บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้าง

การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ในโครงการนี้ จะใช้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ของต่างประเทศ สำหรับองค์ประกอบอื่นๆ จะออกแบบสร้างขึ้นเองทั้งหมด ได้แก่ องค์ประกอบความต้านทานที่มีความเหนี่ยวนำ สปาร์กแกปทรงกลม การฉนวนยึดและรองรับ โดยใช้วัสดุที่เป็นผลิตภัณฑ์ภายในประเทศให้มากที่สุด การออกแบบลักษณะโครงสร้างจะอาศัยรูปแบบผลิตภัณฑ์ของต่างประเทศมาดัดแปลงให้ง่ายต่อการประกอบสร้างและใช้งาน สำหรับด้านคุณภาพและสมรรถนะจะใช้เกณฑ์มาตรฐานเป็นเงื่อนไขในการออกแบบและประเมินผล

3.1 เงื่อนไขการออกแบบสร้างและค่าที่กำหนด

เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการออกแบบสร้างจะมีเงื่อนไขการออกแบบสร้าง และค่าที่กำหนดดังนี้

1) ใช้สร้างรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน 8/20 μs และ 4/10 μs

2) ขนาดกระแสสูงสุดที่กำหนด 75 kA ทั้งขั้วบวกและลบ

3) ใช้ตัวเก็บประจุที่มีอยู่แล้วขนาด 2 μF 50 kV จำนวน 12 ตัว เป็นตัวเก็บประจุอิมพัลส์เพื่อเก็บพลังงาน

4) พลังงานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์หาได้จากตัวเก็บประจุ ที่แต่ละตัวมีแรงดันพิกัด 50 kV นำมาต่อขนานกัน 12 ตัวได้ค่าความจุรวม C_S เท่ากับ 24 μF และได้พลังงาน

$$W = (C_S V^2) / 2 \qquad (3.1)$$

$$= [(12 \times 2 \times 10^{-6}) \times (50 \times 10^{3})^2] / 2 = 30 \text{ kJ}$$

5) การออกแบบสร้างองค์ประกอบความต้านทานที่มีความเหนี่ยวนำจะออกแบบสร้างเป็นความต้านทานชนิดพัน โดยใช้ลวดความต้านทาน NiCr พันบนกระบอกพีวีซี สำหรับบาร์ทองแดงเชื่อมต่อองค์ประกอบต่างๆ จะใช้ทองแดงแผ่นมาพับ ซึ่งมีเงื่อนไขสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือ การถ่ายเทความร้อนดังสมการ [4]

$$W = m.c.\ \Delta t \qquad (3.2)$$

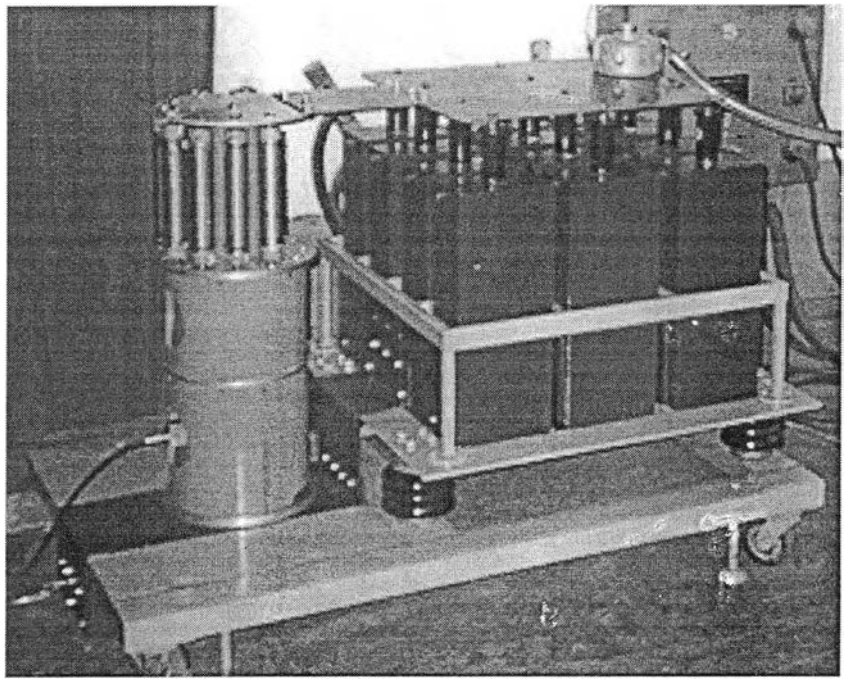
เมื่อ m = มวลของวัสดุ

c = ความจุความร้อนจำเพาะ

Δt = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

3.2 การออกแบบโครงสร้าง

การออกแบบโครงสร้างจะอาศัยรูปแบบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ของบริษัท HAEFELY เป็นต้นแบบในการสร้าง โดยจัดวางตัวเก็บประจุอิมพัลส์แบบตัวถังเหล็กวางอยู่ในแนวตั้ง เชื่อมต่อขั้วแรงสูงของตัวเก็บประจุด้วยแผ่นทองแดงขนาด 66 cm x 71 cm หนา 5 mm ดังรูปที่ 3.1 เพื่อให้ความเหนี่ยวนำในวงจรมีค่าต่ำลง และการเชื่อมต่อมีความแข็งแรง รวมทั้งสะดวกในการปรับเปลี่ยนค่าองค์ประกอบความต้านทานและความเหนี่ยวนำที่ใช้ปรับรูปคลื่น การจัดวางตัวเก็บประจุอิมพัลส์จะติดตั้งบนแผ่นเหล็กหนา 5 mm เพิ่มระดับความสูงด้วยลูกถ้วยพอร์ซเลน และติดตั้งอย่างมั่นคงภายในโครงเหล็ก



รูปที่ 3.1 การติดตั้งตัวเก็บประจุอิมพัลส์

3.3 การออกแบบการฉนวน

เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นจะติดตั้งอยู่ในสภาวะบรรยากาศภายในห้อง หรือนอกห้องซึ่งมีอากาศเป็นฉนวนที่สำคัญ ส่วนฉนวนแข็งภายนอกเป็นเพียงตัวยึดหรือรับแรงกลเท่านั้น ดังนั้นมิติภายนอก ความสูง ความกว้าง ของการฉนวนจะกำหนดด้วยความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของอากาศซึ่งจะสัมพันธ์กับพื้นผิวฉนวนแข็ง ลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวฉนวนแข็งกล่าวคือจะต้องมีผิวเรียบสม่ำเสมอ ไม่เก็บสะสมฝุ่นละออง หรือสิ่งสกปรกได้ง่าย ไม่ดูดซึมความชื้น ทนความร้อนได้พอสมควร ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับฉนวนเหลวหรือก๊าซอื่นๆ มีความแข็งแรงทางกลเพียงพอสามารถกลึงประกอบเข้ารูป ตกแต่งได้ ฉนวนแข็งที่มีคุณสมบัติดังกล่าวและเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ในประเทศ ราคาประหยัด หาซื้อได้ง่าย ในปัจจุบันฉนวนที่เหมาะสม ได้แก่

ท่อฉนวนพีวีซี จากข้อมูลที่เคยใช้ท่อพีวีซีเป็นฉนวน [6] พบว่าท่อพีวีซีไม่ดูดความชื้น อุณหภูมิใช้งานปกติ 60°C มีความต้านทานจำเพาะสูงถึง $10^{13} - 10^{16}$ Ω-cm จากผลการทดลองภายในห้องปฏิบัติการ พบว่าฉนวนพีวีซีมีความคงทนตามผิวฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ได้ประมาณ 6.6 kV/cm

