

โครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะประจำปี 2551

การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม 6kV, 3kA

เสนอ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ.....	I
สารบัญรูป.....	III
สารบัญตาราง.....	V
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีของเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม.....	5
2.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน.....	5
2.2 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	8
2.3 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์.....	10
2.4 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าม่ามาตรฐาน.....	12
2.5 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	13
2.6 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยโรกอฟสกีคอยล์.....	14
2.6.1 หลักการวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยโรกอฟสกีคอยล์.....	14
2.6.2 การพันขดลวดโรกอฟสกี.....	15
2.7 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นที่.....	18
2.8 เทคนิคการฟื้นความต้านทานไว้ความเหนียว.....	20
2.8.1 ทฤษฎี.....	20
2.8.2 การคำนวณขนาดของเส้นลวดและเอ็นจนวน.....	21
2.9 มาตรฐานในการทดสอบ IEC 61000-4-5.....	22
2.9.1 เครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม(1.2/50µs, 8/20 µs).....	22
2.9.2 ลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม.....	22
2.9.3 การทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม.....	23
2.9.4 ข้อกำหนดสภาวะการทดสอบ.....	23
2.9.5 รูปคลื่นมาตรฐาน.....	23
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม 6 kV 3kA.....	25
3.1 การออกแบบวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม.....	25

RCH

TK

2851

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ใช้ภายในสถานศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีการนำเอกสารนี้ไปลงเรียนหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 วันเดือนปี 16 ส.ย. 2554

b. 1232150  
 i. ....

3.2	การออกแบบตัวต้านทาน.....	27
3.3	การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ.....	36
3.4	การออกแบบสปาร์กแกป.....	36
3.5	ตัวอย่างชิ้นงาน.....	38
บทที่ 4	ผลการทดลอง.....	40
4.1	การทดสอบกระแสอิมพัลส์.....	40
4.1.1	การทดสอบกระแสอิมพัลส์มาตรฐานรูปคลื่น 8/20 $\mu$ s ด้วยตัวต้านทานชั้นที่.....	40
4.1.2	ผลการทดสอบกระแสอิมพัลส์ด้วยตัวต้านทานชั้นที่.....	42
4.1.3	การทดสอบกระแสอิมพัลส์มาตรฐานรูปคลื่น 8/20 $\mu$ s ด้วยโรกอฟสกีคอยล์.....	44
4.1.4	ผลการทดสอบกระแสอิมพัลส์ ด้วยโรกอฟสกีคอยล์.....	45
4.2	การทดสอบแรงดันอิมพัลส์.....	47
4.2.1	การทดสอบหาค่าประกอบแรงดันอิมพัลส์ รูปคลื่น1.2/50 $\mu$ s .....	47
4.2.2	ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์.....	47
บทที่ 5	สรุป.....	51
	เอกสารอ้างอิง.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานแบบ Full wave.....5
2.2	รูปคลื่นตัดช่วงหน้าคลื่น.....6
2.3	รูปคลื่นตัดช่วงหางคลื่น.....7
2.4	วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หนึ่งชั้น วงจร A และ วงจร B.....8
2.5	วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์.....10
2.6	รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน.....12
2.7	วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์.....13
2.8	ขดลวดโรกออฟสกี.....15
2.9	โรกออฟสกีคอยล์ต่อด้วย LR อินทิเกรเตอร์.....16
2.10	ผลตอบสนองความถี่ LR อินทิเกรเตอร์.....17
2.11	โรกออฟสกีคอยล์ต่อด้วย RC อินทิเกรเตอร์.....18
2.12	ผลตอบสนองความถี่ RC อินทิเกรเตอร์.....18
2.13	วงจรวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ด้วยตัวต้านทานชั้นที่.....19
2.14	ตัวอย่างการพันความเหนียวหน้า.....21
2.15	วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์คลื่นผสม.....22
2.16	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานขณะเปิดวงจร.....24
2.17	รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐานขณะลัดวงจร.....24
3.1	วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสมขณะเปิดวงจรและลัดวงจร... 25
3.2	แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขนาด 6 kV ที่ได้จากการ Simulate โดยป้อนแรงดันอัดประจุ 6.375 kV.....26
3.3	แสดงรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ขนาด 3 kA ที่ได้จากการ Simulate โดยป้อนแรงดันอัดประจุ 6.375 kV.....26
3.4	วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม.....27
3.5	รูปการพันขดลวดความต้านทานในลักษณะพันสวนทิศทางการแบบที่ 1.....28
3.6	รูปการพันขดลวดความต้านทานในลักษณะพันสวนทิศทางการแบบที่ 2.....29
3.7	รูปการพันขดลวดความต้านทานในลักษณะพันสวนทิศทางการแบบที่ 3.....30
3.8	รูปวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม ในกรณีเปิดวงจร.....30
3.9	วงจรสมมูลหน้าคลื่นของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม ที่ขณะเปิดวงจร พิจารณาที่ช่วงหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์.....31
3.10	วงจรสมมูลหน้าคลื่นของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม ที่ขณะเปิดวงจร พิจารณาที่ช่วงหางคลื่นของแรงดันอิมพัลส์.....31
3.11	แกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm ที่ออกแบบ.....36

3.12	รูปตัวอย่างชิ้นงาน.....	39
3.13	รูปชิ้นงานที่สมบูรณ์เมื่อประกอบเสร็จ.....	39
4.1	วงจรเครื่องกำเนิดกระแสสลับรูปคลื่นผสมที่มีความต้านทานชั้นต่อในวงจร.....	40
4.2	วงจรวัดรูปคลื่นกระแสสลับด้วยตัวต้านทานชั้นต่อ.....	40
4.3	เครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสสลับรูปคลื่นผสม 6kV, 3kA ขณะลัดวงจร.....	41
4.4	ออสซิลโลสโคปและตัวต้านทานแมทซิ่ง.....	41
4.5	ตัวต้านทานชั้นต่อ.....	41
4.6	สายเคเบิล.....	42
4.7	สายนำส่งแรงสูง.....	42
4.8	รูปคลื่นกระแสสลับมาตรฐานขณะลัดวงจร.....	43
4.9	ผลการทดลองที่ได้จากการวัดด้วยตัวต้านทานชั้นต่อ.....	43
4.10	วงจรสมมูลของการทดสอบ.....	44
4.11	วงจรวัดรูปคลื่นกระแสสลับด้วยโรกอฟสกีคอยล์.....	45
4.12	โรกอฟสกีคอยล์.....	45
4.13	วงจรการทดสอบจริงของการใช้โรกอฟสกีคอยล์.....	45
4.14	ผลการทดลองที่ได้จากการวัดด้วยโรกอฟสกีคอยล์.....	46
4.15	วงจรการทดสอบจริงในการวัดแรงดันอิมพัลส์.....	47
4.16	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานขณะเปิดวงจร.....	48
4.17	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวขณะเปิดวงจร.....	48
4.18	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวเมื่อขยายดูที่ช่วงหน้าคลื่น.....	48
4.19	วงจรของเครื่องกำเนิดเมื่อใส่ชุดชดเชย.....	49
4.20	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เมื่อใส่ชุดชดเชย.....	49

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของโครงการวิจัย.....	3
4.1 องค์ประกอบกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20 $\mu$ s ชั่วบวกที่วัดได้จากตัวต้านทานชั้นที่ เปรียบเทียบกับค่าตามมาตรฐาน.....	44
4.2 องค์ประกอบกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20 $\mu$ s ชั่วลบที่วัดได้จากตัวต้านทานชั้นที่ เปรียบเทียบกับค่าตามมาตรฐาน.....	44
4.3 องค์ประกอบกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20 $\mu$ s ชั่วบวกที่วัดได้จากโรกอฟสกีคอยล์ เปรียบเทียบกับค่าตามมาตรฐาน.....	46
4.4 องค์ประกอบกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20 $\mu$ s ชั่วลบที่วัดได้จากโรกอฟสกีคอยล์ เปรียบเทียบกับค่าตามมาตรฐาน.....	47
4.5 องค์ประกอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/50 $\mu$ s ชั่วลบที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าตาม มาตรฐาน.....	50

