

### บทที่ 3

## การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

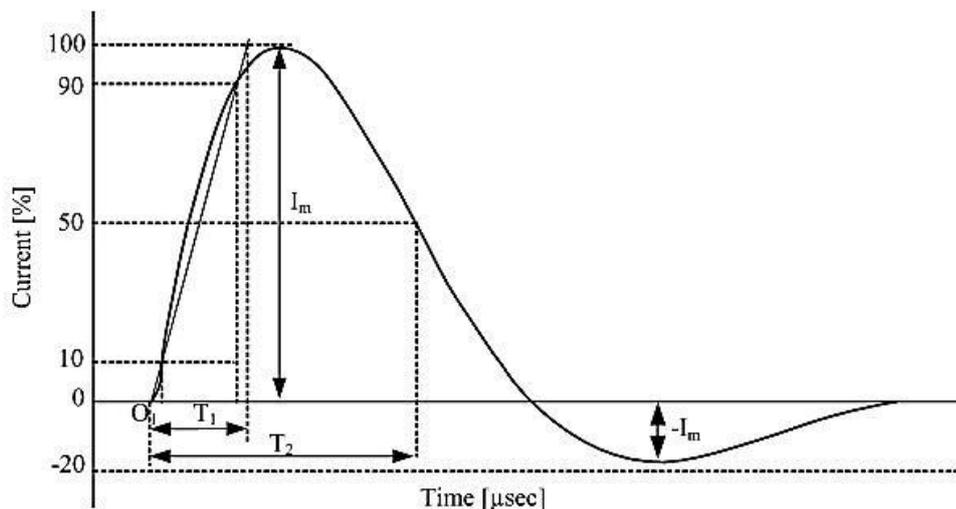
### 3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า

กระแสอิมพัลส์เป็นกระแสรานเซี่ยนต์จึงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเช่นปรากฏการณ์ฟ้าผ่าในธรรมชาติเป็นต้นในที่นี้จะกล่าวถึงกระแสรูปคลื่นฟ้าผ่าที่ใช้ในห้องปฏิบัติการซึ่งเป็นสิ่งที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อเลียนแบบธรรมชาติ เพื่อนำไปศึกษาวิจัยกับดักฟ้าผ่าและวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ทั้งทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง และด้านอีเอ็มซี

การวัดกระแสอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นโดยทั่วไปจะใช้วิธีการวัดด้วยชั้นท์ความต้านทานต่ำและวัดด้วยขดลวดตามหลักการของหม้อแปลงกระแส

### 3.2 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน

มาตรฐาน IEC 60060-1 ได้กำหนดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐานดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC60060 - 1

ลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ในรูปที่ 3.1 กำหนดไว้ดังนี้

1. เวลาหน้าคลื่น (Front Time,  $T_1$ ) คือเวลาที่กระแสเริ่มจากศูนย์จนถึงค่ายอดในเวลาในช่วงที่กระแสอิมพัลส์เพิ่มค่าจาก 10% ถึง 90% ของค่ายอด ซึ่งจุดเริ่มต้นของกระแสอิมพัลส์อยู่ที่จุด  $O_1$  (Virtual origin) คือจุดตัดแกนนอนกับเส้นตรงที่ลากผ่านจุด 10% และ 90% ของค่ายอดที่หน้าคลื่น

2. เวลาหางคลื่น (Tail Time,  $T_2$ ) เวลาหางคลื่นจะคำนวณจากจุดเริ่มต้นของกระแสอิมพัลส์จนถึงเมื่อกระแสลดค่าลงสู่ 50% ของค่ายอดครั้งแรก

3. ค่ายอดกระแสชั่วตรงข้าม (Peak Value of Opposite Polarity) การทดสอบกับดักฟ้าผ่ามาตรฐานจะกำหนดรูปคลื่นตามเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น  $T_1/T_2$  คือ 8/20  $\mu$ s และ 10/350  $\mu$ s โดยกำหนดเวลาความคลาดเคลื่อนไว้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

กระแสिमพัลส์นอกจากใช้ในการทดสอบกับดักฟ้าผ่าแล้วยังมีรูปคลื่นอื่นที่ใช้ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเสิร์จทางด้านแรงต่ำเกี่ยวกับอีเอ็มซี จะมีรูปคลื่น  $T_1/T_2$  คือ 30/80 $\mu$ s และ 1/20 $\mu$ s

**ตารางที่ 3.1** ค่าเวลาที่กำหนดและค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60060-1

	ลักษณะรูปคลื่น	ค่าที่กำหนดรูปคลื่นกระแส 8/20 $\mu$ s	ค่าที่กำหนดรูปคลื่นกระแส 10/350 $\mu$ s
1	เวลาหน้าคลื่น $T_1$ ( $\mu$ s)	8 $\mu$ s $\pm$ 10%	10 $\mu$ s $\pm$ 10%
2	เวลาหางคลื่น $T_2$ ( $\mu$ s)	20 $\mu$ s $\pm$ 10%	350 $\mu$ s $\pm$ 10%
3	ค้ายอด(%)	$\pm$ 10%	$\pm$ 10%
4	ค้ายอดกระแสชั่วตรงข้าม	ไม่เกิน 20% ของค้ายอด	ไม่เกิน 20% ของค้ายอด