3.4 การคำนวณหาค่าองค์ประกอบวงจร

การออกแบบวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ โดยปกติแล้วจะกำหนดข้อมูลของกระแสอิมพัลส์เบื้องต้นมาให้ได้แก่ เวลาหน้าคลื่น (T_f) เวลาหลังคลื่น (T_t) และ ขนาดกระแสอิมพัลส์ (i_m) ที่ใช้บอกถึงตัวแปรเชิงเทคนิค จากนั้นจึงนำข้อมูลเบื้องต้นนี้มาใช้คำนวณหาค่าองค์ประกอบอื่นๆ ที่จำเป็นในวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ โดยใช้ตัวแปรเชิงวิเคราะห์ กราฟรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองค์ประกอบต่างๆ ในรูปของค่านอมัลไลซ์ระหว่างตัวแปรเชิงเทคนิคกับตัวแปรเชิงวิเคราะห์ ที่มีความสัมพันธ์กับค่าองค์ประกอบวงจร (R , L และ C) ดังนี้

1) ค่านอมัลไลซ์ความหน่วง, R_r

$$R_r = R / R_{ap} \tag{3.3}$$

2) ค่านอมัลไลซ์เวลา, t_n

$$t_n = t / T \tag{3.4}$$

3) ประสิทธิภาพ , η

$$\eta = i_m / I_m \tag{3.5}$$

เมื่อ $R_{ap} = 2.Z = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$

$T = \sqrt{LC}$

$I_m = V / Z = V / \sqrt{\frac{L}{C}}$

การคำนวณหาค่าองค์ประกอบสำหรับสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ขนาด 75 kA เริ่มจากการตรวจสอบค่ายอดกระแสขั้วตรงข้ามสัมพัทธ์ (i_{lr}) โดยมาตรฐานกำหนดไว้ไม่เกิน 20% ดังนั้นจะได้ค่ายอดกระแสขั้วตรงข้ามที่ยอมรับได้สูงสุด = 0.2 x 75 = 15 kA แม้ว่าการกำหนดค่ายอดกระแสขั้วตรงข้ามยิ่งน้อยยิ่งดี แต่หมายความว่าค่านอมัลไลซ์ความหน่วง R_r ก็ต้องมีค่าสูงขึ้น ทำให้เวลาหน้าคลื่นและเวลาหลังคลื่นเปลี่ยนแปลงไปจากที่กำหนดไว้ก่อนหน้านี้ ดังนั้นต้องหาจุดที่เหมาะสมที่ไม่ให้ ค่ายอดกระแสขั้วตรงข้าม ค่าเวลาหน้าคลื่น และเวลาหลังคลื่น เกินจากค่าที่มาตรฐานกำหนด โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.4.1 การเลือกจุดเหมาะสม

ตัวแปรเชิงเทคนิค คือ T_t / T_f และ i_{ir} จากกราฟรูปที่ 2.5 กับ รูปที่ 2.6 จะได้ T_t / T_f = 2.7 และ i_{ir} < 20% ซึ่งจะได้ค่าทางเวลาของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่เลือกดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าทางเวลาของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่เลือก

ค่าทางเวลา	รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์	
	8/20 μs	4/10 μs
เวลาหน้าคลื่น T_f (μs)	7.4	3.7
เวลาหลังคลื่น T_t (μs)	20	10

ค่า T_t และ T_f ของทั้ง 2 รูปคลื่นเป็นค่าที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน จากการพิจารณากราฟรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6 ได้ค่านอมัลไลซ์ความหน่วง (R_r) ที่เหมาะสม 0.48 จากกราฟรูปที่ 2.5 ได้ค่ายอดกระแสขั้วตรงข้าม 17% และจากกราฟรูปที่ 2.6 ได้ค่านอมัลไลซ์เวลาหน้าคลื่น (T_{fn}) 0.92

3.4.2 การคำนวณหาค่าองค์ประกอบ

1) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs

$T = T_f / T_{fn} = 7.4/0.92 = 8.04$ μs

จาก $T = \sqrt{LC}$ และ $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$ ดังนั้น $Z = T/C$ จะได้

$Z = (8.04 \times 10^{-6}) / 24 \times 10^{-6} = 0.335\ \Omega$

$R = 2 R_r Z = 2 \times 0.48 \times 0.335 = 0.32\ \Omega$

แรงดันที่ใช้ในการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุที่ระดับกระแส 75 kA

$V = Z.i_m / \eta = (0.335 \times 75 \times 10^3) / 0.55 = 45.7$ kV

และค่าความเหนี่ยวนำ $L = T^2/C = (8.04 \times 10^{-6})^2 / 24 \times 10^{-6} = 2.69 \times 10^{-6} = 2.69$ μH

2) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μs

$T = T_f/T_{fn} = 3.7/0.92 = 4.02$ μs

จาก $T = \sqrt{LC}$ และ $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$ ดังนั้น $Z = T/C$ จะได้

$Z = (4.02 \times 10^{-6}) / 24 \times 10^{-6} = 0.167\ \Omega$

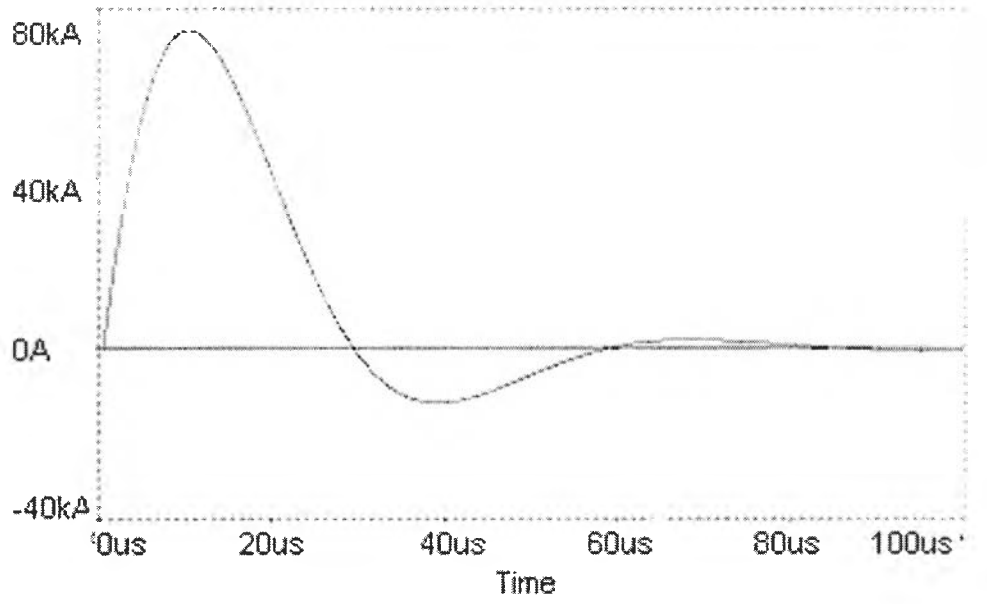
$R = 2 R_r Z = 2 \times 0.48 \times 0.167 = 0.16\ \Omega$

แรงดันที่ใช้ในการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุที่ระดับกระแส 75 kA