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

เครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสมีพัลส์รูปคลื่นผสม 6 kV, 3 kA [1] ปกติแล้วจะใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินในระบบแรงดันต่ำ [2] เพื่อดูความสามารถในการป้องกันแรงดันเกินที่เข้าสู่อุปกรณ์ด้านแรงต่ำที่อาจเกิดขึ้นได้ หากเกิดความเสียหายใดๆเกิดขึ้นเนื่องจากการผิดพลาด (fault) ในระบบ ก็จะทำให้เกิดความสูญเสียเป็นอย่างมาก เครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสมีพัลส์รูปคลื่นผสมนี้ นอกจากใช้ในการตรวจสอบความสามารถของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินแล้ว ยังสามารถนำไปใช้ในการทดสอบหรืองานวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงได้อีกด้วย

เทคโนโลยี ในการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันสูงที่ประเทศไทย โดยเฉพาะสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง มีประสบการณ์และศักยภาพเพียงพอที่สามารถสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสมีพัลส์รูปคลื่นผสม 6 kV, 3 kA ได้ อีกทั้งเครื่องกำเนิดนี้ยังมีการศึกษาวิจัยการออกแบบสร้างขึ้นเองภายในประเทศอยู่น้อยมากและมีราคาสูงมาก หากทำการจัดซื้อจากต่างประเทศ ด้วยพิกัดนี้ราคาหลายล้านบาท จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาวิจัยออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสมีพัลส์รูปคลื่นผสม 6 kV, 3 kA ขึ้นมาเพื่อใช้ในงานวิจัยและ งานทดสอบของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อพัฒนาความรู้และศักยภาพทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงของประเทศอีกด้วย

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อทำการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสมีพัลส์รูปคลื่นผสม 6 kV, 3 kA สำหรับเป็นต้นแบบของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง
2. เพื่อส่งเสริมให้เกิดงานวิจัย เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
3. เพื่อรองรับงานวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินด้านแรงต่ำ (Low voltage surge suppressor)
4. เพื่อรองรับการบริการด้านการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินด้านแรงต่ำในอนาคต

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินด้านแรงต่ำ
2. ศึกษามาตรฐานของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินด้านแรงต่ำ
3. ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม 6 kV, 3 kA
4. ทำการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินด้านแรงต่ำด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม 6 kV, 3 kA
5. ทำการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินด้านแรงต่ำ
6. ทำรายงานฉบับสมบูรณ์

### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับแรงดันอิมพัลส์ กระแสอิมพัลส์
2. ศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ
3. ทำการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสมขนาด 6 kV, 3 kA
4. ทำการทดสอบและสรุปผลการทดลอง
5. ทำรายงานฉบับสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของโครงการวิจัย

การทำงาน	พ.ศ. 2551					
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.
1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์	↔					
2. ศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ	↔					
3. ทำการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคุณลักษณะรูปคลื่นแรงดันและกระแสอิมพัลส์ ให้ได้ตามมาตรฐาน		↔				
4. ทำการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสมขนาด 6kV , 3 kA			↔			
5. ทำการทดสอบและสรุปผลการทดลอง					↔	
6. ทำรายงานฉบับสมบูรณ์						↔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม 6 kV, 3kA ได้ตามข้อกำหนด
2. เครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม 6 kV, 3 kA ที่ออกแบบสร้างขึ้นมานำมาเป็นต้นแบบในการจัดสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม 6 kV, 3 kA สำหรับห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงเพื่อรองรับงานเกี่ยวกับการวิจัยและการบริการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีของเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม

2.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน [3]

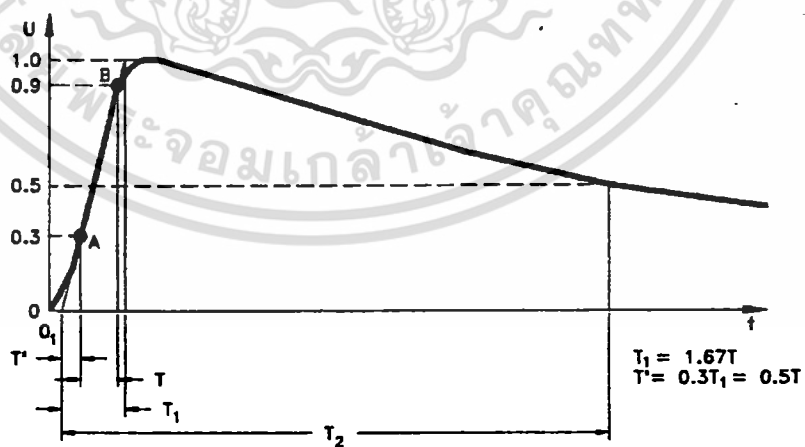
รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบ่งออกได้ดังนี้

- รูปคลื่นเต็ม (Full wave) หมายถึงรูปคลื่นที่ขนาดเพิ่มขึ้นถึงค่ายอด แล้วลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเป็นศูนย์

- รูปคลื่นตัด (Chopped wave) เกิดจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์ให้กับวัสดุทดสอบและวัสดุทดสอบทนต่อแรงดันทดสอบไม่ได้ทำให้เกิดการสปาร์กผ่าน เกิดวาบไฟตามผิว หรือเกิดเบรกดาวนทะลุผ่าน ซึ่งทำให้เกิดหน้าคลื่นตัด จะเกิดขึ้นช่วงหน้าคลื่นหรือส่วนหางคลื่นก็ได้ โดยที่รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานซึ่งจะกำหนดตามข้อกำหนดต่อไปนี้

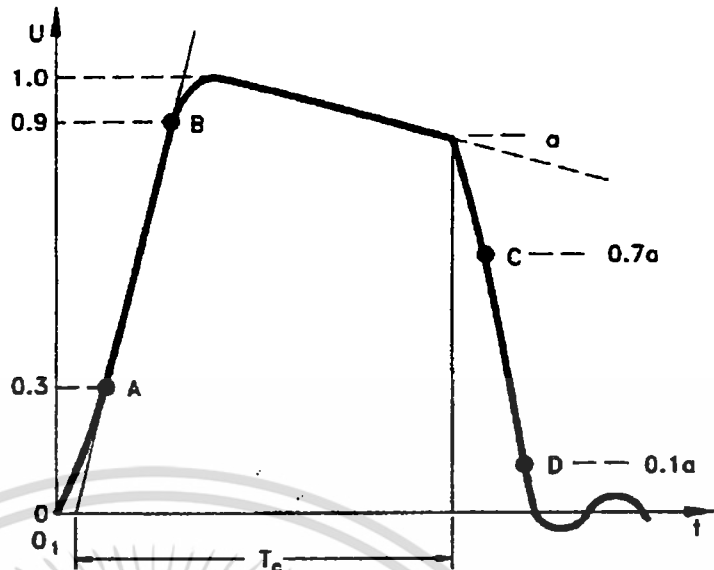
1. ขนาดของแรงดัน ( Value of the voltage ) หมายถึง ค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน กรณีที่มีระลอกคลื่นซ้อน ที่เกิดจากการออสซิลเลชันใกล้ๆ ยอดรูปคลื่นให้พิจารณาจากค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอก
2. ขั้วของแรงดันจะเป็นขั้วบวกหรือขั้วลบก็ได้ เมื่อเทียบกับดิน
3. เวลาช่วงหน้าคลื่น ( Front time :  $T_1$  ) หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด
4. เวลาช่วงหางคลื่น ( Time to half-value :  $T_2$  ) หมายถึง ช่วงเวลาดังแต่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

มาตรฐาน IEC 60060-1[3] ได้กำหนดลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานไว้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานแบบ Full wave





รูปที่ 2.3 รูปคลื่นตัดช่วงหางคลื่น

$T_c$  คือ ช่วงเวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นเสมือนจนกระทั่งถึงเวลาของแรงดันที่ทำให้เกิด Chopping ซึ่งเกิดขึ้นช่วงหางคลื่น  
 $O_1$  คือ จุดกำเนิดเสมือน