เราสามารถหาค่า  $T_1$  และ  $T_2$  ได้จากสมการ

$$\delta = \frac{R}{2L}, \delta^2 < \frac{1}{LC} \text{damping criterion} \quad (3.1)$$

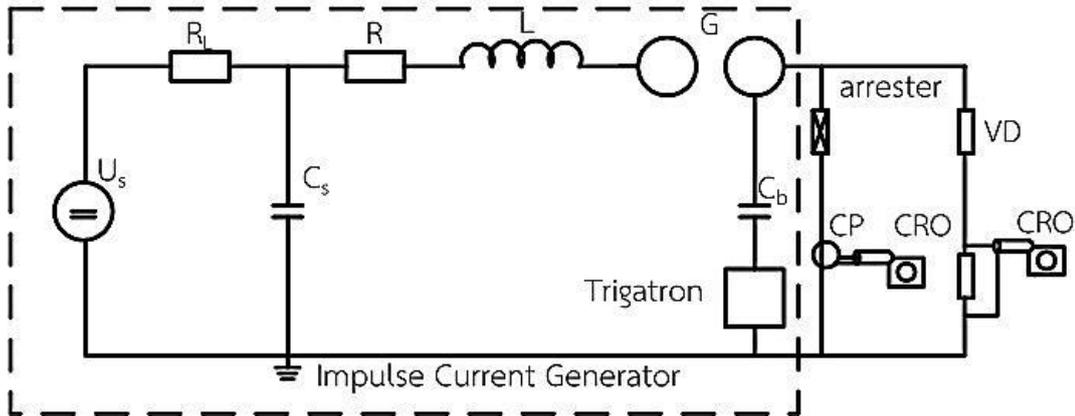
$$I(t) = \frac{U_0}{\omega L} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t) \quad (3.2)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2} \quad (3.3)$$

$$t_{\text{peak}} = \frac{1}{\omega} \cdot \arctan\left(\frac{\omega}{\delta}\right) \quad (3.4)$$

### 3.3 วงจรพื้นฐานเครื่องกำเนิดกระแสिमพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า

การสร้างกระแสिमพัลส์อาศัยหลักการของวงจรทรานเซียนต์ คล้ายกับการสร้างแรงดันอิมพัลส์คือเก็บประจุไฟฟ้าด้วยการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_s$  แล้วให้คายประจุผ่านตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทาน ซึ่งจะทำให้เกิดการออสซิลเลตแบบหน่วง ดังนั้นวงจรของเครื่องกำเนิดกระแสिमพัลส์พื้นฐานจึงเขียนได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์พื้นฐาน

การออสซิลเลตของวงจรในรูปที่ 3.2 จะเกิดหน่วงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน  $R$  ในวงจรและค่าความเหนี่ยวนำรวม  $L$  ในวงจรค่ากระแสสูงสุดจะได้เมื่อค่า  $R$  มีค่าต่ำสุดคือ

$$R \ll 2 \left( \frac{L}{C} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

ถ้าตัวเก็บประจุมีแรงดันอัดประจุ  $U_0$  กระแสดีสชาร์จคายอดจะคำนวณได้คือ

$$I \approx \frac{U_0}{\left( \frac{L}{C} \right)^{\frac{1}{2}}} \approx \left( \frac{2W_e}{L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

และอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสคือ  $t=0$

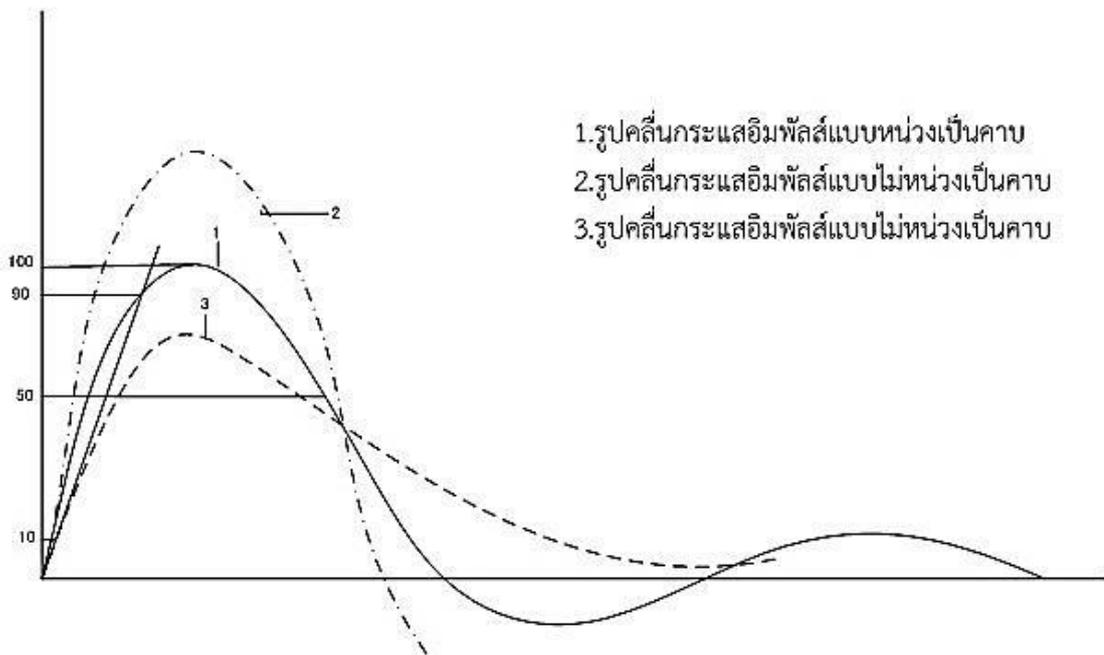
$$\left( \frac{di}{dt} \right)_{\max} \approx \frac{U_0}{L} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $W_e$  คือพลังงานอัดประจุเท่ากับ  $\frac{1}{2} C U_0^2$