$V = Z.i_m/\eta = (0.167 \times 75 \times 10^3)/0.55 = 22.7$ kV

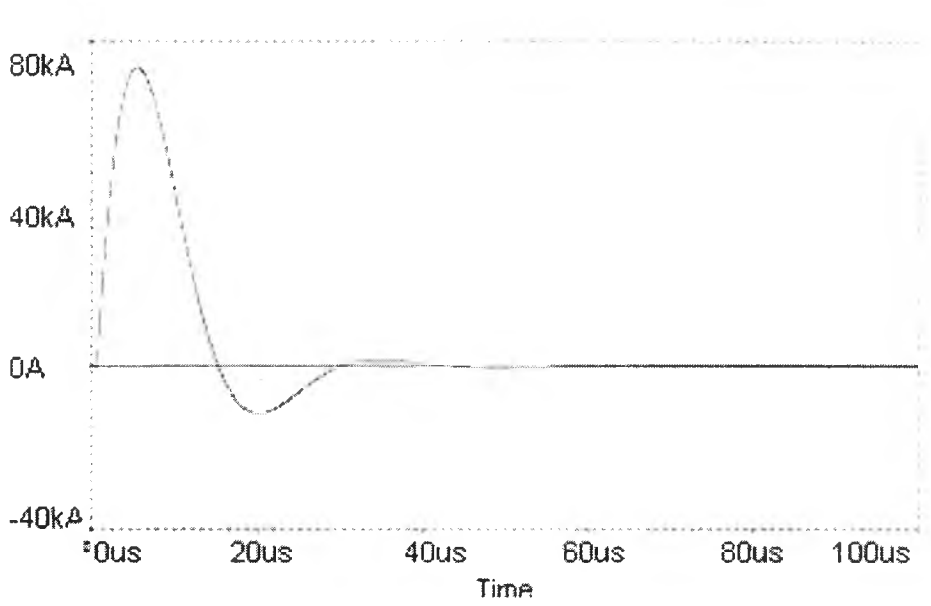
และค่าความเหนี่ยวนำ $L = T^2/C = (4.02*10^{-6})^2/24*10^{-6} = 0.67*10^{-6} = 0.67$ μH

จากค่าส่วนประกอบต่างๆ สำหรับวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ที่คำนวณได้ เมื่อนำมาคำนวณโดยใช้ PSPICE [7] เพื่อตรวจสอบความถูกต้องเบื้องต้นก่อนนำไปประกอบสร้างจริง แสดงดังรูปที่ 3.2 รูปคลื่น 8/20 μs และ รูปที่ 3.3 รูปคลื่น 4/10 μs ซึ่งจากการจำลองพบว่ารูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ทั้งสองรูปคลื่นมีลักษณะสมบัติอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ตามที่มาตรฐานกำหนด



ค่ายอด , $\hat{I}$	74.8 kA
เวลาหน้าคลื่น , T_f	7.4 μs
เวลาหลังคลื่น , T_t	19.8 μs
ค่ายอดกระแสขั้วตรงข้าม , $-\hat{I}$	-12.5 kA

รูปที่ 3.2 ผลการจำลองวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20 μs



ค่ายอด , $\hat{I}$	73.6 kA
เวลาหน้าคลื่น ,T_f	3.6 μs
เวลาหลังคลื่น ,T_t	9.8 μs
ค่ายอดกระแสขั้วตรงข้าม , $-\hat{I}$	-11.5 kA

รูปที่ 3.3 ผลการจำลองวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 4/10 μs

3.5 ตัวนำบาร์ทองแดงต่อวงจร

การออกแบบบาร์ทองแดง เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อส่วนต่างๆในเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ จะต้องคำนึงถึงผลของกระแสอิมพัลส์ซึ่งมีเงื่อนไขในการออกแบบคือ แรงทางกล และการระบายความร้อน

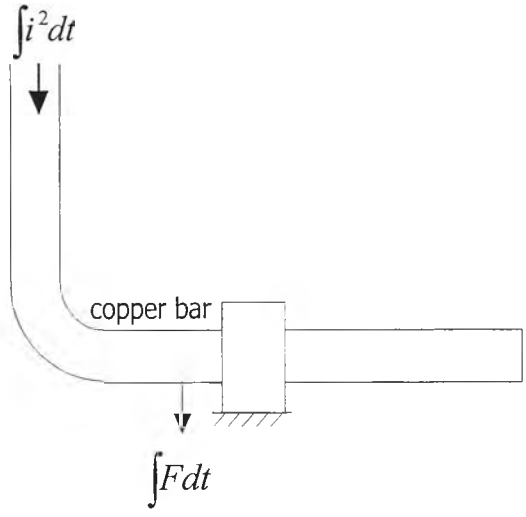
3.5.1 แรงทางกล

กระแสอิมพัลส์ทำให้เกิดแรงทางกล (Dynamic force) ซึ่งมีผลต่อการยึดติด ดังนั้นการออกแบบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ต้องคิดถึงกรณีที่มีกระแสอิมพัลส์ไหลผ่านตัวนำ แล้วทำให้เกิดแรงบิดขึ้นกับตัวนำ

กรณีกระแสอิมพัลส์ไหลลงตั้งฉากกับแท่งตัวนำ จะมีแรงอิมพัลส์ในแนวตรงต่อออกไปจากแนวของกระแสอิมพัลส์ดังรูปที่ 3.4 มีค่าเป็น [8]

$$\int F dt = 10^{-7} \int i^2 dt \quad \text{N.sec} \tag{3.6}$$

เมื่อ i^2dt เป็น A^2ses



รูปที่ 3.4 แรงทางกลจากกระแสฟ้าผ่า

จากการคำนวณโดยใช้ PSPICE [7] จำลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่สร้างขึ้น ทำให้สามารถหาค่าแรงทางกล ได้จากค่า $\int i^2 dt = 74 \times 10^3$ A^2ses เมื่อแทนค่าจะได้

$$\int F dt = 10^{-7} . \int i^2 dt = 10^{-7} \times 74 \times 10^3 = 74 \times 10^{-4} \quad \text{N.sec}$$

เมื่อแทนเวลาที่กระแสอิมพัลส์ลงสู่ศูนย์ t = 30 μs จะได้แรง F = 228 N หรือมวล m = 23.27 kg ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าว ดังนั้นการใช้น๊อตและสกรูเป็นตัวยึดก็จะให้ความแข็งแรงเพียงพอ

3.5.2. การระบายความร้อน

การระบายความร้อนจะคำนวณจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ตามเงื่อนไขการระบายความร้อนดังสมการที่ (3.2) โดยคิดพลังงานสูงสุดคือ 30 kJ โดยยอมให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นได้ (Δt) 50 °C จะได้

$$m = \frac{W}{c.\Delta t} = \frac{30 \text{ kJ}}{0.39 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.}^{\circ}\text{C}} \times 50\ ^{\circ}\text{C}} = 1.5 \text{ kg}$$