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานจะมีเกณฑ์กำหนดดังต่อไปนี้

เวลาช่วงหน้าคลื่น  $T_1 = 1.2\mu s \pm 30\%$  จะต้องอยู่ในช่วง 0.84 – 1.56  $\mu s$

เวลาช่วงหลังคลื่น  $T_2 = 50\mu s \pm 20\%$  จะต้องอยู่ในช่วง 40 – 60  $\mu s$

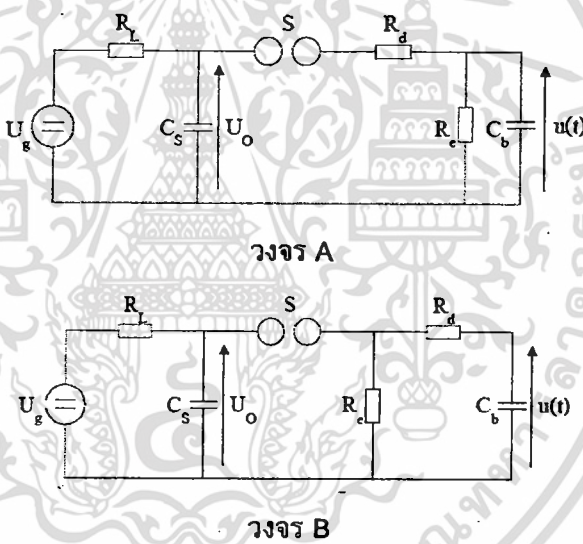
ค่ายอดแรงดัน  $U_m$  ยอมให้ผิดพลาดได้  $\pm 3\%$  ของค่าที่ระบุรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

การวัดรูปคลื่นจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ต้องมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในขอบเขตของมาตรฐาน IEC 60060-1[3] ซึ่งได้กำหนดรายละเอียดดังต่อไปนี้

- การวัดค่าช่วงเวลาหน้าคลื่น ( $T_1$ ) ให้คำนวณจาก 1.67 เท่าของเวลาในช่วงที่รูปคลื่นแรงดันเพิ่มค่าจาก 30% ของค่ายอดจนถึงค่า 90% ของค่ายอดแรงดันอิมพัลส์
- การวัดค่าช่วงเวลาหางคลื่น ( $T_2$ ) ให้คำนวณจากช่วงเวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ผ่านค่ายอดจนถึงจุดที่แรงดันอิมพัลส์ลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดแรงดัน
- จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ คือ จุดตัดระหว่างแกนนอน (แกนเวลา) กับเส้นตรงที่ลากผ่านระหว่างจุด 30% ของค่ายอดแรงดันอิมพัลส์และจุด 90% ของค่ายอดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น

## 2.2 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ [4]

หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะอาศัยหลักการของวงจรทรานเซียนต์ที่ประกอบด้วย ตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุ หรือ ตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุ, ตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และใช้อิเล็กทรอนิกส์ทรานส์คอนดักชันควบคุมการคายประจุของตัวเก็บประจุในช่วงเวลาสั้นๆ โดยมีหลักการทำงานคือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง  $U_g$  จ่ายผ่านตัวต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ  $R_L$  แล้วแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนเข้ามาจะไปอัดประจุที่ตัวเก็บประจุอิมพัลส์  $C_s$  ในรูปพลังงานไฟฟ้าเมื่ออัดประจุถึงค่าแรงดันค่าหนึ่ง  $U_0$  แล้วทำการดีชาร์จผ่านอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์คอนดักชัน SG แล้วจะมีแรงดันตกคร่อมตัวความต้านทาน  $R_d$  และ  $C_b$  และจะถ่ายเทประจุไปไว้ที่  $C_b$  โดยการถ่ายประจุจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับ  $R_d$  และ  $C_b$  ซึ่ง  $R_d$  และ  $C_b$  จะเป็นตัวควบคุมเวลาช่วงหน้าคลื่น ( $T_1$ ) ของแรงดันอิมพัลส์ และเมื่อ  $C_b$  อัดประจุเต็มแล้วจะคายประจุหรือดีชาร์จออกไปสู่  $R_o$  แสดงว่า  $R_o$  จะเป็นตัวควบคุมเวลาช่วงหางคลื่น ( $T_2$ ) ของแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งถ้ามีค่า  $R_o$  สูง ค่า  $T_2$  ก็จะไปด้วย ดังนั้นรูปวงจรมูลฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะแสดงตามรูปที่ 2.4 ซึ่งประกอบด้วย 2 วงจรดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หนึ่งชั้น วงจร A และ วงจร B  
ความหมายในรูปวงจร A และ B

$U_g$  คือ แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย

$U_0$  คือ แรงดันอัดประจุกระแสตรง

$C_s$  คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน

$C_b$  คือ โหลดตัวเก็บประจุ (รวมทั้งความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์เครื่องวัดและอื่นๆ)

$R_L$  คือ ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

$R_d$  คือ ความต้านทานหน่วง

$R_0$  คือ ความต้านทานปล่อยประจุ

$u(t)$  คือ แรงดันอิมพัลส์ที่ได้แปรไปตามเวลา

โดยหลักการการทำงานของวงจรถูกกล่าวมาข้างต้นนั้นจะเป็นการทำงานของวงจรถวาย B ค่ายอดแรงดันที่จ่ายออกที่ปลายแรงสูง  $U$  จะน้อยกว่าแรงดันอัดประจุ  $U_0$  เพราะประจุจะกระจายให้กับ  $C_s$  และ  $C_b$  ฉะนั้นอัตราส่วนของ  $U$  ต่อ  $U_0$  จะน้อยกว่า 1 เสมอและเรียกอัตราส่วนนี้เป็นประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ นั่นคือ

$$\text{ประสิทธิภาพของวงจรถวาย } \eta = \frac{\hat{U}}{U_0} \leq \frac{C_s}{C_s + C_b} \quad (2.1)$$

ถ้าต้องการให้ได้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าสูงๆ ควรเลือกให้  $C_s$  มีค่าสูงกว่าโหลด  $C_b$  มากๆ และเพื่อให้เครื่องกำเนิดมีพลังงานมากพอ สามารถสร้างรูปคลื่นได้ตามเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด คือ  $T_1$  และ  $T_2$  อยู่ในเกณฑ์ และมีให้เกิดออสซิลเลชันเกินกำหนด ( $< 5\%$ ) ในทางปฏิบัติจะใช้เงื่อนไขให้

$$C_s \geq 10C_b \quad (2.2)$$

ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปจะกำหนดโดย

- แรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิด  $U_n$  (kV)
- แรงดันอัดประจุรวมทั้งหมด  $U_0$  (kV)
- ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด  $C_s$  ( $\mu\text{F}$ )
- พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด  $W_0$  (kJ)
- อัตราการดิสชาร์จจำนวนครั้งต่อนาที
- รูปคลื่นแรงดันแบบฟ้าผ่าแบบสวิตชิง

ค่าแรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ BIL หรือ SIL ตามมาตรฐานกำหนดตามระดับแรงดันของระบบที่จะนำเอาอุปกรณ์ไปใช้ ซึ่งมีหลักการเลือกและการกำหนดทำนองเดียวกับการกำหนดขนาดแรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบพลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เป็นลักษณะสำคัญประการหนึ่งที่จะต้องกำหนดพลังงานของเครื่องกำเนิดขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้า  $C_s$  และแรงดันอัดประจุ  $U_0$  ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\text{เมื่อ } W = \frac{1}{2} C_s U_0^2 \quad (2.3)$$

$$W = \frac{1}{2} C_s U_0^2 \times 10^{-9} \quad \text{kJ} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