พลังงานที่ตัว  $R$  และ  $L$  ต้องทนได้มากกว่าพลังงานในการอัดประจุ  $W_e$  ซึ่งเราสามารถหาพลังงานที่ตัว  $R$  และ  $L$  ทนได้จากสมการ

$$w = mc\Delta T \quad (3.8)$$

เนื่องจากสาเหตุที่มาตรฐานกำหนดให้รูปคลื่นออสซิลเลตเป็นแบบหน่วง ซึ่งมีช่วงตรงข้ามของออสซิลเลชันไม่เกิน 20% ของค่ายอดจึงต้องทำการปรับค่า  $R$  และ  $L$  ให้พอเหมาะดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 คลื่นกระแสอิมพัลส์

3.4 การคำนวณค่าองค์ประกอบวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

องค์ประกอบวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ดังรูปที่ 3.2 จะประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุ  $C_s$  สำหรับเก็บพลังงานไฟฟ้า กำหนดด้วยค่ากระแสที่ต้องการสร้าง ความเหนี่ยวนำ  $L$  ที่จะทำให้เกิดออสซิลเลชัน และความต้านทาน  $R$  ที่จะทำให้เกิดการหน่วงของออสซิลเลชัน เมื่อสปาร์กแกปเกิดสปาร์ก ทำให้  $C_s$  ดีสชาร์จให้กับวงจร  $R$  และ  $L$  ซึ่งค่า  $R$  และ  $L$  จะกำหนดด้วยเวลาหน่วงคลื่น  $T_1$  และ เวลาทางคลื่น  $T_2$  รูปคลื่นออสซิลเลชันแบบหน่วง เขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$I = \frac{U}{L} \cdot \frac{2T_s}{\sqrt{(4\lambda^2-1)}} \exp\left(-\frac{t}{2T_s}\right) \sin \sqrt{(4\lambda^2-1)} \cdot \frac{t}{2T_s} \quad (3.9)$$

$U$  คือแรงดันที่ป้อน

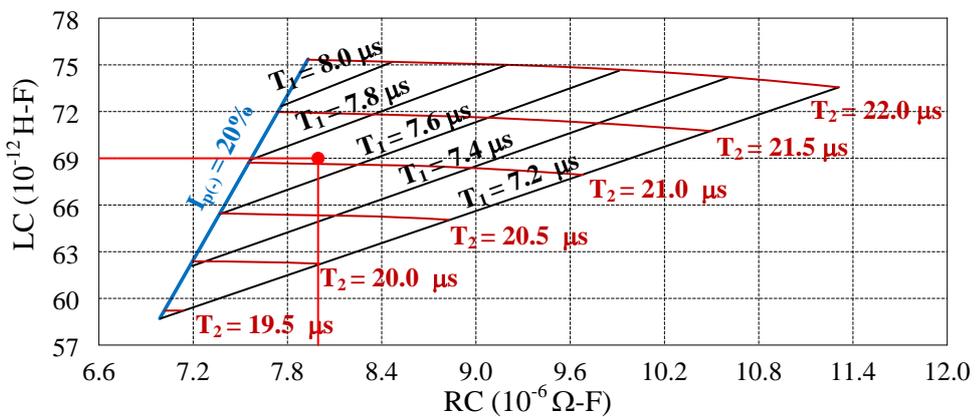
$T_s$  คือเวลาคงตัวของวงจรอันดับ  $= \frac{L}{R}$

$\lambda$  คือดรรชนีหน่วงของวงจรอันดับ  $= \frac{Z}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$

