= \frac{VA}{V_{\text{rms}}} \\ &= \frac{300VA}{4230V} \\ &= 70.92 \text{ mA} \end{aligned}$$

เมื่อทราบขนาดกระแสสูงสุดที่ไหลในวงจรอัดประจุจึงมาคำนวณหาความต้านทานเพื่อจำกัดกระแสในการอัดประจุ ดังนี้

$$\begin{aligned} R &= \frac{U}{I_{\max}} \\ &= \frac{6000V}{70.92mA} \\ &= 84.6k\Omega \end{aligned}$$

เลือกใช้ความต้านทาน 85 k Ω เพื่อจำกัดค่ากระแสไฟฟ้า

เวลาที่ใช้ในการประจุหาได้จากสมการที่ 3.7

$$\begin{aligned} \tau &= RC \\ &= 85 \times 10^3 \times 4 \times 10^{-6} \\ &= 0.34 \text{ s} \end{aligned}$$

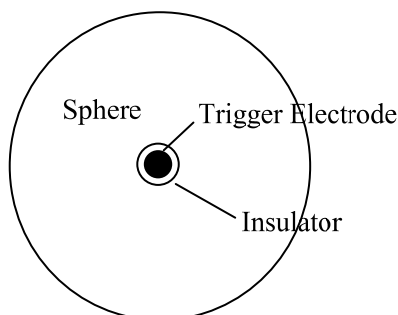
จากการคำนวณหาค่าเวลาคงที่ในการอัดประจุให้ตัวเก็บประจุ C_s ได้ค่าเวลาเท่ากับ 0.34 วินาที ในทางปฏิบัติเวลาคงที่จากการคำนวณอาจจะไม่เพียงพอต่อการอัดประจุ จึงกำหนดให้เวลาของการอัดประจุ เป็น 5 เท่าของเวลาที่คำนวณได้ ดังนั้นจึงใช้เวลาในการอัดประจุประมาณ 1.7 วินาที ถ้าหากต้องการลดเวลาในการอัดประจุให้ตัวเก็บประจุ C_s ลง สามารถทำได้โดยปรับค่าความต้านทานให้น้อยลง ดังนั้น วงจรอัดประจุที่ใช้นี้จะอัดประจุเป็นเวลา 2 วินาที

3.3 การออกแบบสวิตช์แรงดันสูง

การออกแบบสวิตช์แรงดันสูง จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สปาร์กแกป (Spark Gap) และวงจรจุดชนวน (Trigger) ซึ่งในแต่ละส่วนมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

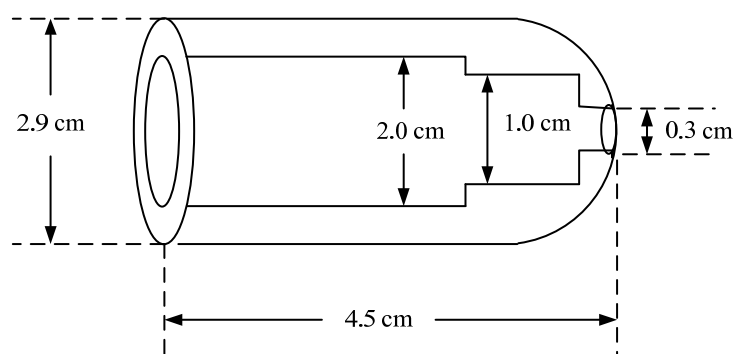
3.3.1 การออกแบบสปาร์กแกป

สปาร์กแกปจะประกอบไปด้วยขั้วอิเล็กโทรดคือ อิเล็กโทรดแรงสูง อิเล็กโทรดดิน และอิเล็กโทรดจุดชนวน ซึ่งอิเล็กโทรดจุดชนวนจะใช้หัวเทียนในการจุดชนวน โดยที่อิเล็กโทรดจุดชนวนจะถูกนำไปใส่ไว้ตรงกลางของขั้วอิเล็กโทรดแรงสูง ซึ่งขั้วอิเล็กโทรดจะมีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมเพื่อให้ได้ผลการทดลองเป็นไปตามทฤษฎีซึ่งได้กล่าวไว้ในข้างต้นแล้ว และปลายอิเล็กโทรดแรงสูงด้านที่มีอิเล็กโทรดจุดชนวนดังแสดงในรูปที่ 3.10