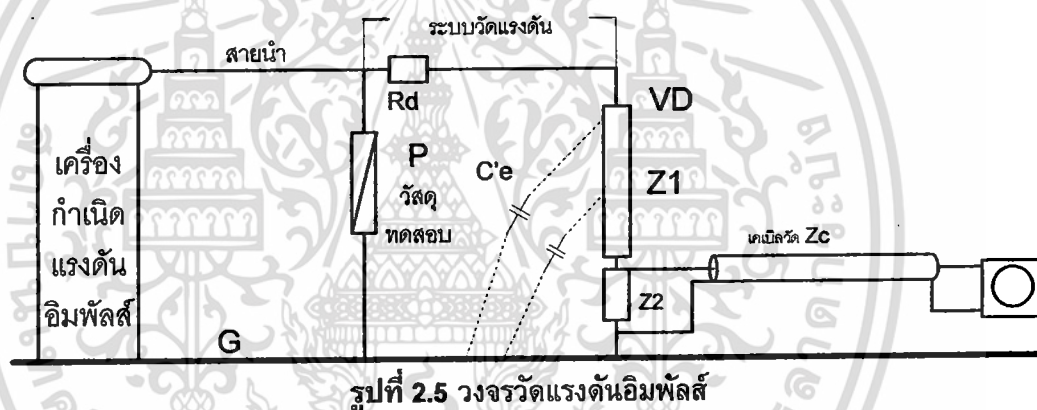
$W$  คือพลังงานอัดประจุเป็น (kJ)

$C_s$  คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเป็น (pF)

### 2.3 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์ [4]

การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลมนั้น ทราบแต่ค่ายอดเท่านั้น แต่ไม่ทราบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตามเวลา คือรูปคลื่นแรงดัน ซึ่งจำเป็นต้องทำการวัดและมีทางทำได้โดยใช้ออสซิลโลสโคป(CRO) หรือเครื่องบันทึกแรงดันอิมพัลส์ ประกอบเข้ากับโวลเตจดีไวเดอร์ ถ้าแรงดันที่วัดมีค่าไม่สูงมากนัก คือต่ำกว่า 100 kV เทคนิคการวัดก็ไม่ยุ่งยากอะไร เมื่อแรงดันเพิ่มสูงมากขึ้นเทคนิคและปัญหาการวัดก็มีมากขึ้นตามขนาดแรงดันที่วัด ยิ่งในปัจจุบันนี้มีการสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าหลายล้านโวลต์ เมื่อสร้างขึ้นมากก็ต้องการหาวิธีการวัดให้ได้

การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์ โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 4 ส่วนคือ สายตัวนำแรงสูง ตัวดีไวเดอร์  $Z_1, Z_2$  สูงประมาณ 2.5 m/MV เคเบิลวัดแบบแกนร่วม  $Z_c$  และออสซิลโลสโคป CRO ดังในรูปที่ 2.5



จากวงจรในรูปที่ 2.5 องค์ประกอบในระบบวัดแรงดันจะมีหน้าที่ต่าง ๆ ดังนี้

1) สายความต้านทานหน่วง  $R_d$  ทำหน้าที่หน่วงการแกว่งในภาวะทรานเซียนต์ ที่เกิดจากค่าเหนี่ยวนำของสายตัวนำกับค่าเก็บประจุของโวลเตจดีไวเดอร์ ตัวความต้านทานหน่วงที่ใช้เป็นแบบไร้ความเหนี่ยวนำ โดยอาจต่อที่ต้นสายตัวนำ หรือที่อิลเล็กโตรดแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ ในกรณีที่สายตัวนำมีความยาวมาก การต่อความต้านทานหน่วงที่ต้นสายตัวนำ โดยให้มีค่าประมาณเท่ากับค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำ จะช่วยหน่วงการแกว่งที่เกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ ที่ไม่เท่ากันของสายตัวนำกับวงจรกำเนิดแรงดัน และโวลเตจดีไวเดอร์

2) สายตัวนำระหว่างวัสดุทดสอบกับโวลเตจดีไวเดอร์ โดยทั่วไปโดยทั่วไปโวลเตจดีไวเดอร์จะต้องอยู่ห่างจากอุปกรณ์ทดสอบ ความยาวของสายตัวนำจะต้องมีความยาวอย่างน้อยเท่ากับความสูงของดีไวเดอร์ ขนาดของสายตัวนำควรจะต้องมีขนาดโตพอที่จะไม่ทำให้เกิดโคโรน่า ซึ่งเป็นคลื่นรบกวนต่อระบบแรงดันได้ ในวงจรทดสอบทั่วไปสายตัวนำมักจะอยู่ในแนว

ระดับ เวลาคลื่นเดินทาง  $\tau_L$  จะมีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วแสง  $c$  จากสูตร  $Z_L = \sqrt{L_L/C_L}$  และ  $\tau_L = \sqrt{L_L C_L} = \frac{\ell}{c}$  โดย  $L_L$  คือค่าความเหนี่ยวนำ  $C_L$  คือค่าเก็บประจุและ  $\ell$  คือความยาวของสายตัวนำ ตามลำดับ ดังนั้น จะได้  $Z_L = \frac{\ell}{c C_L}$  ค่าเก็บประจุของสายตัวนำสามารถคำนวณได้ โดยสมมติว่า สายตัวนำเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d$  วางอยู่สูง  $H$  เหนือระนาบดิน สมการหาค่าเก็บประจุของสายตัวนำคือ

$$C_L = \frac{2\pi\epsilon_0\ell}{B} \quad (2.5)$$

โดยที่  $B = \ln\left(\frac{4H}{d}\right) - \ln\frac{1}{2}\left(1 + \sqrt{1 + 2(H/\ell)^2}\right)$   
 เนื่องจาก  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}$  เมื่อ  $\mu_0$  คือ ค่าเพอร์มิบิลิตี และ  $\epsilon_0$  คือค่าเพอร์มิตติวิตีของอวกาศตามลำดับ จะได้ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำเป็น

$$(Z_L)_{hor} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} B \approx 60 B(\ell, d, H) \quad (2.6)$$

3) ไวลด์เจดีไวเตอร์ VD ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันสูงลงมา ให้มีขนาดอยู่ในย่านที่มีอุปกรณ์วัดในภาคแรงต่ำสามารถวัดได้

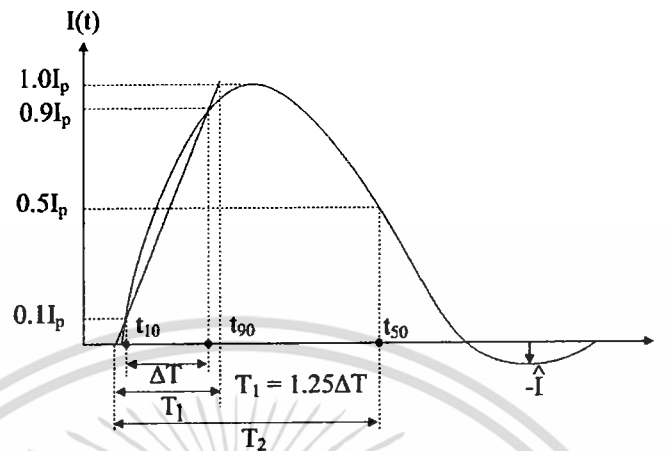
4) เคเบิลวัด ทำหน้าที่ส่งสัญญาณจากภาคแรงต่ำของดีไวเตอร์มายังอุปกรณ์วัด เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน และลดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยทั่วไป เป็นแบบแกนร่วม (coaxial cable) ที่มีการลดทอนของสัญญาณต่ำ

5) อุปกรณ์วัดและบันทึกรูปคลื่น อาจเป็นโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอดหรือออสซิลโลสโคป (CRO) หรือเครื่องบันทึกอิมพัลส์ อุปกรณ์เหล่านี้จะอยู่ในห้องที่มีชิลด์ เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก

6) ระบบสายดิน ทำหน้าที่เชื่อมจุดต่อลงดินของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบทดสอบให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน ปกติสายดินจะเป็นชนิดที่มีความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้แรงดันตกในสายดินมีค่าน้อยที่สุดโดยทั่วไปจะใช้แผ่นโลหะบาง เช่น ทองแดงแผ่นบาง

## 2.4 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน

มาตรฐาน IEC 60060-1[3] ได้กำหนดลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานดังในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน