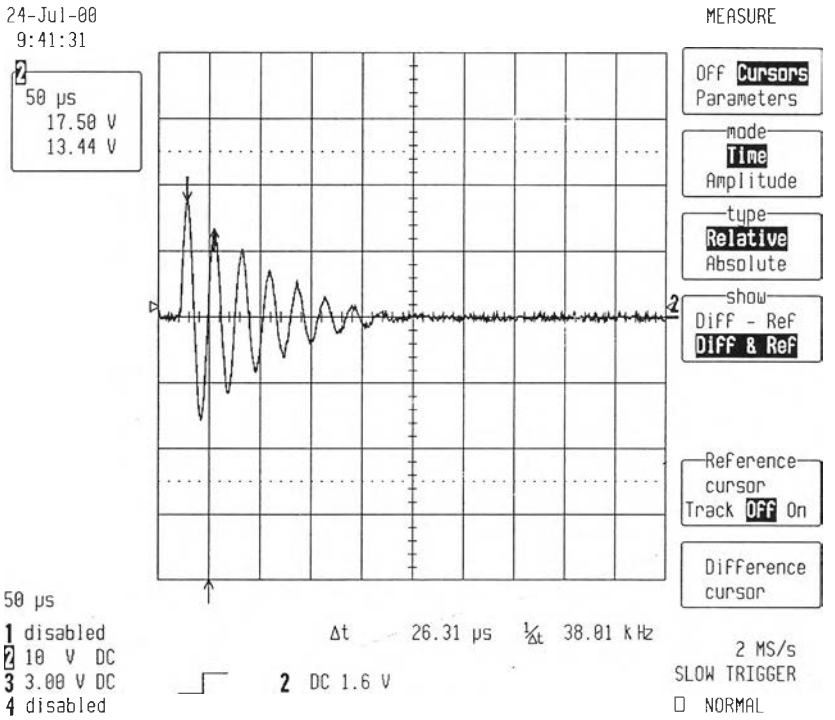
เนื่องจากทองแดงมีความหนาแน่น 8.96 g/cm^3 ดังนั้นต้องใช้ทองแดงปริมาตร 167 cm^3 จากส่วนที่รองรับกระแสสูงสุดความยาว 32 cm จะได้พื้นที่หน้าตัด

$A = 167 / 32 = 5.23$ cm^2

ดังนั้นขนาดพื้นที่หน้าตัดของบาร์ทองแดงจะมีขนาดอย่างน้อย 5.23 cm^2 ซึ่งในการออกแบบสร้างจริงจะเลือกใช้ทองแดงขนาด 0.45 x 24 cm^2

3.5.3. ค่าความเหนี่ยวนำของบาร์ทองแดง

ก่อนทำการออกแบบองค์ประกอบความต้านทานที่มีความเหนี่ยวนำ จำเป็นต้องหาค่าความเหนี่ยวนำของบาร์ทองแดง ที่ใช้เชื่อมต่อในวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ก่อน โดยการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุแล้วดีสชาร์จได้รูปคลื่นกระแสดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่สภาวะไม่ได้ต่อองค์ประกอบความต้านทาน

จากรูปที่ 3.5 สามารถหาค่า L ของบาร์ทองแดงที่ใช้เชื่อมต่อได้จากสมการ

$$f=\frac{1}{2\pi}\frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{หรือ} \quad L=\frac{1}{C.(2\pi f)^2} \tag{3.7}$$

แทนค่า C = 24 µF และ f = 38.01 kHz จะได้ค่าความเหนี่ยวนำของบาร์ทองแดง ที่ใช้เชื่อมต่อในวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ L = 0.73 µH

3.6 องค์ประกอบความต้านทาน

เนื่องจากในวงจรมีค่าความเหนี่ยวนำของบาร์ทองแดงอยู่แล้ว 0.73 µH ซึ่งเพียงพอสำหรับกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 4/10 µs ดังนั้นการออกแบบสร้างองค์ประกอบความต้านทาน ที่ใช้ปรับลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ จะแบ่งการออกแบบสร้างเป็น 2 กรณี คือ องค์ประกอบความต้านทานที่มีความเหนี่ยวนำสำหรับรูปคลื่น 8/20 µs และองค์ประกอบความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำสำหรับรูปคลื่น 4/10 µs

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.6.1 **ความต้านทานที่มีความเหนี่ยวนำสำหรับรูปคลื่น** 8/20 μs

การออกแบบสร้างองค์ประกอบความต้านทานที่มีความเหนี่ยวนำ จะทำโดยใช้ลวดความต้านทาน NiCr พันบนกระบอกพีวีซี เพราะในทางอุตสาหกรรมจะใช้ลวดชนิดนี้พันเป็นขดลวดความร้อนในเครื่องทำความร้อน เนื่องจากมีคุณสมบัติทนความร้อนได้ดี

การคำนวณอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะคิดกรณีพลังงานสูงสุด ที่เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์สามารถจ่ายได้คือ 30 kJ โดยยอมให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นได้ (Δt) 50 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่กระบอกพีวีซียังสามารถทนได้โดยปลอดภัย ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิที่สูงขึ้น เมื่อเกิดกระแสไหลผ่านความต้านทานดังสมการ (3.2) จะได้

$$m = \frac{W}{c.\Delta t} = \frac{30\ kJ}{0.46\frac{kJ}{kg.^{o}C}50.^{o}C} = 1.3\ kg$$

จากความต้านทานที่ต้องการ 0.32 Ω จะใช้ลวดความต้านทาน NiCr ที่มีความหนาแน่น 8.2 g/cm^3 ความต้านทานต่อเมตร 0.35 Ω/m ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm พื้นที่หน้าตัด 3.142 mm^2 จากมวลของลวด 1.3 kg จะได้ปริมาตร 158.5 cm^3 ความยาวลวด 50.5 m.

ขดลวดที่พันอยู่บนกระบอกพีวีซีมีคุณสมบัติการระบายความร้อนที่ไม่ดีนัก ดังนั้นก่อนการพันลวดจะใช้แผ่นไมลาหุ้มบนกระบอกพีวีซี เพื่อทำหน้าที่ระบายความร้อน เนื่องจากไมลามีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ระบายความร้อนได้ดีกว่ากระบอกพีวีซี หลังจากพันขดลวดความต้านทานเสร็จก็จะใช้แผ่นไมลาหุ้มอีกชั้นหนึ่ง เพื่อระบายความร้อนและป้องกันฝุ่นหรือสิ่งสกปรกที่จะเข้ามายังขดลวดและเอ็นแล้วทำให้เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบได้

จากผลการทดลองค่าวาบไฟตามผิวฉนวนพีวีซีในห้องปฏิบัติการ เมื่อคิดถึงแฟกเตอร์ความปลอดภัย [6] จะได้แรงดันอิมพัลส์ตามผิวฉนวนมีค่า 4 kV/cm หรือ 1 kV ต้องใช้ฉนวนยาวอย่างน้อย 0.25 cm หรือ 2.5 mm กรณีแรงดันอิมพัลส์ 50 kV จะได้ความยาวฉนวนอย่างต่ำ 12.5 cm ดังนั้นในการสร้างจะใช้กระบอกพีวีซีที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 cm ขนาดความยาว 31.5 cm

การพันขดลวดบนกระบอกพีวีซีจะใช้เอ็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm จำนวน 4 เส้นพันเรียงกันเป็นฉนวนแข็งคั่นระหว่างรอบของขดลวด พิจารณาจากการเบรกดาวน์ของฉนวนอากาศระหว่างรอบขดลวดเมื่อพันลวด 45 รอบจะได้แรงดันระหว่างรอบ = 50 / 45 = 1.11 kV ได้ระยะฉนวนอย่างต่ำ = 1.11 x 2.5 = 2.77 mm ดังนั้นการใช้เอ็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm จำนวน 4 เส้นคั่นระหว่างรอบเท่ากับ 4 mm ทำให้สามารถทนต่อการเบรกดาวน์ของฉนวนอากาศระหว่างรอบขดลวดได้

ค่าองค์ประกอบความต้านทานที่ใช้สร้างกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20 μs จะได้จากการใช้ลวดความต้านทานพันบนกระบอกพีวีซี จำนวน 8 กระบอกนำมาขนานกัน โดยแต่ละกระบอกมีรายละเอียดดังนี้