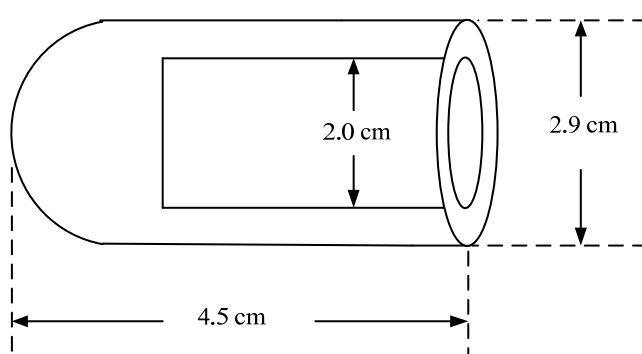


รูปที่ 3.10 ปลายอิเล็กโทรดแรงสูงด้านที่มีอิเล็กโทรดจุดชนวน

ในการออกแบบสปาร์กแกปได้คำนึงถึงขนาดอุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับบรรจุไว้ในท่อพีวีซี ที่มีพื้นที่จำกัด จึงได้ออกแบบให้ปลายอิเล็กโทรดทั้ง 2 ด้านมีลักษณะครึ่งทรงกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.9 cm ยาว 4.5 cm อิเล็กโทรดด้านหนึ่งจะเจาะรูไว้สำหรับติดตั้งตัวจุดชนวน (Trigger) ซึ่งใช้หัวเทียนจุดระเบิดในห้องเผาไหม้ของรถจักรยานยนต์ แล้วนำอิเล็กโทรดทั้งสองบรรจุเข้าท่อ PVC ขนาด 3.5 cm และวัสดุที่นำสร้างอิเล็กโทรดคือสแตนเลส โครงสร้างของอิเล็กโทรดแรงสูงดังแสดง ในรูปที่ 3.11 และโครงสร้างของอิเล็กโทรดดิน ดังแสดงในรูปที่ 3.12



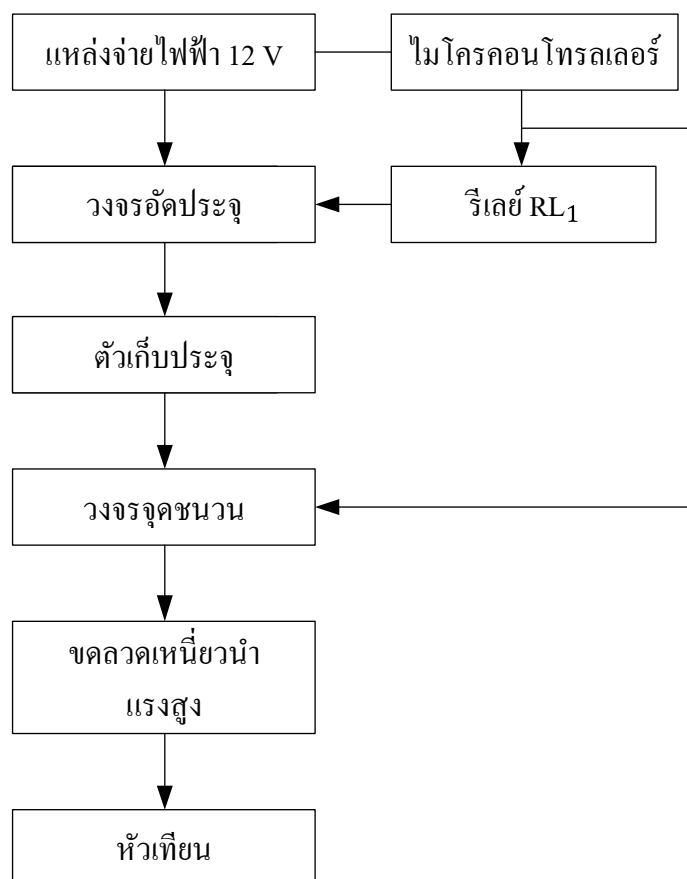
รูปที่ 3.11 โครงสร้างของอิเล็กโตรดแรงสูง