เมื่อ  $T_1$  คือ เวลาช่วงหน้าคลื่น

$T_2$  คือ เวลาช่วงหางคลื่น

$\Delta T$  คือ ผลต่างของเวลาที่ค่าแรงดัน 90% ของค่ายอด กับเวลาที่ค่าแรงดัน 10% ของค่ายอด

$O_1$  คือ จุดกำเนิดเสมือน เกิดจากการลากเส้นตรงผ่านจุด C และ B โดยจุด  $O_1$  คือ จุดที่เส้นตรงตัดแกน t

ลักษณะสมบัติของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าพิจารณาดังนี้

- 1) เวลาหน้าคลื่น(Front time : $T_1$  ) หมายถึง ช่วงเวลาที่กระแสอิมพัลส์เพิ่มขึ้นจากศูนย์ จนถึงค่ายอดกระแสอิมพัลส์
- 2) เวลาหางคลื่น (Tail time : $T_2$  ) หมายถึง ช่วงเวลาดังแต่กระแสเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดกระแสอิมพัลส์ จนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดกระแสอิมพัลส์
- 3) ค่ายอดกระแสอิมพัลส์ ( Impulse Current peak ,  $I_p$  )
- 4) ขั้วของกระแส อาจจะเป็นขั้วบวกหรือขั้วลบก็ได้เมื่อเทียบกับดิน
- 5) ค่ายอดกระแสขั้วตรงข้าม(Peak value of opposite polarity,  $-I$ )

การทดสอบกับดักฟ้าผ่าแรงสูง มาตรฐานจะกำหนดรูปคลื่นเรียกตามเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น  $T_1 / T_2$  คือ 8/20 $\mu$ s และ 4/10 $\mu$ s

โดยกำหนดเวลาและความลาดเคลื่อนไว้ ตามรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์แบบ Double exponential ตามมาตรฐานของ IEC 60060-1(1989) [3] มีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด

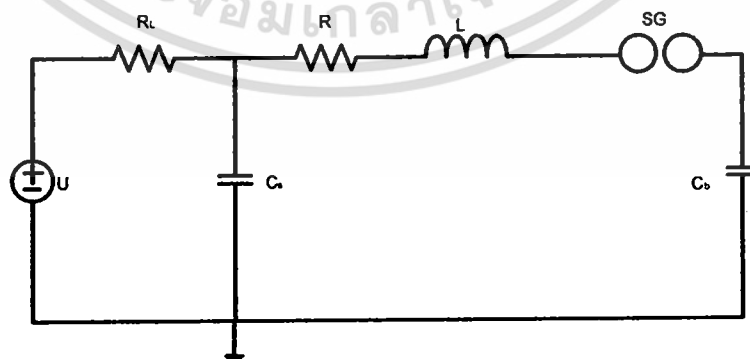
- 1)  $1/20 \mu\text{s}$  รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ  $1 \mu\text{s}$  และหางคลื่นเท่ากับ  $20 \mu\text{s}$
- 2)  $4/10 \mu\text{s}$  รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ  $4 \mu\text{s}$  และหางคลื่นเท่ากับ  $10 \mu\text{s}$
- 3)  $8/20 \mu\text{s}$  รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ  $8 \mu\text{s}$  และหางคลื่นเท่ากับ  $20 \mu\text{s}$
- 4)  $30/80 \mu\text{s}$  รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ  $30 \mu\text{s}$  และหางคลื่นเท่ากับ  $80 \mu\text{s}$

การวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ได้จากเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ จะต้องมีค่าความคลาดเคลื่อน ทั้งนี้ต้องอยู่ในขอบเขตตามมาตรฐานของ IEC 60060-2 (1989) [5] ที่ได้กำหนดไว้ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) เวลาหน้าคลื่น (Front time :  $T_1$ ) เวลาหน้าคลื่นจะคำนวณจาก 1.25 เท่าของเวลาในช่วงที่กระแสอิมพัลส์เพิ่มค่า 10% จนถึง 90% ของค่ายอดซึ่งจุดเริ่มต้นของกระแสอิมพัลส์ ( $O_1$ ) คือจุดระหว่างแกนนอนกับเส้นตรงที่ลากผ่านจุด 10% และ 90% ของค่ายอดที่ด้านหน้าคลื่น
- 2) เวลาหางคลื่น (Tail time :  $T_2$ ) เวลาหางคลื่นจะคำนวณเวลาจากจุดเริ่มต้นของกระแสอิมพัลส์จนถึงเมื่อกระแสอิมพัลส์สู่ค่า 50% ของค่ายอดเป็นครั้งแรก
- 3) จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์คือ จุดตัดระหว่างแกนนอน ( แกนเวลา ) กับเส้นตรงที่ลากผ่านระหว่างจุด 10% ของค่ายอดกระแสอิมพัลส์ และจุด 90% ของค่ายอดกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น

## 2.5 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ [4]

การสร้างกระแสอิมพัลส์ทำได้โดยอาศัยหลักการของวงจรทรานเซียนต์ (Transient) ซึ่งประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุ , ตัวต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำ, แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และในวงจรมีอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์คอนดักเตอร์เพื่อควบคุมการคายประจุของตัวเก็บประจุในช่วงเวลาสั้นๆ โดยมีหลักการทำงาน คือ ตัวเก็บประจุ  $C_0$  จะถูกอัดประจุหรือพลังงานไฟฟ้าเก็บไว้ แล้วทำการปล่อยให้ดิสชาร์จผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L$  จะเกิดการแกว่งของสัญญาณแบบหน่วง เพราะในตัวเหนี่ยวนำ  $L$  นั้นจะมีความต้านทานโดยธรรมชาติและถ้าวัสดุทดสอบมีความต้านทานด้วยก็จะทำให้เกิดการหน่วงมากขึ้น ฉะนั้นวงจรของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์พื้นฐานจึงเขียนได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

$U$  คือ แรงดันกระแสตรงที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุ

$R_L$  คือ ตัวต้านทานจำกัดกระแส

$C_s$  คือ ตัวเก็บประจุในวงจร

$R$  คือ ตัวต้านทานในวงจร

$L$  คือ ตัวเหนี่ยวนำในวงจร

$C_b$  คือ วัสดุทดสอบ

SG คือ สปาร์กแกป

การเกิดการแกว่งของสัญญาณกระแสของวงจรรูปที่ 2.7 จะเกิดการหน่วงเล็กน้อยจะขึ้นอยู่กับความต้านทานรวม  $R$  ในวงจร และค่าความเหนี่ยวนำรวม  $L$  ในวงจรค่ากระแสสูงสุดจะได้อันเมื่อค่า  $R$  ต่ำสุด คือ

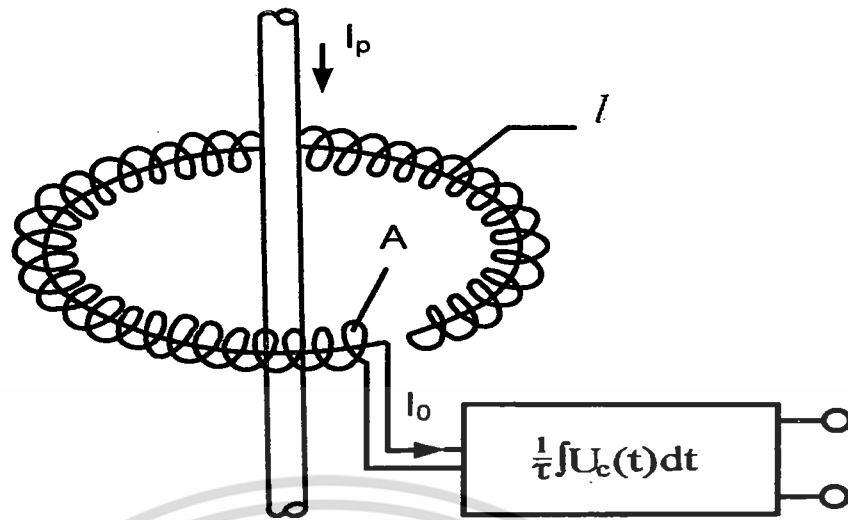
$$R \ll \frac{2L}{C} \quad (2.7)$$

## 2.6 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยโรกอฟสกีคอยล์ [4]

การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยวิธีที่เป็นวิธีการวัดแบบต่อผ่านตัวนำ (galvanic) จะมีขนาดใหญ่ตามขนาดกระแสใช้งาน มีความไม่สะดวกในการใช้งานหลายประการ และเป็นโหลดของวงจรวัด ในทางปฏิบัติจึงไม่นิยมใช้วิธีวัดกระแสอิมพัลส์ที่มีค่าสูง ๆ แต่จะใช้วัดด้วยอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถวัดกระแสอิมพัลส์ที่มีค่าสูง และมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลารวดเร็ว โดยใช้หลักการของหม้อแปลงกระแสแบบพิเศษ เรียกว่า โรกอฟสกีคอยล์ (Rogowski's coil)