รัศมีกระบอกพีวีซี ,r = 2.4 cm

จำนวนรอบลวดความต้านทาน, N = 45 รอบ

ความยาวแกนการพันลวด, l = 27 cm

ความยาวลวดทั้งหมด = 6.8 m

ความต้านทาน = 2.4 Ω

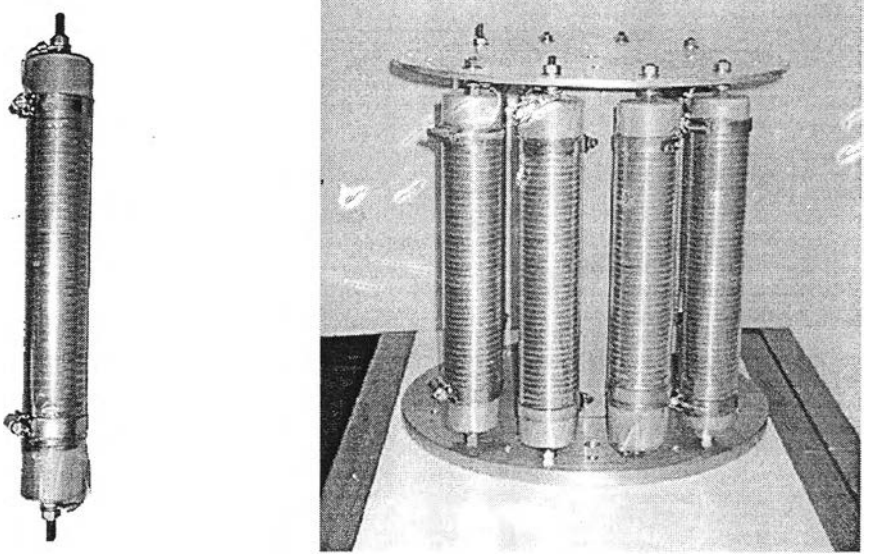
และความเหนี่ยวนำซึ่งประมาณได้จาก [9]

$$L = \frac{r^2N^2}{(23r + 25l)} \qquad (3.8)$$

$$= 16\ \mu H$$

เมื่อนำตัวความต้านทานทั้ง 8 กระบอกมาขนานกันจะได้ความต้านทานรวม 0.3 Ω และความเหนี่ยวนำ 2.0 μH

องค์ประกอบความต้านทานมีความเหนี่ยวนำที่สร้างเสร็จ แสดงดังรูปที่ 3.6 (a) และเมื่อนำมาประกอบเป็นชุดเพื่อสะดวกในการใช้งานดังรูปที่ 3.6 (b)

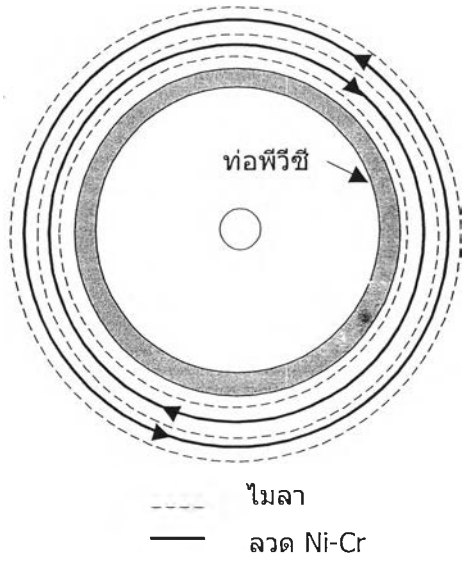


(a) (b)

รูปที่ 3.6 องค์ประกอบความต้านทาน 8/20 μs ที่สร้างขึ้น

3.6.2 ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำสำหรับรูปคลื่น 4/10 μs

กรณีรูปคลื่น 4/10 μs การออกแบบองค์ประกอบความต้านทานจะเป็นแบบไร้ความเหนี่ยวนำ เนื่องจากความเหนี่ยวนำในวงจรมีค่าเพียงพอแล้ว จึงสร้างโดยใช้ลวดความต้านทานพันแบบไร้ความเหนี่ยวนำบนกระบอกพีวีซีดังรูปที่ 3.7 [10]



รูปที่ 3.7 การพันลวดความต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำ

การระบายความร้อนจะคิดคำนวณได้เช่นเดียวกับการออกแบบความต้านทานสำหรับรูปคลื่น 8/20 μs โดยยอมให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นได้ (Δt) 90 °C เนื่องจากระยะเวลาของรูปคลื่น 4/10 μs สั้นกว่า จากสมการที่ (3.2) จะได้

$$m = \frac{W}{c.\Delta t} = \frac{30\,kJ}{0.46\frac{kJ}{kg.^{o}C}90^{o}C} = 0.72\ kg$$

จากความต้านทานที่ต้องการ 0.16 Ω จะใช้ลวดความต้านทานที่มีความต้านทานต่อเมตร 0.35 Ω/m ใช้เส้นลวด NiCr แบบแบนขนาดหน้าตัด 1 x 0.035 cm^2 ได้พื้นที่หน้าตัด 0.035 cm^2 ลวด NiCr มีความหนาแน่น 8.2 g/cm^3 จากมวลของลวด 0.72 kg จะได้ปริมาตร 87.8 cm^3 หรือความยาวลวดอย่างน้อย 25 m

การออกแบบสร้างทำนองเดียวกับการออกแบบสร้างความต้านทานสำหรับรูปคลื่น 8/20 μs คือใช้ลวดความต้านทานพันบนกระบอกพีวีซี แล้วนำมาขนานกัน 4 กระบอก โดยแต่ละกระบอกมีการพันแบบไร้ความเหนี่ยวนำซึ่งจะมีการพันลวดความต้านทานเป็น 2 ชั้น แต่ละชั้นพันในทิศทางสวนทางกัน แต่ละชั้นมีรายละเอียดดังนี้

รัศมีกระบอกพีวีซี, r = 3.0 cm

จำนวนรอบลวดความต้านทาน, N = 18 รอบ

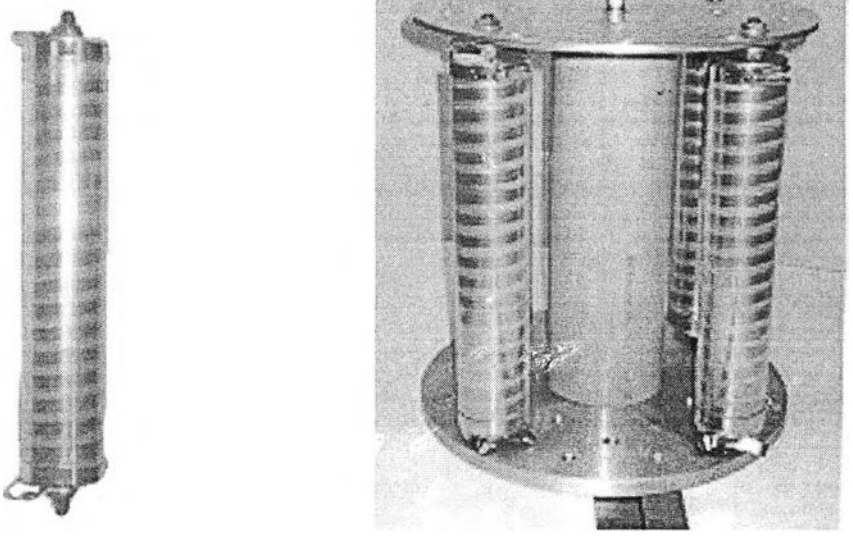
ความยาวแกนการพันลวด, l = 31 cm

ความยาวลวดทั้งหมด = 3.68 m

ความต้านทานแต่ละชั้น = 1.28 Ω

จะได้ความต้านทานแต่ละกระบอก (2 ชั้น) = 0.64 Ω

ดังนั้นเมื่อนำตัวความต้านทานทั้ง 4 กระบอกมาขนานกันจะได้ความต้านทาน 0.16 Ω องค์ประกอบความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำที่สร้างเสร็จแสดงดังรูปที่ 3.8 (a) และเมื่อนำมาประกอบเป็นชุดเพื่อสะดวกในการใช้งานดังรูปที่ 3.8 (b)