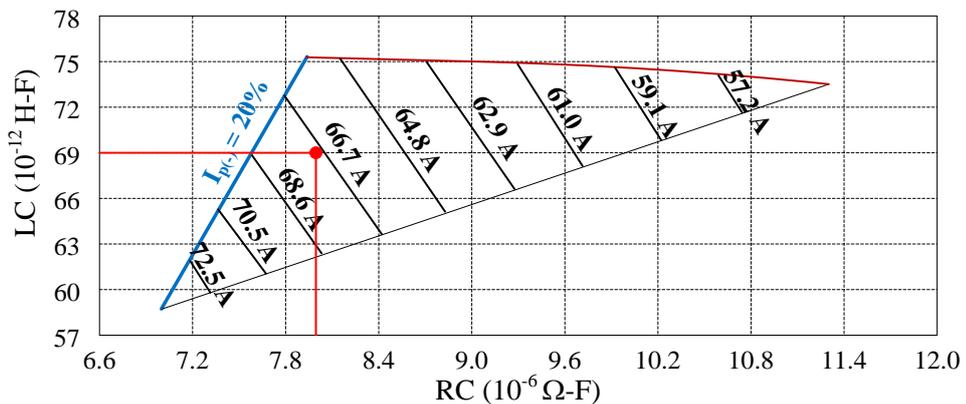
การออกแบบวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ นอกจากจะต้องทราบรูปคลื่นแล้ว ข้อมูลที่ต้องทราบเพิ่มเติมก็คือขนาดของกระแสอิมพัลส์ และแรงดันอัดประจุ  $U_0$  ถ้าเลือกหรือกำหนดค่าความจุไฟฟ้า  $C_s$  ได้ก็จะสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำ  $L$  โดยประมาณได้จากสมการ

$$I \approx \frac{U_0}{\frac{L}{C} \frac{1}{(-)^2}} \quad \text{และ} \quad \left(\frac{di}{dt}\right)_{\max} \approx \frac{U_0}{L} \quad (3.10)$$

เครื่องกำเนิดกระแสสลับพัลส์ที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้มีค่าความจุไฟฟ้ารวม 4  $\mu\text{F}$  และแรงดันอัดประจุรวม 150 kV จากการคำนวณโดยใช้วิธีเชิงเลขคือ เซเคนท์ (Sacant method) ได้ผลลัพธ์ของหน้าคลื่น หลังคลื่นและค่ายอดกระแสต่อความจุไฟฟ้าและแรงดันอัดประจุบนระนาบ ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า รวมทั้งขีดจำกัดกระแสกลับชั่วที่ต้งไม่เกิน 20% ตามรูปที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 เวลาหน้าคลื่น และเวลาหลังคลื่นบนระนาบความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้าในกรณีกระแสสลับพัลส์ฟ้าผ่า 8/20  $\mu\text{s}$ [9]



รูปที่ 3.5 ค่ายอดกระแสต่อความจุไฟฟ้า ( $\mu\text{F}$ ) ต่อแรงดันอัดประจุ (kV) บนระนาบความต้านทาน ความเหนี่ยวนำและความจุไฟฟ้าในกรณีกระแสสลับพัลส์ฟ้าผ่า 8/20  $\mu\text{s}$

ในการออกแบบวงจรเพื่อสร้างกระแสสลับพัลส์ฟ้าผ่า ให้พิจารณาจากรูปที่ 3.5 และค่าความจุไฟฟ้าของวงจรเป็น 4  $\mu\text{F}$  เลือกค่าความต้านทาน 2  $\Omega$  และความเหนี่ยวนำ 17.25  $\mu\text{H}$  ทำให้ได้ผลลัพธ์ของหน้าคลื่น ( $T_1$ ) เป็น 7.7  $\mu\text{s}$  หลังคลื่น ( $T_2$ ) เป็น 21.1  $\mu\text{s}$

ค่ายอดกระแส ( $I_p$ ) สามารถคำนวณจากรูปที่ 3.4 ดังนี้

$$I_p = (67 \frac{A}{\mu F \cdot kV}) \times (4 \mu F) \times (150 kV) = 40.20 \text{ kA}$$

เมื่อค่าความจุไฟฟ้าเป็น 4  $\mu F$  และความจุไฟฟ้ารวมเป็น 150 kV

จากหลักการข้างต้นโดยกำหนดแรงดันอัดประจุเป็น 150 kV และค่าความจุไฟฟ้าเป็น 4  $\mu F$  เหมือนดังตัวอย่างข้างต้นทำให้สามารถออกแบบค่าองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ได้ซึ่งสรุปผลการออกแบบองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าของวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์ข้างต้นได้ตามตารางที่ 3.2 และได้ผลของค่าเวลาน้ำคลื่น เวลาหลังคลื่น และค่ายอดกระแสของรูปคลื่นต่างๆ จากการออกแบบตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ค่าองค์ประกอบของวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์

รูปคลื่น	8/20 $\mu s$
ความจุไฟฟ้า (C)	4.0 $\mu F$
ความต้านทาน (R)	2 $\Omega$
ความเหนี่ยวนำ (L)	17.25 $\mu H$