### 2.6.1 หลักการวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยโรกอฟสกีคอยล์

การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยโรกอฟสกีคอยล์ เป็นการวัดกระแสโดยใช้หลักการของหม้อแปลงกระแส (CT) แบบพิเศษ กล่าวคือ โรกอฟสกีคอยล์เป็นอุปกรณ์ วัดกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งทำให้เกิดการสร้างเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กนี้ไปคล้องขดลวดที่พันรอบแกนที่ไม่เป็นแม่เหล็ก ที่วางอยู่รอบตัวนำที่มีกระแสที่ต้องการวัดไหลผ่านอยู่ จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่ปลายขดลวดคือ  $U_c(t)$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของกระแส  $di_p/dt$  ค่าแรงดันที่วัดจะเป็นสัดส่วนกับรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวนำนั้น ถ้านำแรงดันเหนี่ยวนำนี้ผ่านตัวอินทิเกรตที่เหมาะสม ก็จะได้รูปคลื่นกระแสที่ต้องการวัดอย่างถูกต้อง ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ขดลวดโรกออฟสกี

### 2.6.2 การพันขดลวดโรกออฟสกี [4]

การวัดกระแสอิมพัลส์ที่อาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก จะมีความถูกต้องก็ต่อเมื่อพื้นที่ภาคตัดขวาง และความถี่ของจำนวนรอบสม่ำเสมอตลอดช่วงความยาวแกน อีกประการหนึ่ง สนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดต้องมาจากแหล่งกำเนิดที่เกิดจากกระแสที่ต้องการวัดเพียงอย่างเดียว ไม่มีผลของสนามแม่เหล็กจากภายนอก ฉะนั้น เพื่อให้การวัดมีความถูกต้อง จึงต้องมีการพันโรกออฟสกีลักษณะพิเศษ คือ ต้องมีการพันย้อนกลับเข้าไปภายในขดอีกหนึ่งรอบดังรูปที่ 2.8 ทั้งนี้ เพื่อให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอกหักล้างกัน

ในรูปที่ 2.8 ขดลวดโรกออฟสกีคล้องตัวนำที่มีกระแสไหล  $I_p$  โดยอาศัยกฎของแอมแปร์ จะให้ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขดลวด ซึ่งอยู่ห่างจากตัวนำแนวรัศมีเท่ากับ  $x$  คือ

$$H_x = \frac{I_p}{2\pi x} \quad (2.8)$$

ขดลวดวางอยู่ในอากาศ จะให้ความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็ก ณ จุดนั้น คือ

$$B = \mu_0 H_x = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi x} \quad (2.9)$$

ถ้าขดลวดมีพื้นที่ตัดขวางเท่ากับ  $A$  จึงหาค่า ฟลักซ์แม่เหล็ก ที่วิ่งผ่านคล้องขดลวด ซึ่งมีจำนวนรอบทั้งหมด  $N$  รอบ และมีความยาวเท่ากับ  $l = 2\pi x$  ได้คือ

$$\phi = \frac{\mu_0 A I_p}{l} \quad (2.10)$$

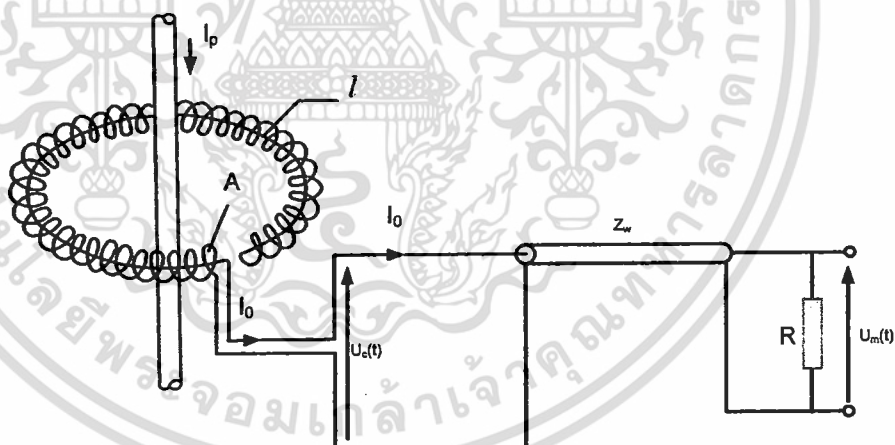
และโดยอาศัยกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ จะหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำบนขดลวดจำนวน  $N$  รอบได้

$$U_c(t) = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{N\mu_0 A}{l} \frac{di_p}{dt}$$

$$U_c(t) = M \frac{di_p}{dt} \quad (2.11)$$

โดยที่  $M = \frac{N\mu_0 A}{l}$  คือความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดโรกอฟสกีกับตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน  $I_p$  จากสมการที่ 2.9 จะพบว่า การวัดกระแสอิมพัลส์ของโรกอฟสกีคอยล์ขึ้นกับอิมพีแดนซ์ขาออก ที่นำมาต่อเข้ากับโรกอฟสกีคอยล์ ซึ่งเป็นวงจรอินทิเกรทที่เป็นพาสซีฟ ในทางปฏิบัติที่ใช้กันมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบ LR อินทิเกรเตอร์ และแบบ RC อินทิเกรเตอร์

1) LR อินทิเกรเตอร์จะมีโหลดเป็น  $R$  ซึ่งมีค่าต่ำ เมื่อเทียบกับค่าเสรีจอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โรกอฟสกีคอยล์ต่อด้วย LR อินทิเกรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหมายในรูปวงจร

$U_c(t)$  = แรงดันเหนี่ยวนำ

$L_c$  = ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอฟสกีคอยล์

$R_c$  = ความต้านทานของขดลวดโรกอฟสกีคอยล์

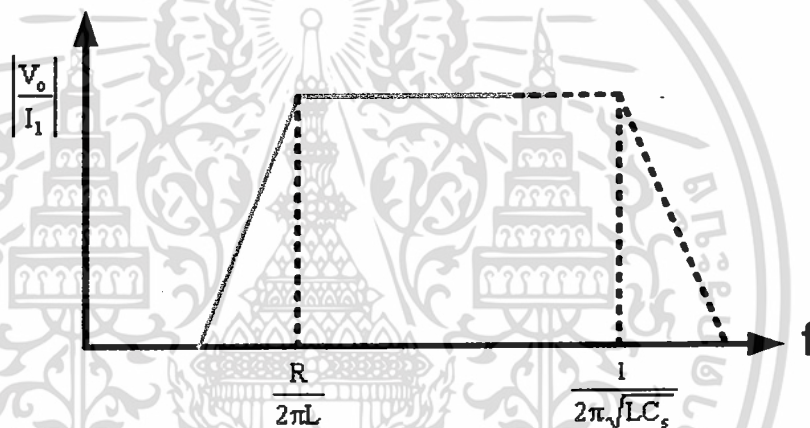
$R$  = ความต้านทานโหลด

$Z_w$  = เสรีจิมพีแดนซ์ของสายวัดและความต้านทานสมคู่กัน

$U_m(t)$  = แรงดันที่วัดได้

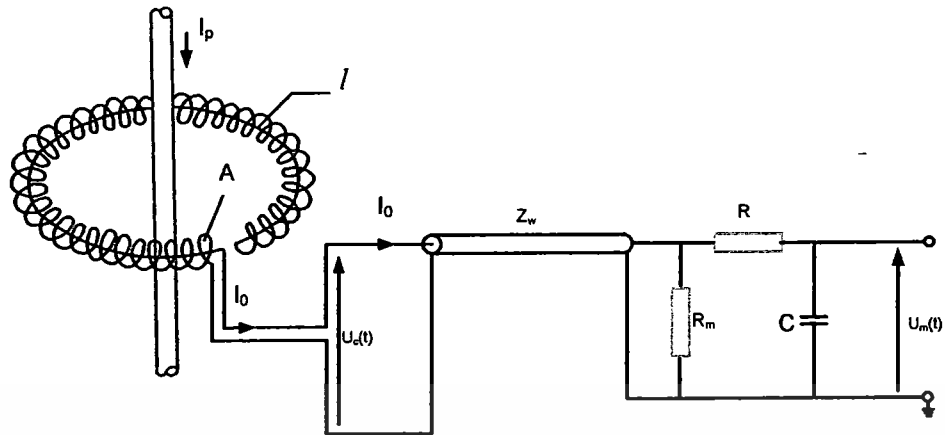
การต่อด้วย LR อินทิเกรเตอร์ มีขีดจำกัดความถี่ต่ำ  $\omega L \gg (R + R_c)$  แรงดันที่วัดได้  $U_m(t)$  จะสามารถวัดกระแสในตัวนำที่ต้องการวัดได้จากความสัมพันธ์

$$U_m = \frac{R}{L_c} M i_p(t) \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.10 ผลตอบสนองความถี่ LR อินทิเกรเตอร์

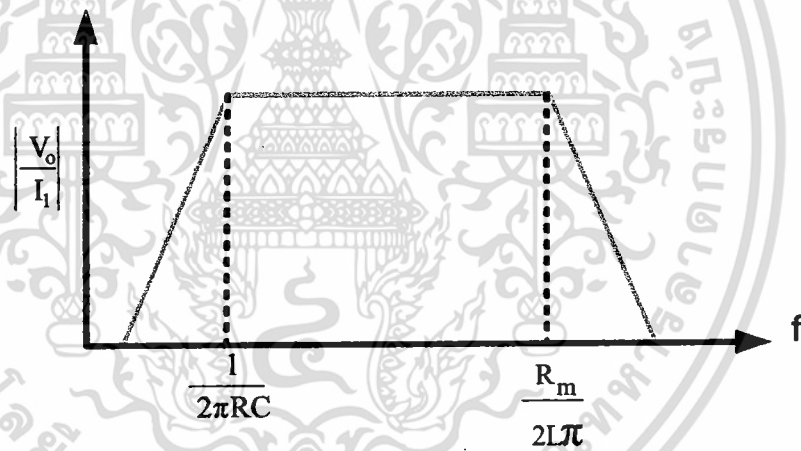
2) RC อินทิเกรเตอร์ จะเป็นวงจรที่มีความต้านทานสูง ( $R \gg Z_w$ ) ต่ออันดับอยู่กับตัวเก็บประจุ แล้ววัดแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C ดังรูปที่ 2.11 โดยมีเงื่อนไข  $\omega L \ll Z_w$  และ  $\frac{1}{\omega C} \ll R$ , โดยที่  $R_m$  เป็นความต้านทานแมชชิงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โรกอฟสกีคอยล์ต่อด้วย RC อินทิเกรเตอร์

การต่อโรกอฟสกีคอยล์ด้วย RC อินทิเกรเตอร์ จะมีขีดจำกัดความถี่ล่างและบนเป็นความถี่แถบผ่านแรงดันที่วัดได้  $U_m(t)$  จะหาค่ากระแสที่ต้องการวัดได้จากความสัมพันธ์

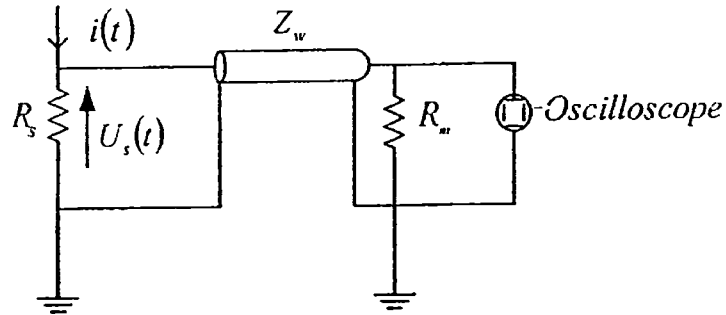
$$U_m = \frac{M}{RC} i_p(t) \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.12 ผลตอบสนองความถี่ RC อินทิเกรเตอร์

### 2.7 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยตัวต้านทานชั้นที่ [4]

ตัวต้านทานชั้นที่ในที่นี้หมายถึง ตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานต่ำๆ และทราบค่าถูกต้องแน่นอน ใช้สำหรับวัดกระแสอิมพัลส์ โดยให้กระแสอิมพัลส์ที่ต้องการจะวัดไหลผ่านตัวต้านทานชั้นที่ จากนั้นวัดแรงดันที่ตกคร่อม (Voltage drop) ตัวต้านทานชั้นที่ด้วยออสซิลโลสโคป โดยสัญญาณของแรงดันที่วัดได้ จะถูกส่งผ่านเคเบิลวัดแกนร่วม (Coaxial cable) ที่มีตัวต้านทานสมมูลกัน ( $R_m$ ) ต่อที่ปลายสายเคเบิลขนานกับออสซิลโลสโคปดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ด้วยตัวต้านทานชั้นที่

เมื่อ	$R_s$	คือ	ตัวต้านทานชั้นที่
	$Z_w$	คือ	ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล
	$R_m$	คือ	ตัวต้านทานสมคู่

จากรูปวงจรที่ 2.13 ถ้าหากตัวต้านทานชั้นที่มีคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานล้วน และไม่คิดถึงค่าของเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล ( $Z_w$ ) เพราะ ( $R_s \ll Z_w$ ) จึงสามารถอาศัยกฎของโอห์มในการหาค่ากระแสได้คือ

$$i(t) = \frac{U_s(t)}{R_s} \quad (2.14)$$

ตัวอย่างเช่นเมื่อมีกระแสอิมพัลส์ไหลผ่านตัวต้านทานชั้นที่มีความต้านทาน  $1 \text{ m}\Omega$  สามารถวัดแรงดัน

$$U_x(t) = 100 \text{ V}$$

ดังนั้นสามารถที่จะคำนวณกระแสอิมพัลส์ได้มีค่า  $i(t) = \frac{U_s(t)}{R_s} = 100 \text{ kA}$

ในการวัดกระแสอิมพัลส์ซึ่งเป็นกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณรูปคลื่นของกระแสอย่างรวดเร็ว (มีความถี่สูง,  $\omega$ ) ดังนั้นผลของ Stray Capacitance เท่ากับ  $\frac{1}{\omega C}$  แต่จะมีค่าที่น้อยมาก ซึ่งจะไม่มีผลต่อระบบวัดมากนัก แต่ผลของสนามแม่เหล็กตกค้าง (Stray magnetic) ซึ่งจะมีค่า Reactance เท่ากับ  $\omega L$  จะส่งผลต่อรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป

ในทางปฏิบัติเมื่อกระแสไหลผ่านตัวต้านทานชั้นที่จะเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ดังนั้นแรงดันตกคร่อมจริงจะเป็นไปตามสมการ

$$V(t) = R_s i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (2.15)$$

เพราะฉะนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบตัวต้านทานชั้นนี้ก็คือทำให้  $L$  มีค่าน้อยที่สุด เนื่องจาก เป็นส่วนที่เราไม่ต้องการวัด ซึ่งถ้าไม่คำนึงถึงค่า  $L$  ส่วนของ  $L \frac{di(t)}{dt}$  ก็จะเป็นค่าความผิดพลาดของการวัดที่ประกอบขึ้นเป็นค่า  $V(t)$