(a) (b)

รูปที่ 3.8 องค์ประกอบความต้านทาน 4/10 μs ที่สร้างขึ้น

3.7 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

ค่าความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ R_L ขึ้นอยู่กับค่าพิกัดกระแสของตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง I_0 ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s และอัตราการเพิ่มแรงดัน $\Delta U_0/\Delta t$

ตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงที่ใช้มีค่ากระแสจำกัด I_0 = 20 mA ดังนั้นอัตราการเพิ่มแรงดันอัดประจุสูงสุดจึงหาได้จากความสัมพันธ์

$$i = C_s \cdot \Delta U_0/\Delta t \qquad (3.9)$$

$$\Delta U_0/\Delta t = I_0/C_s$$

ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C_s = 24 μF ดังนั้นอัตราการเพิ่มแรงดันสูงสุดที่ตัวจ่ายสามารถทำได้

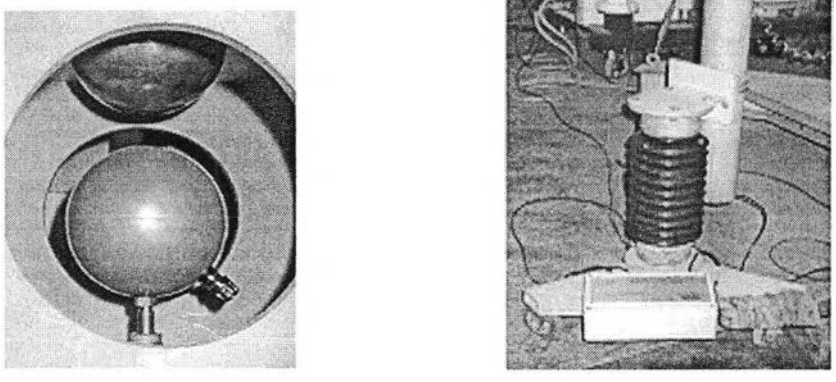
$$\Delta U_0/\Delta t = 20 \times 10^{-3} / 24 \times 10^{-6}$$
$$= 0.833 \text{ kV/s}$$

เมื่อต้องการอัดประจุสูงสุดที่ 50 kV จะต้องกำหนดเงื่อนไขการดีสชาร์จไม่เกิน 1 ครั้งต่อนาที ที่กระแสจำกัดสูงสุด I_0 = 20 mA จะได้ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุอย่างต่ำเท่ากับ $833 / 20 \times 10^{-3} = 42 \text{ k}\Omega$

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ R_L เป็นความต้านทานน้ำ เนื่องจากมีความยืดหยุ่น สร้างง่าย และราคาถูก โดยมีค่าความต้านทาน 190 kΩ

3.8 สปาร์กแกปและไกสวิตช์

สปาร์กแกปเป็นแกประหว่างทรงกลม ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดขนาดแรงดันอัดประจุ ถ้าต้องการเพิ่มหรือลดแรงดันอัดประจุก็จะทำได้โดยการเพิ่มหรือลดระยะแกป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่ใช้ขึ้นอยู่กับแรงดันอัดประจุ ในที่นี้แรงดันอัดประจุสูงสุดคือ 50 kV ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมจะเลือกใช้ที่ขนาด 10 cm ทำด้วยทองแดง โดยมีไกสวิตช์เพื่อทำให้เกิดสปาร์กที่แกปด้วยการส่งสัญญาณพัลส์เข้าไปดังรูปที่ 3.9 (a) ทำให้สามารถกำหนดการเกิดสปาร์กได้เมื่อต้องการ แรงดันพัลส์ที่ใช้เป็นสัญญาณเพื่อจุดสปาร์กแกปจะได้จากวงจรไกสวิตช์คาบเกี่ยวผ่านตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวขนาด 1000 pF ดังรูปที่ 3.9 (b) เนื่องจากทรงกลมที่ไกสวิตช์ติดตั้งมีแรงดันสูง

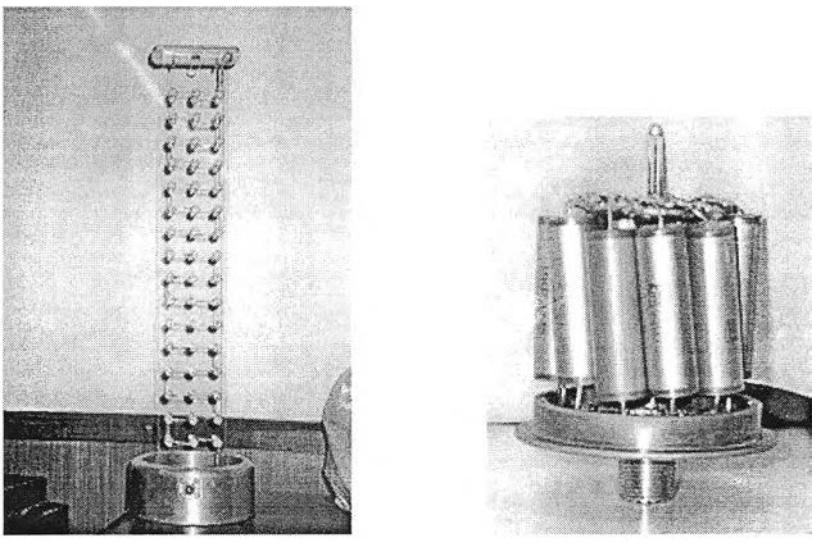


(a) (b)

รูปที่ 3.9 (a) สปาร์กแกป (b) ไกสวิตช์

3.9 อิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์

อิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงดันอิมพัลส์ ในขณะใช้เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นทดสอบกับดักเสิร์จ โดยออกแบบเป็นชนิดตัวเก็บประจุ ที่ตัวเก็บประจุ C_1 ต้องมากพอ จนทำให้ค่าความจุเสตรย์มีผลต่อการกระจายแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ไม่มากนัก ในการออกแบบนี้ผลของค่าความจุเสตรย์มีน้อย เนื่องจากเป็นการวัดที่แรงดันไม่สูงคือไม่เกิน 100 kV เพราะแรงดันพิกัดของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ถูกจำกัดด้วยตัวเก็บประจุที่มีพิกัดแรงดัน 50 kV ทำให้ความสูงของตัวดิไวเดอร์ไม่สูงมาก นอกจากนั้นค่าของ C_1 จะต้องไม่มากจนทำให้กลายเป็นโหลดของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ไม่ต้องการของระบบวัด ในการออกแบบสร้างจะใช้ตัวเก็บประจุย่อยๆ ตัวละ 0.02 μF 2 kV มาต่ออนุกรมกันจำนวน 48 ตัวทำให้ได้ค่าความจุ C_1 รวม 460 pF ที่ไม่มากและไม่น้อยเกินไป [6] นำตัวเก็บประจุที่ได้มายึดบนแผ่นอะคิลิกแล้วบรรจุในกระบอกพีวีซีดังรูปที่ 3.10 (a) ส่วนตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำที่เป็นตัวกำหนดขนาดแรงดันขาออก โดยทั่วไปค่าแรงดันต่ำต้องไม่ต่ำเกินไป เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก และการจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำจะต้องระวังไม่ให้เกิดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เกิดจากกระแสไหลผ่านองค์ประกอบภาคแรงต่ำ ซึ่งทำได้โดยจัดวางให้อยู่ในลักษณะแกนร่วม [6] ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำจะประกอบด้วยตัวเก็บประจุย่อยๆ ตัวละ 0.047 μF มาต่อขนานกันจำนวน 9 ตัวทำให้ได้ค่าความจุ C_2 รวม 425 nF แสดงดังรูปที่ 3.10 (b)