รูปที่ 3.12 โครงสร้างของอิเล็กโตรดดิน

3.3.2 การออกแบบวงจรจุดชนวน

ในการออกแบบวงจรจุดชนวนเพื่อให้สวิตช์แรงดันสูงทำงานนั้นต้องคำนึงถึงความเร็ว ในการจุดชนวน หรือเกิดการหน่วงเวลาเนื่องจากการทำงานน้อยที่สุด จึงเลือกใช้เอสซีอาร์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์สำหรับจุดชนวนโดยใช้สัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการอัดประจุ ให้ตัวเก็บประจุ C_1 ผ่านหน้าสัมผัสของรีเลย์ RL_1 เมื่อตัวเก็บประจุอัดประจุให้ตัวเก็บประจุ C_1 ตามค่าเวลาที่จนเต็มแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณไปควบคุมให้สวิตช์จุดชนวนทำงาน เพื่อให้ตัวเก็บประจุคลายประจุให้กับขดลวดเหนี่ยวนำแรงดันสูง ทำให้เกิดแรงดันสูงส่งไปที่หัวเทียนและเกิดการเบรกควาน์ที่เขียวหัวเทียน แรงดันที่เกิดการเบรกควาน์จะขึ้นอยู่กับระยะห่างของเขียวหัวเทียน ขณะเดียวกันหน้าสัมผัสของรีเลย์ RL_1 ก็จะเปิดวงจรเพื่อตัดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่วงจรอัดประจุ



รูปที่ 3.13 บล็อกไดอะแกรมของวงจรจุดชนวน

จากรูปที่ 3.13 บล็อกไดอะแกรมของวงจรจุดชนวนสามารถแบ่งการทำงานของวงจรออกได้ 2 วงจร ดังนี้

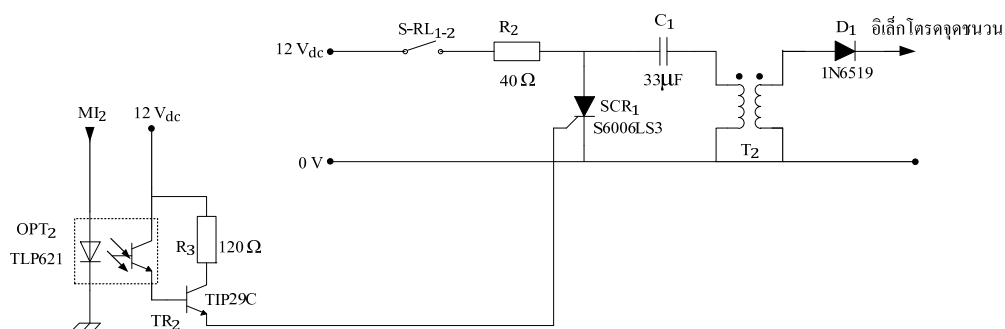
3.3.2.1 วงจรอัดประจุเล็กโตรจุดชนวน

วงจรอัดประจุให้ตัวเก็บประจุ C_1 วงจรนี้จะทำงานได้โดยการส่งงานจากไมโครคอนโทรลเลอร์ให้รีเลย์ RL_1 ทำงานหน้าสัมผัสของรีเลย์ RL_1 เปลี่ยนสถานะเป็นปิดวงจร ทำให้มีกระแสจากแหล่งจ่ายไฟตรง 12 โวลต์ ไหลผ่านตัวต้านทาน R_3 ไปอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_1 ตามค่าเวลาคงที่กำหนดไว้

3.3.2.2 วงจรสร้างแรงดันจุดชนวน

เมื่อตัวเก็บประจุ C_1 อัดประจุจนถึงค่าเวลาคงที่กำหนดไว้ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้รีเลย์ RL_1 หยุดทำงานทำให้หน้าสัมผัสของรีเลย์ RL_1 เปิดวงจรไม่มีกระแสไปอัดประจุให้ตัวเก็บประจุ C_1 ขณะเดียวกันไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้ออปโตทรานซิสเตอร์ (Opto Transistor) OPT_1 นำกระแส มีกระแสจ่ายให้ขาเบสของทรานซิสเตอร์ TR_2 ทำให้มีกระแสไหลจากแหล่งจ่ายไฟ 12 โวลต์ ผ่านตัวต้านทาน R_3 ไปกระตุ้นขาเกตของ SCR_1 ทำให้ SCR_1 นำกระแส ตัวเก็บประจุ C_1 ปล่อยประจุผ่าน SCR_1 และ