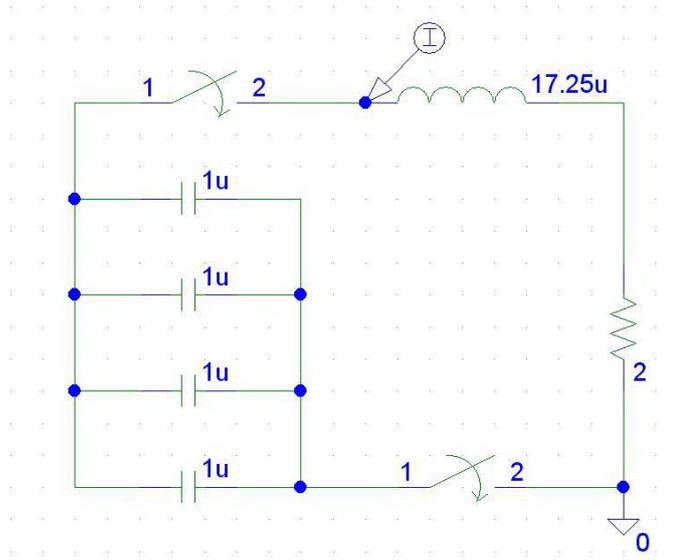
ตารางที่ 3.3 ค่าองค์ประกอบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์เมื่อใช้ค่าองค์ประกอบของวงจรตามตารางที่ 3.2

รูปคลื่น	8/20 $\mu s$
ค่ายอดกระแส ( $I_p$ )	40.20 kA
เวลาน้ำคลื่น ( $T_1$ )	7.7 $\mu s$
เวลาหลังคลื่น ( $T_2$ )	21.1 $\mu s$

### 3.5 การจำลองสร้างกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า โดยใช้โปรแกรม PSpice

ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำการจำลองวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์โดยทำการจำลองวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์

3.5.1 วงจรสร้างเครื่องกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ด้วย PSpice

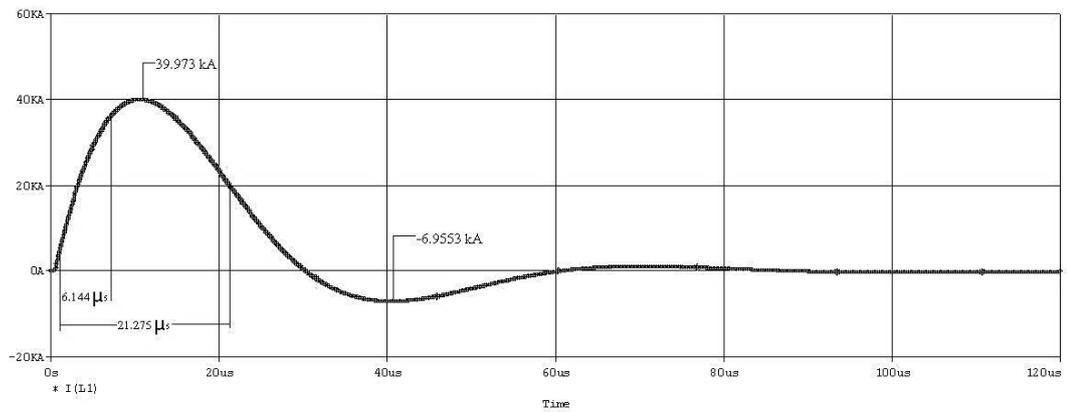


รูปที่ 3.6 วงจรจำลองเครื่องกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกพัลส์

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้จำลองวงจร

อุปกรณ์	ขนาด	จำนวน (ตัว)
ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C)	1 $\mu$ F	4 ตัว
ตัวต้านทานจำกัดกระแส (R)	2 $\Omega$	1 ตัว
ตัวเหนี่ยวนำ (L)	17.25 $\mu$ H	1 ตัว

3.5.2 ผลการจำลองวงจรเครื่องกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกพัลส์



รูปที่ 3.7 ผลการจำลองเครื่องกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกพัลส์

ตารางที่ 3.5 ผลการจำลองเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

รูปคลื่น	8/20 $\mu$ s
ค่ายอดกระแส ( $I_m$ )	39.973 kA
ค่ายอดกลับหัว ( $-I_m$ )	-6.9553 kA
เวลาหน้าคลื่น ( $T_1$ )	7.68 $\mu$ s
เวลาหลังคลื่น ( $T_2$ )	21.275 $\mu$ s

3.6 การออกแบบตัวเก็บประจุอิมพัลส์

ค่าตัวเก็บประจุให้สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้โดยไม่เกิดความเสียหาย