รูปที่ 3.10 (a) ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง C_1
(b) ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ C_2

เนื่องจากในวงจรวัดแรงดันอิมพัลส์ และตัวเก็บประจุภาคแรงสูงเองจะมีความเหนี่ยวนำ ซึ่งทำให้เกิดการแกว่งของผลตอบสนองแรงดันสูง การแก้ปัญหานี้ทำได้โดยต่อความต้านทานหน่วง R_d อนุกรมเข้ากับโวลเตจดิไวเดอร์ที่ค่า R_d ประมาณได้จาก [11]

$$R_d \approx 4\sqrt{L/C_e} \qquad (3.10)$$

เมื่อ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ

C_e คือ ค่าความจุไฟฟ้าเสตรย์

จากการแทนค่าจะได้ค่าความต้านทานหน่วง $R_d \approx 60\ \Omega$ โดยจะออกแบบสร้างเป็นความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ [10]

การปรับเทียบอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ เป็นการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด (Assigned scale factor) การทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity test) และการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน (Withstand voltage test) ตามมาตรฐาน IEC Publ. No. 60-2 [12] ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) การทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน (Withstand voltage test) จะทำที่ 110% ของแรงดันพิกัดเครื่องวัด ดังนั้นจะทำการทดสอบที่แรงดัน 55kV จำนวน 10 ครั้งทั้งขั้วบวกและลบ

2) การทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity test) จะทำการทดสอบที่แรงดัน 10 , 20 , 30 , 40 และ 50 kV ค่าละ10 ครั้งทั้งขั้วบวกและลบ

3) การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ (Determination of scale factor) จะทำการทดสอบที่แรงดัน 10 , 20 , 30 , 40 และ 50 kV ค่าละ10 ครั้งทั้งขั้วบวกและลบ

การทดสอบตามที่มาตรฐานกำหนดไว้จะทำการทดสอบ โดยอ่านค่าแรงดันจากอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์มาตรฐาน เปรียบเทียบกับแรงดันที่อ่านได้จากอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นทำการทดสอบไม่น้อยกว่า n ค่า ($n \geq 10$) โดยมีเงื่อนไขคือ

สเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด คำนวณจากค่าแรงดันที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิงหารด้วยแรงดันที่อ่านได้จากระบบวัดที่ต้องการทดสอบ ค่าที่ได้จะกำหนดให้เป็นค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ F_i การทดสอบทำถึง n ค่าแล้วหาค่าเฉลี่ย F_m ที่จะถือเป็นค่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ เมื่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s) คำนวณได้จาก

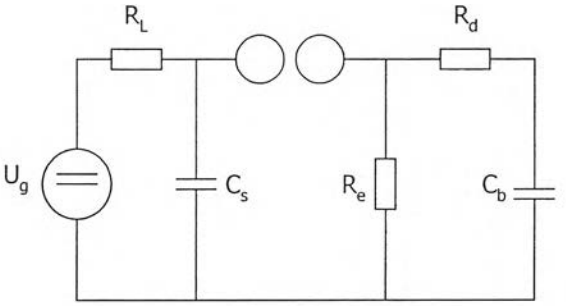
$$s = \sqrt{\frac{\sum (F_i - F_m)}{n-1}} \qquad (3.11)$$

และค่าพารามิเตอร์ทางเวลาอยู่ในเงื่อนไขดังนี้

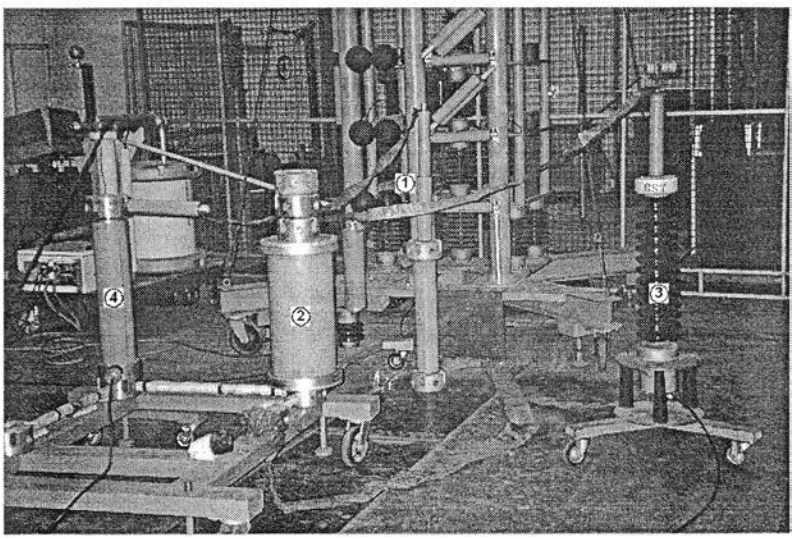
1) ค่าพารามิเตอร์ทางเวลาจะต้องมีค่าไม่เกิน $\pm$ 10 % ของค่าที่วัดได้จากระบบวัดอ้างอิง

2) อัตราส่วนของค่าที่วัดได้จากระบบวัดที่ต้องการทดสอบ กับระบบวัดอ้างอิงจะต้องมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s) น้อยกว่า 1 % ของค่าเฉลี่ย F_m

วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ที่ใช้ปรับเทียบอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์แสดงดังรูปที่ 3.11 (a) มีความต้านทาน R_e 115 โอหม์ ความต้านทาน R_d 20 โอหม์ และค่าตัวเก็บประจุของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (C_s) 0.6 μF จากการคำนวณเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุโหลด (C_b) ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้รูปคลื่น 1.2/50 μs พบว่าตัวเก็บประจุโหลด (C_b) ที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 25nF ซึ่งตัวเก็บประจุโหลด (C_b) มีค่ารวมกันทั้งจาก โวลเตจดิไวเดอร์มาตรฐาน (500pF) กับโวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้น (458pF) ได้เป็น 0.958nF จึงต้องเพิ่มตัวเก็บประจุโหลดเข้าในวงจรอีก 25nF การทดสอบปรับเทียบโวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นทำโดยใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ที่ใช้เพียง 1 ชั้นดังรูปที่ 3.11 (b)



(a)



① = เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

② = ตัวเก็บประจุโหลดเพิ่มเติม (C_b) 25 nF

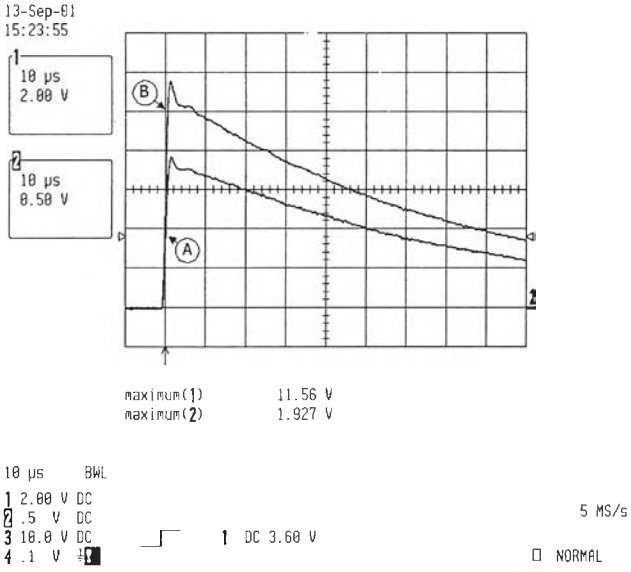
③ = โวลเตจดิไวเดอร์มาตรฐาน

④ = โวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้น

(b)

รูปที่ 3.11 วงจรทดสอบปรับเทียบโวลเตจดิไวเดอร์

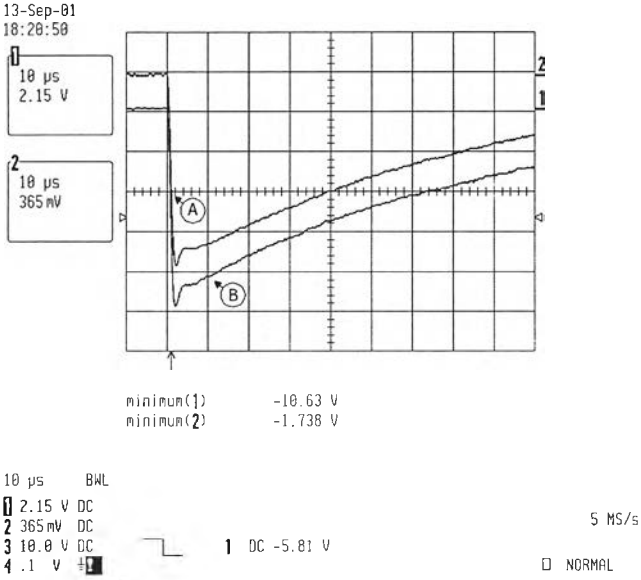
ผลการทดสอบปรับเทียบของโวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้น แสดงในตารางที่ 3.2 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทดสอบปรับเทียบระหว่าง โวลเตจดิไวเดอร์มาตรฐาน กับ โวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.12



A – โวลเตจดิไวเดอร์มาตรฐาน T_1 = 1.37 µs T_2 = 56 µs

B – โวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้น T_1 = 1.26 µs T_2 = 54 µs

(a) ขั้วบวก



A – โวลเตจดิไวเดอร์มาตรฐาน T_1 = 1.38 µs T_2 = 57 µs

B – โวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้น T_1 = 1.27 µs T_2 = 54 µs

(b) ขั้วลบ

รูปที่ 3.12 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ปรับเทียบ

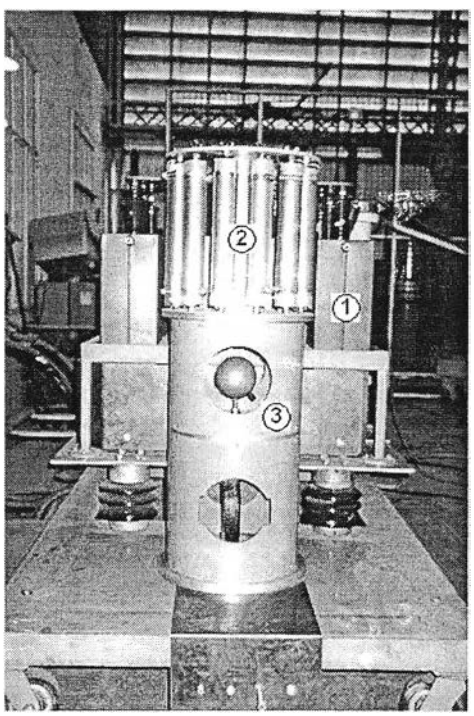
จากผลการทดสอบดังตารางที่ 3.2 พบว่าโวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นให้ผลการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด คือ สเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s) น้อยกว่า 1% ของค่าเฉลี่ย F_m และมีเวลาหน้าคลื่นกับเวลาหลังคลื่นแตกต่างจากระบบวัดอ้างอิงอยู่น้อยกว่า $\pm$10%

ตารางที่ 3.2 ผลทดสอบปรับเทียบโวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นกับโวลเตจดิไวเดอร์มาตรฐาน

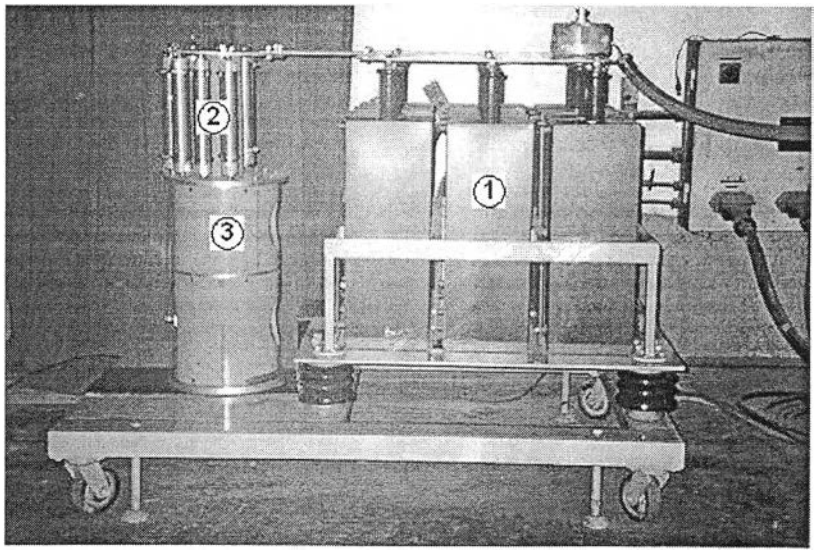
ขั้วแรงดัน	Scale factor,F_m	s (%)	ΔT_1 (%)	ΔT_2 (%)
บวก	950	0.26	-8.02	-3.57
ลบ	948	0.33	-7.97	-5.26

3.10 การประกอบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

หลังจากออกแบบและสร้างส่วนประกอบต่างๆ เสร็จแล้ว จึงนำมาประกอบสร้างบนฐานติดตั้งอุปกรณ์ โดยตัวฐานจะทำจากเหล็กรางน้ำ มีล้อเลื่อนเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้ายและเสาเหล็กปรับระดับเพื่อความสะดวกในการใช้งาน การต่อกันทางไฟฟ้าด้วยแผ่นทองแดงยึดด้วยน๊อตอย่างแน่นสนิท ดังรูปที่ 3.13 มีรายละเอียดดังนี้



(a) ด้านหน้า



(b) ด้านข้าง

รูปที่ 3.13 เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ที่สร้างขึ้น

① = ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงานขนาดตัวละ 2 μF 50 kV จำนวน 12 ตัว

② = ความต้านทานมีความเหนี่ยวนำสำหรับรูปคลื่น 8/20 μs
หรือ ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำสำหรับรูปคลื่น 4/10 μs

③ = สปาร์กแกป เป็นตัวกำหนดค่าแรงดันอัดประจุและทำหน้าที่เป็นไกสวิตช์