ขดลวดด้านแรงต่ำเกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันที่ปลายของขดลวดด้านแรงสูง ที่ต่อกับหัวเทียนจุดระเบิดจนเกิดการเบรกคาวน์ ขึ้นที่หัวเทียน



รูปที่ 3.14 วงจรจุดชนวน

จากวงจรรูปที่ 3.14 มีรายละเอียดอุปกรณ์ต่างๆดังนี้

1. S-RL₁₋₂ คือ หน้าสัมผัสของรีเลย์ RL₁ แบบปกติเปิด (NO ; Normal Open)
2. T₂ คือ ตัวเหนี่ยวนำแรงสูงอัตราส่วน 1:80
3. TR₂ คือ ทรานซิสเตอร์เบอร์ TIP29C
4. OPT₂ คือ ออปโตทรานซิสเตอร์เบอร์ TLP621
5. R₃ คือ ตัวต้านทานค่า 40 Ω 2W
6. R₅ คือ ตัวต้านทานค่า 120 Ω 2W
7. C₁ คือ ตัวเก็บประจุ 33 μF/200V
8. SCR₁ คือ เอสซีอาร์เบอร์ S6006LS3
9. D₁ คือ ไดโอดเบอร์ 1N6519
10. MI₂ คือ จุติรับสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์

3.4 การสร้างสวิตช์แรงสูง

จากการออกแบบวงจรจุดชนวน และขั้วอิเล็กโตรด ดังที่ได้กล่าวมาแล้วสามารถอธิบายการสร้างส่วนประกอบของสวิตช์แรงสูงดังนี้

3.4.1 การสร้างขั้วอิเล็กโตรด

การสร้างขั้วอิเล็กโตรด หรือ Spark Gap โดยใช้วัสดุที่ทำ คือ แท่งสเตนเลสทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.9 cm ยาว 4.5 cm ทำการกลึงให้โค้งมนในลักษณะครึ่งวงกลมที่ปลายด้านหนึ่งและ

อิเล็กโตรดแรงสูงจะเจาะรูตรงกลางขนาด 2 cm เพื่อใส่หัวเทียนจุดระเบิดไว้ในแท่งอิเล็กโตรด และเจาะรูที่ปลายเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 mm เพื่อให้หัวของหัวเทียนโผล่ออกมาได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 อิเล็กโตรดแรงสูงและอิเล็กโตรดจุดชนวน

ส่วนอิเล็กโตรดดินนั้นทำมาจากแท่งสเตนเลสทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.9 cm ยาว 4.5 cm ทำการกลึงให้โค้งมนในลักษณะครึ่งวงกลมด้านหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 อิเล็กโตรดดิน

จากนั้นนำขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองไปบรรจุลงในท่อ PVC ที่มีขนาดความยาว 17 cm มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาด 3.5 cm และเจาะช่องด้านข้างเพื่อสังเกตการเบรกดาวนที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรด ดังแสดงในรูปที่ 3.17

รูปที่ 3.17 โครงสร้างสวิตช์แรงสูง PVC



รูปที่ 3.18 ส่วนประกอบของสวิตช์แรงสูง

เมื่อนำอิเล็กโทรดที่สร้างขึ้นไปทดสอบด้วยแรงดัน 6 kV ระยะห่างของอิเล็กโทรดตั้งแต่ 0.5-3.0 mm โดย การทดสอบที่ระยะห่างหนึ่งค่าจะทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง เพื่อบันทึกจำนวนครั้งของ การเบรกดาวนผลลัพธ์ที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบการเบรกคาวนซ์ของอิเล็กทรอนิกส์

ระยะห่าง (mm)	จำนวนครั้งที่เบรกคาวนซ์
0.5	10
1.0	10
1.5	10
2.0	9
2.5	0
3.0	0

จากตารางที่ 3.4 ในการนำสวิตช์แรงดันสูงที่สร้างขึ้นไปใช้ควรตั้งระยะห่างให้เหมาะสม ตามแรงดันที่จะทำการทดสอบเพื่อให้เกิดการเบรกคาวนซ์ด้วยการจุดชนวน ไม่เกิดจากการเบรกคาวนซ์เองของสวิตช์ที่ตั้งระยะไม่เหมาะสมเช่นที่แรงดัน 6 kV ควรตั้งให้ระยะห่างของอิเล็กทรอนิกส์มากกว่า 2 mm แต่ไม่ควรเกิน 3 mm เพราะถ้าตั้งระยะห่างของอิเล็กทรอนิกส์มากกว่า 3 mm. เมื่อทำการจุดชนวนจะไม่เกิดการเบรกคาวนซ์