รูปที่ 3.8 ตัวเก็บประจุ

ตารางที่ 3.6 อุปกรณ์การต่อตัวเก็บประจุ

อุปกรณ์	ขนาด	ปริมาณ
ตัวเก็บประจุ	2 $\mu$ F	8 ตัว

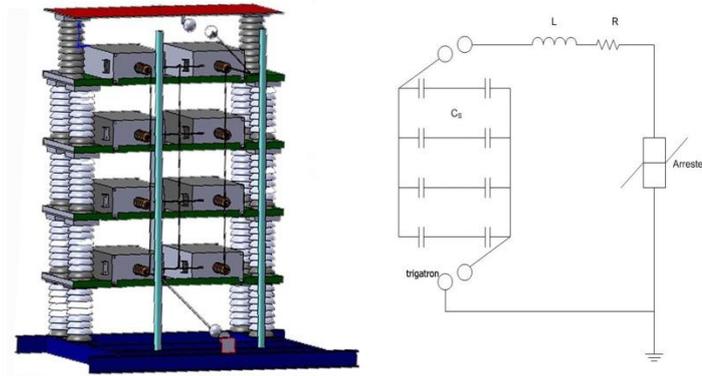
วิธีการต่อตัวเก็บประจุ

ต่อตัวเก็บประจุขนาด 2  $\mu$ F ขนานกัน 4 ชั้น ได้ค่าดังนี้

ค่าความจุรวม                      4         $\mu$ F

ค่าความต้านทาน                    2         $\Omega$

ค่าความเหนี่ยวนำ                17.25  $\mu$ H



รูปที่ 3.9 ออกแบบการสร้างตัวเก็บประจุ

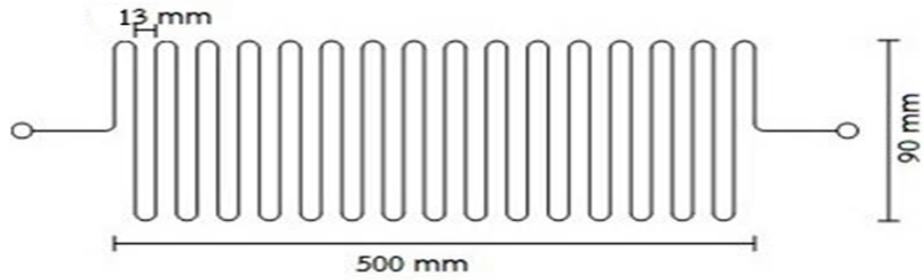
### 3.7 การออกแบบตัวต้านทานสำหรับรูปคลื่น [10]

ใช้ลวดนิกโครมเพื่อใช้สำหรับทำตัวต้านทาน (20% Chromium, 80% Nickel)

ชนิด	ลวดนิกโครมเบอร์ 21
โครงสร้าง	อากาศ
สภาพต้านทาน	2.17 $\Omega$ /m
จำนวน	4 ตัว
Diameter(mm.)	0.75
A พื้นที่หน้าตัดขดลวด	0.503 sqmm.
ความยาวลวดนิกโครม	3.68m
ความต้านทาน	8 $\Omega$



รูปที่ 3.10 วิธีการพันตัวต้านทาน



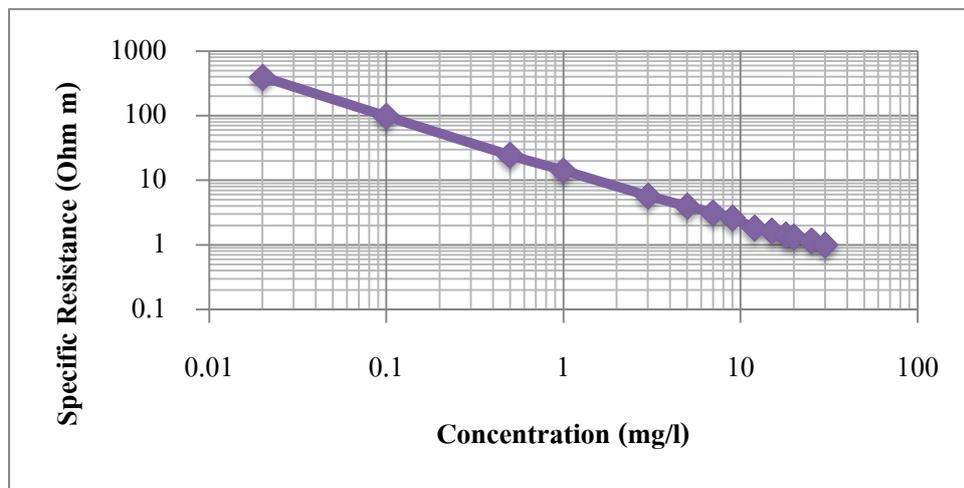
รูปที่ 3.11 วิธีการพันตัวต้านทาน(ทฤษฎี)

จากสูตร	$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*}$
โดยที่	$E_{\max} = 25\text{kV/cm.}$
ขอบคม	$\eta^* = 0.3$
ต้องการ	$0.2\Omega/\text{รอบการพัน}$
ค่า	$U = 8\text{ kV}$
เพราะฉะนั้น	ค่า $d = \frac{8}{25 \times 0.3}$
	$= 10.6\text{ mm.}$

เลือกใช้ระยะห่างระหว่างรอบการพัน ต้องมีค่ามากกว่า 10.6 mm. จึงเลือก 13mm.