3.5 การสร้างวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ 6 kV รูปคลื่น 1.2/50 μ s

จากการออกแบบในข้อที่ 3.1 ทั้งการคำนวณจากทฤษฎี และการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้ได้ทราบค่าองค์ประกอบของวงจรโดยมีอุปกรณ์บางตัวจะต้องทำการสร้างขึ้นมาเอง ได้แก่ ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ ซึ่งมีวิธีการดังนี้

3.5.1 การสร้างตัวต้านทานปรับรูปคลื่น R_c และ R_d

การสร้างตัวต้านทานปรับรูปคลื่นในวงจรใช้ลวด NiCr ในการสร้างตัวต้านทาน R_c และตัวต้านทาน R_d ในการพันลวด NiCr ได้คำนึงถึงค่าความเหนี่ยวนำที่จะเกิดขึ้นจากการพันด้วย เพื่อลดค่าความเหนี่ยวนำที่จะเกิดขึ้นจากการพันลวดความต้านทานจึงพันลวดความต้านทานแบบไปกลับโดยให้ความยาวและจำนวนรอบของลวดเท่ากัน เมื่อพันเสร็จแล้วนำมาวัดค่าพบยังมีค่าความเหนี่ยวนำอยู่บ้าง แต่ค่าน้อยมาก จึงนำไปต่อในวงจร

3.5.2 การสร้างตัวเก็บประจุ C_s และ C_b

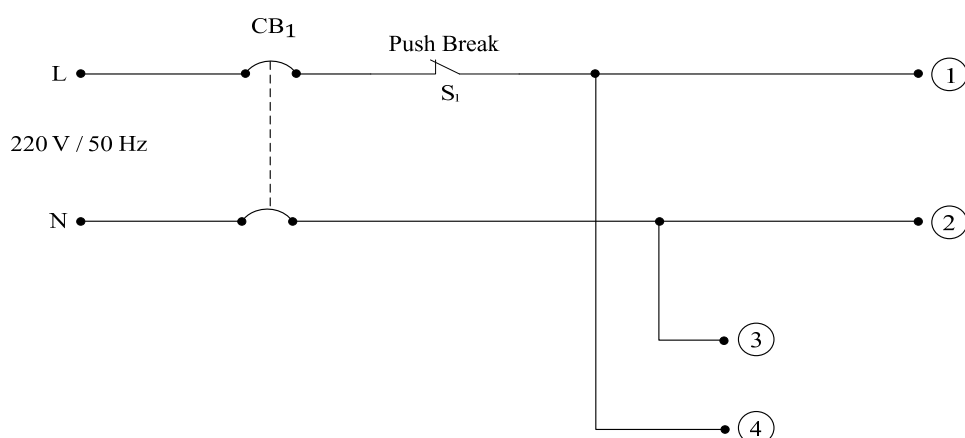
ตัวเก็บประจุ C_s ต้องมีค่ามากและทนแรงดันได้สูงกว่า 6 kV เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับวงจรสร้างรูปคลื่น เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่หาซื้อยากและราคาสูง จากการออกแบบจึงกำหนด ค่าของ $C_s = 4 \mu\text{F}$ เนื่องจากตัวเก็บประจุทนแรงดันสูงที่มีขายมีขนาด $8 \mu\text{F}$ 4000 V ดังนั้นจึงเลือกใช้ ตัวเก็บประจุขนาด $8 \mu\text{F}$ 4000 V จำนวน 2 ตัว เมื่อนำมาต่ออนุกรมกันเพื่อให้สามารถทนแรงดันสูงสุดที่ 8000 V และทำให้ค่าความจุเท่ากับ $4 \mu\text{F}$

ในการสร้างตัวเก็บประจุ C_b ที่มีค่า 10 nF เป็นค่าที่มีค่าน้อยเพื่อให้วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ มีประสิทธิภาพสูง การสร้างตัวเก็บประจุ C_b ทำได้โดยนำตัวเก็บประจุค่าความจุ 4.7 nF ทนแรงดัน 2000 V มาต่ออนุกรมกันจำนวน 4 ตัวจำนวน 2 ชุด จากนั้นนำตัวเก็บประจุทั้ง 2 ชุดมาต่อขนานกัน ทำให้ได้ค่าความจุรวม 9.4 nF ทนแรงดัน 8000 V

ตารางที่ 3.5 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 kV รูปคลื่น 1.2/50 μs

อุปกรณ์	ค่าจากการออกแบบ	ค่าที่ใช้งานจริง
C_s	$4 \mu\text{F}$	$4 \mu\text{F}$
C_b	9.4 nF	9.4 nF
R_c	43Ω	43Ω
R_d	17Ω	17Ω

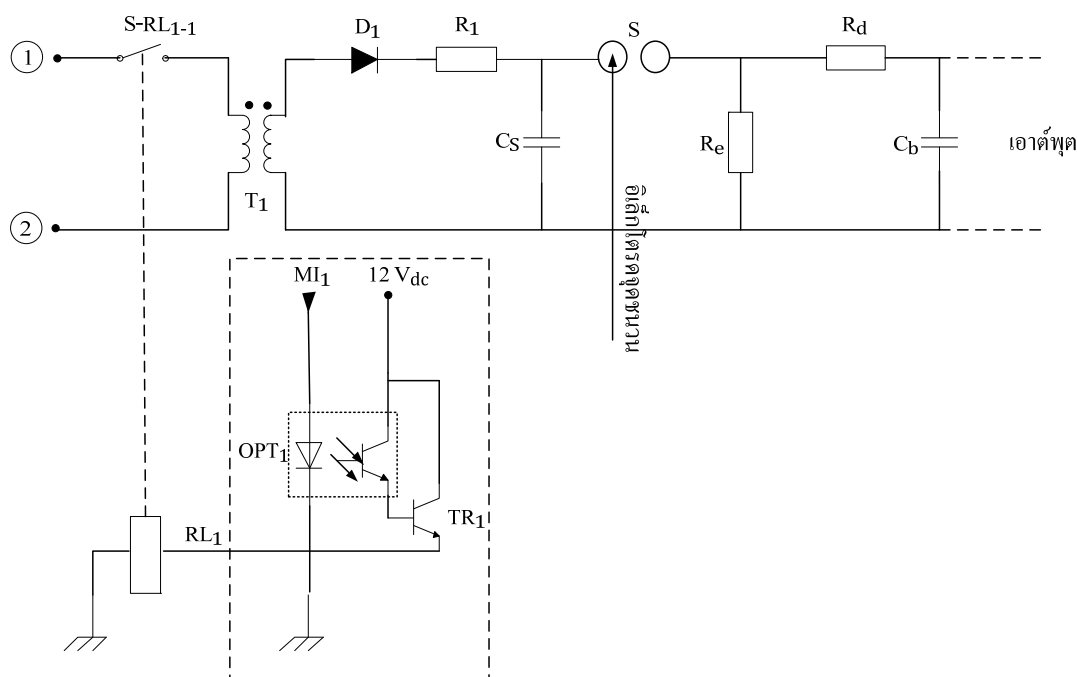
จากการที่ได้ทำการสร้างส่วนประกอบต่างๆ เสร็จแล้ว ก็นำมาต่อร่วมกันและทำการทดสอบเพื่อหาจุดบกพร่องและทำการแก้ไขจนได้ค่าตามที่กำหนด จึงนำเข้ามาประกอบในตัวเครื่อง ซึ่งประกอบด้วยวงจรดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.19 วงจรจ่ายไฟฟ้า 220 V

จากรูปที่ 3.19 ส่วนประกอบภายในวงจรประกอบด้วย

1. CB_1 คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 10 A
2. Push Break Switch คือ สวิตช์ถูกเน้นชนิดกดแล้วค้างสถานะ
3. ตำแหน่ง 1 , 2 คือ แรงดันที่จ่ายให้วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์
4. ตำแหน่ง 3 , 4 คือ แรงดันที่จ่ายให้วงจรเรีกูเลเตอร์ 12 V และวงจรจุดชนวน