### 3.8 การออกแบบตัวต้านทานกระแสอัดประจุ

การจำกัดอัตราการอัดประจุทำได้โดยใช้ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ  $R_L$  เพื่อให้ได้กระแสอัดประจุที่มีค่าต่ำ



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงค่าสภาพต้านทานของสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  ในน้ำกลั่น 1 ลิตร

ตารางที่ 3.7 ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้การทำตัวต้านทาน

อุปกรณ์	ปริมาณ
สารละลาย $\text{CuSO}_4$	ความเข้มข้น 2 โมล
น้ำกลั่น	1 ลิตร
เครื่องวัดสภาพการนำไฟฟ้า	1 เครื่อง



รูปที่ 3.13 สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต



รูปที่ 3.14 น้ำกลั่น



รูปที่ 3.15 เครื่องวัดความนำไฟฟ้าของสารละลาย

### 3.9 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ( $R_L$ )

#### 3.9.1 การหาค่าความต้านทาน ( $R_L$ )

ตัวต้านทานกระแสที่เพิ่มเข้ามาทำหน้าที่ควบคุมเวลาและการอัดประจุโดยมีค่าความคงที่เวลา ( $\tau$ ) คือเท่ากับ  $R_L C$  ซึ่งตัวเก็บประจุจะได้รับการอัดประจุจนถึงสภาวะคงตัว (Steadystate) ภายในเวลาทั้งหมดประมาณ 5 เท่าหรือ  $5\tau$  หรือ  $5R_L C$  ซึ่งในช่วงเวลาที่มีการสะสมของประจุที่ตัวเก็บประจุย่อมเกิดการสะสมของพลังงานในรูปสนามไฟฟ้าขึ้น

โดย แรงดันอัดประจุต่อชั้น  $U_0 = 150 \text{ kV}$

$$\begin{aligned} I_p &= CS_v \\ &= 4 \times 10^{-6} \times \frac{150 \times 10^3}{60} \\ &= 10 \times 10^{-3} \text{ A} \end{aligned} \quad (3.12)$$

ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุตัวละ  $2 \mu\text{F}$

$$\begin{aligned} \tau &= RC \\ 5\tau &= 5RC < 2\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุได้} &< \frac{2}{5C} \\ &< \frac{2}{5 \times 4 \times 10^{-6}} \\ &< 100 \times 10^3 \Omega \end{aligned}$$

โดยเมื่อเราพิจารณาในแง่ของกำลัง( $P_R$ )ที่ตัวเก็บประจุจะได้รับ

$$P_R = i^2 R \quad (3.13)$$

$$= (CS_V)^2 R$$

$$= (10 \times 10^{-3})^2 \times 100 \times 10^3$$

$$= 100 \times 10^{-6} \times 100 \times 10^3$$

$$= 10 \text{ Watt}$$

$$V_R = iR$$

$$V_{R(P)} = 10 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^3$$

$$= 1000 \text{ V}$$

จะได้ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ

$$100 \times 10^3 \Omega = \rho \frac{0.36}{\pi(0.03^2 - 0.017^2)}$$

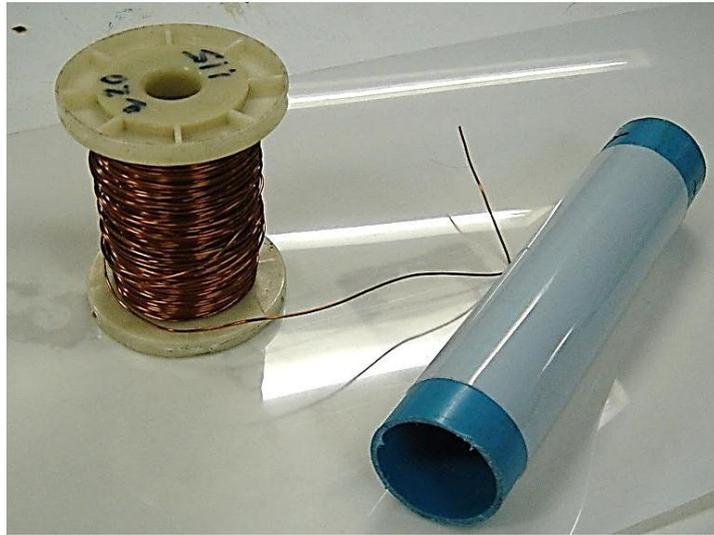
$$\rho = \frac{100 \times 10^3 \times \pi(0.03^2 - 0.017^2)}{0.36}$$

$$\rho = 534 \Omega \cdot \text{m}$$



รูปที่ 3.16 ตัวต้านทานจำกััดกระแสอัดประจุ

## 3.10 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ [11]



รูปที่ 3.17 อุปกรณ์ที่ใช้ในการพันตัวเหนี่ยวนำ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการพันประกอบด้วย

- ขดลวดทองแดง
- แผ่นฉนวนไมล้า
- ท่อ PVC

คำนวณการพันตัวเหนี่ยวนำ

ท่อ PVC ขนาด 1.25"

ลวดทองแดง เบอร์ 19 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0359"

$$L = \frac{\mu^2 N^2}{(9r + 10\lambda)}$$

โดยที่

$$\lambda = 0.0359 \text{ N}$$

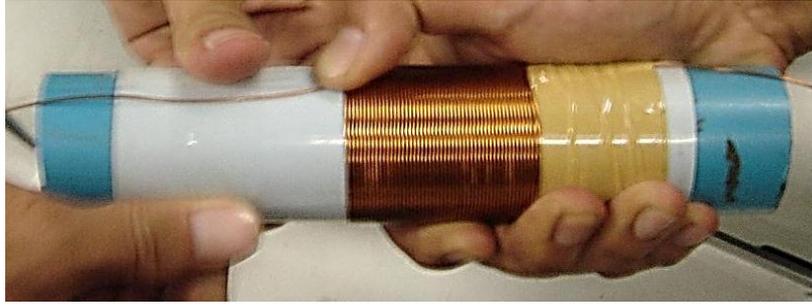
$$17.25 = \frac{\left(\frac{13}{16}\right)^2 (N)^2}{\left(9 \times \frac{13}{16}\right) + (10 \times 0.0359N)}$$