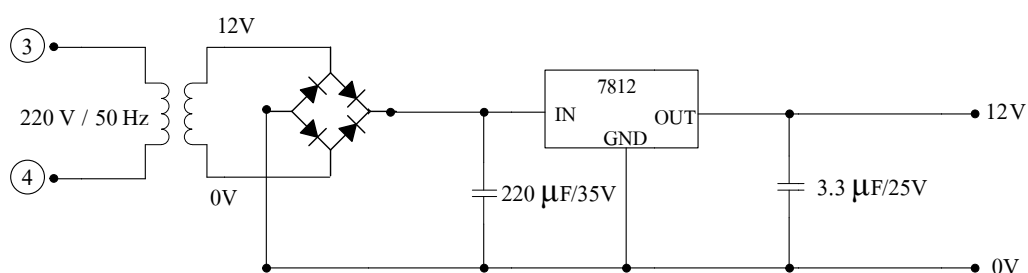


รูปที่ 3.20 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ส่วนประกอบของอุปกรณ์ในวงจรรูปที่ 3.20 มีดังนี้

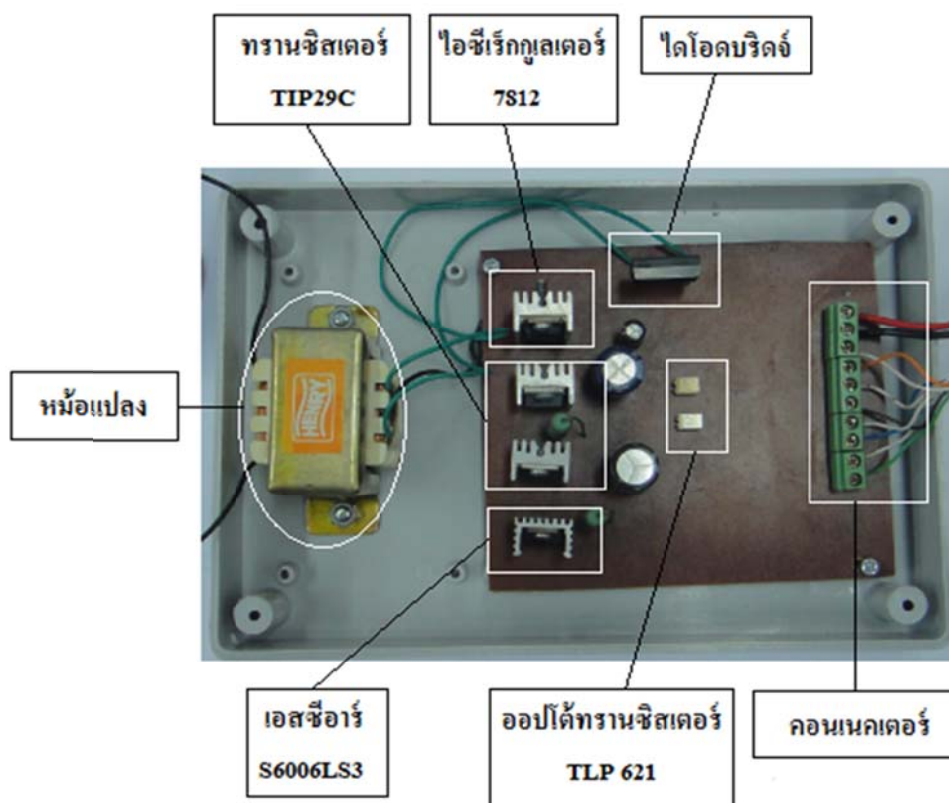
1. ตำแหน่ง 1, 2 คือ จู๊ดรับแรงดัน 220 V
2. $S-RL_{1-2}$ คือ หน้าสัมผัสของรีเลย์ RL_1 แบบปกติเปิด (NO ; Normal Open)
3. MI_2 คือ จู๊ดรับสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์
4. TR_1 คือ ทรานซิสเตอร์เบอร์ TIP29C
5. OPT_1 คือ ออปโตทรานซิสเตอร์เบอร์ TLP621
6. T_1 คือ หม้อแปลงไฟฟ้า 220 V/4260V
7. D_1 คือ ไดโอดเบอร์ 1N6519
8. R_1 คือ ตัวต้านทาน 85 k Ω
9. C_s คือ ตัวเก็บประจุ 4 μF 8000V
10. S คือ สปาร์กแก๊ป

11. R_E คือ ตัวต้านทาน 17 Ω
12. R_d คือ ตัวต้านทาน 43 Ω
13. C_b คือ ตัวเก็บประจุ 9.4 nF 8000V
14. RL_1 คือ รีเลย์ 12 V หน้าสัมผัสแบบ DPDT



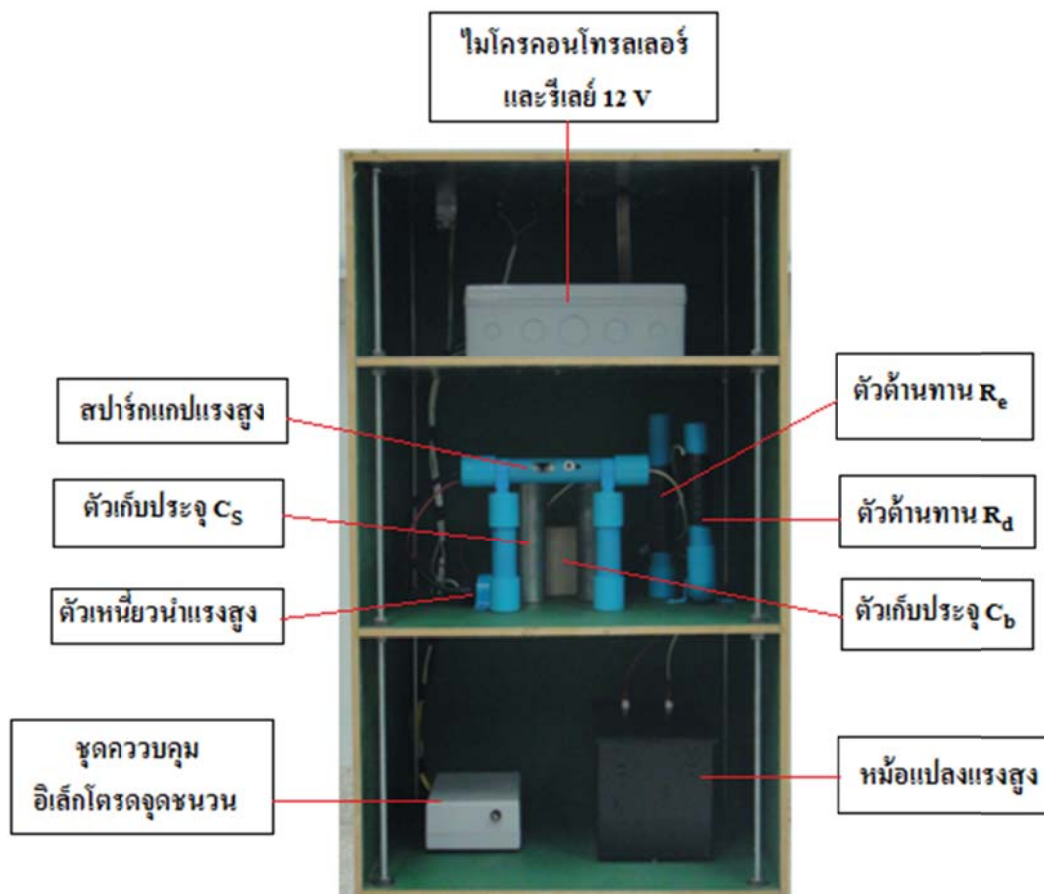
รูปที่ 3.21 วงจรรักษาแรงดันคงที่ 12 V

การประกอบวงจรได้นำวงจรในรูปที่ 3.14 วงจรรูปที่ 3.21 เฉพาะวงจรและอุปกรณ์ส่วนที่อยู่ในกรอบสี่เหลี่ยม และวงจรในรูปที่ 3.22 มาประกอบลงแผ่น PCB แผ่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 วงจรจุดควบคุมการทำงานและวงจรจุดชนวน

ดังที่ได้อธิบายแล้ว เมื่อนำวงจรส่วนต่าง ๆ มาประกอบเข้าด้วยกันเป็นเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 kV รูปคลื่น 1.2/50 μ s ดังแสดงในรูปที่ 3.23 วงจรการควบคุมของเครื่องและหลักการทำงานของเครื่อง อธิบายในภาคผนวก



รูปที่ 3.23 ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 kV รูปคลื่น 1.2/50 μ s