จะได้

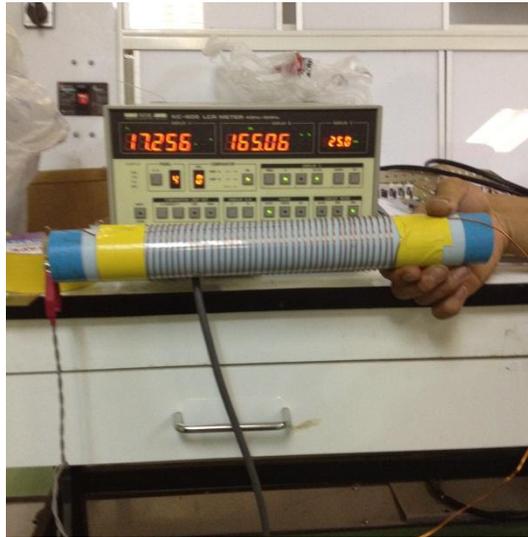
$$N = 19.29$$

วิธีการพัน

นำแผ่นฉนวนไมล้าพันทับแกนPVC แล้วนำลวดทองแดงพันทับบนฉนวนไมล้าให้ได้ประมาณ 20 รอบ แล้วนำไปวัดค่าความเหนี่ยวนำและทำการปรับแก้ต่อไป



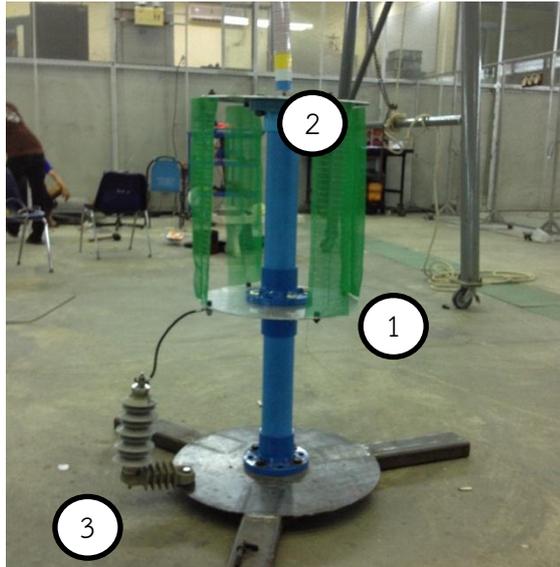
รูปที่ 3.18 วิธีการพันตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.19 เครื่องวัด RLC

### 3.11 การออกแบบชุดโหลด

ประกอบด้วย ตัวต้านทานขนาด 8  $\Omega$  ต่อขนานกันจำนวน 4 ตัว ได้ค่าความต้านทานรวมเท่ากับ 2  $\Omega$  ตัวเหนี่ยวนำขนาด 17.25  $\mu\text{H}$  จำนวน 1 ตัว และอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่จะใช้ทดสอบ

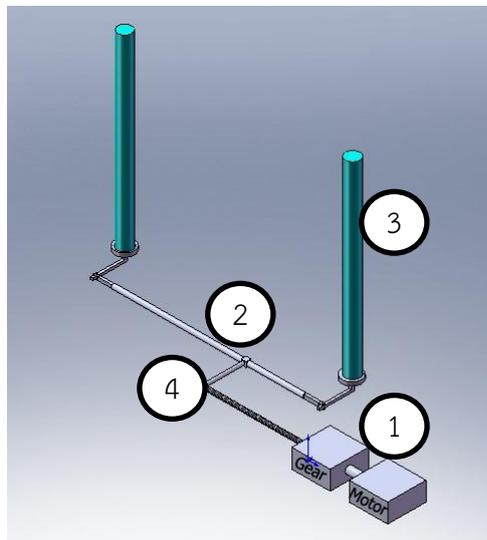


รูปที่ 3.20 ชุดโพลด

- 1) ตัวต้านทานขนาด 8  $\Omega$
- 2) ตัวเหนี่ยวนำขนาด 17.25  $\mu\text{H}$
- 3) อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่จะใช้ทดสอบ

### 3.12 ชุดควบคุมช่องว่างทรงกลม

ประกอบด้วย มอเตอร์แรงดัน 12 V ความเร็วรอบ 10 รอบ/นาที แรงบิด 50 นิวตัน-เมตรชุด  
แขนขับเคลื่อนทรงกลม เสายึดทรงกลม และฟีดสกรู



รูปที่ 3.21 ชุดควบคุมช่องว่างทรงกลม

เมื่อ 1. มอเตอร์แรงดัน 12 V 2. ชุดแขนขับเคลื่อนทรงกลม 3. เสายึดทรงกลม 4. ฟีดสกรู