## 2.8 เทคนิคการพันความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ [6]

### 2.8.1 ทฤษฎี

การที่จะศึกษาถึงวิธีการพันความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำนั้น เราควรทราบนิยามและคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำดังต่อไปนี้ คือ ความเหนี่ยวนำ นิยามคือ "อัตราส่วนของค่าการเชื่อมโยงฟลักซ์ (flux linkage) ผลรวมต่อกระแส  $I$  ที่คล้องเกี่ยวกับฟลักซ์ในตัวเหนี่ยวนำ" ซึ่งเมื่อเขียนเป็นสูตรก็คือ

$$L = \frac{\phi}{I} \quad (2.16)$$

ค่าการเชื่อมโยงฟลักซ์ จะมีค่าแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของตัวเหนี่ยวนำในกรณีขดลวดซึ่งมีจำนวนรอบของวงเส้นลวดเป็น  $N$  และมีฟลักซ์แม่เหล็ก  $\phi$  ผ่านวงของขดลวด ค่าการเชื่อมโยงฟลักซ์เป็น

$$\phi = N\lambda \quad (2.17)$$

สนามแม่เหล็กของตัวเหนี่ยวนำในขณะที่มีกระแส  $I$  ไหลผ่านมีค่าเป็น

$$W = \frac{1}{2} \times LI^2 \quad (2.18)$$

จากสมการข้างบนนี้ให้สูตรสำหรับคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ  $L$  ได้คือ

$$L = \frac{2W}{I^2} \quad (2.19)$$

สำหรับค่าความเหนี่ยวนำที่เป็นขดลวดดังรูป 2.14 นี้ เราสามารถหาความเหนี่ยวนำได้ง่ายคือ

$$L = \frac{\mu N^2 \pi A^2}{\ell} \quad (2.20)$$

$\mu$  = Permeability ของขดลวดความต้านทาน (H/m)

$l$  = ความยาวของขดลวด (m)

$A$  = รัศมีของพื้นที่หน้าตัดทรงกระบอกขดลวด (m)

$N$  = จำนวนรอบของขดลวด



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการพันความเหนียวนา

จะเห็นว่าเมื่อเราให้รูปทรงทางเรขาคณิตของขดลวดเป็นทรงกระบอกดังในรูปที่ 2.14 โดยมีค่าความยาวของกระบอก และรัศมีเท่ากันแล้ว ค่าความเหนียวนาจะขึ้นกับจำนวนรอบเท่านั้น ดังนั้นอาศัยหลักการนี้เราจะสร้างค่าความเหนียวนาที่มีทิศทางสนามแม่เหล็กตรงกันข้ามมาเสริมขดลวดเป็นชั้นที่ 2 ถ้าขนาดความหนาของขดลวดชั้นที่สองน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวแล้ว เมื่อให้จำนวนรอบของการพันขดลวดชั้นที่สองเท่ากับชั้นแรก จะทำให้ความเหนียวนารวมมีค่าเป็นศูนย์

### 2.8.2 การคำนวณขนาดของเส้นลวดและเอ็นฉนวน

การคำนวณขนาดของเส้นลวดจะต้องทราบค่าความต้านทานของเส้นลวดที่จะนำมาใช้งานก่อน โดยดูจากตารางคุณสมบัติของเส้นลวดจากทางร้านที่จำหน่ายจึงจะสามารถหาขนาดของเส้นลวดได้ โดยกำหนดให้

- พัน 2 ชั้น ดังนั้นความต้านทานแต่ละชั้นเท่ากับ  $2R$
- จำนวนรอบของแต่ละชั้นคำนวณจาก

$$N = 2R \text{ (โอห์ม/เมตร)} \quad (2.21)$$

- ค่าความยาวของขดลวด  $N$  รอบ รวมกับจำนวนเส้นเอ็น  $N$  รอบ  
หมายเหตุ ลวด 1 เส้นใช้เส้นเอ็น 1 เส้นพันขนานกันไป จะต้องไม่ให้เกินไม่เกินความยาวของกระบอกฉนวน กำหนดให้มีความยาวประมาณ 32 cm

ให้  $\phi_1$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดที่ใช้ (cm)  
 $\phi_2$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นเอ็น (cm)  
 และใช้ความยาวของลวดทั้งหมดจะได้สมการ

$$\text{ความยาวของลวดทั้งหมด} = N(\phi_1 + \phi_2) \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

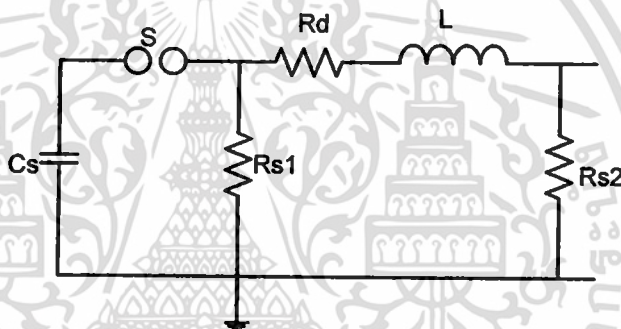
เราสามารถหาขนาดของเส้นและเอ็นได้ตามต้องการ โดยต้องอยู่ในเงื่อนไขของสมการที่ 2.22

## 2.9 มาตรฐานในการทดสอบ IEC 61000-4-5 [1]

ในการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5[1] นั้นแบ่งการทดสอบเป็นหลายระดับหลายชนิดในที่นี้เราจะสนใจเพียงการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์เครื่องผสม และทดสอบแบบอุปกรณ์ทดสอบต่อกับแหล่งจ่ายไฟ

### 2.9.1 เครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม (1.2/50 $\mu$ s, 8/20 $\mu$ s)

วงจรอย่างง่ายของเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสมแสดงตามรูปที่ 2.15 ค่าของ R, L และ C นั้นจะหาจากการ Simulate ให้ได้รูปคลื่นแรงดันขณะเปิดวงจรเป็น 1.2/50 $\mu$ s และรูปคลื่นกระแสขณะลัดวงจรเป็น 8/20  $\mu$ s โดยที่เครื่องกำเนิดนี้จะมีอิมพีแดนซ์ขาออกที่ 2 โอห์ม



รูปที่ 2.15 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์คลื่นผสม

การหาค่าอิมพีแดนซ์สามารถหาได้จากอัตราส่วนของค่าสูงสุดของแรงดันกับค่าสูงสุดของกระแส โดยปกติรูปคลื่นแรงดันและกระแสจะขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่นำมาทดสอบด้วยค่าอิมพีแดนซ์นี้อาจเปลี่ยนไปเมื่อทดสอบกับอุปกรณ์ทดสอบที่แตกต่างกัน

### 2.9.2 ลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม

ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5[1] นั้นเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสมจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

#### แรงดันขณะเปิดวงจร

ขนาดแรงดัน	0.5kV – 4.0 kV
ลักษณะรูปคลื่น	1.2/50 $\mu$ s (ดูรูปที่ 2.16)
ความคลาดเคลื่อน	$\pm 10$ %

### กระแสขณะลัดวงจร

ขนาดกระแส	0.25 kA – 2.0kA
ลักษณะรูปคลื่น	8/20 $\mu$ s (ดูรูปที่ 2.17)
ความคลาดเคลื่อน	$\pm 10$ %
ชั่ว	บวก/ลบ
มุมเฟส	0 - 360° ของแรงดันแหล่งจ่ายไฟ
อัตราการทดสอบ	อย่างต่ำ 1 ครั้งต่อนาที

และเครื่องกำเนิดควรมีชั่วขาออกไม่ต่อกับดิน

### 2.9.3 การทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม

ก่อนการใช้งาน เราจะต้องมีการทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสมก่อน เราจะทดสอบโดยต่อชั่วขาออกของเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสมกับเครื่องมือวัดที่มีแบนด์วิดท์ที่เพียงพอ และสามารถวัดระดับแรงดันที่ทดสอบได้ เครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์คลื่นผสมนี้ควรมีวัตต์แรงดันขณะเปิดวงจรโดยมีโหลดมากกว่าหรือเท่ากับ 10k $\Omega$  โดยได้รูปคลื่นตามมาตรฐาน และวัดกระแสลัดวงจรโดยมีโหลดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.1k $\Omega$  ได้รูปคลื่นตามมาตรฐาน ที่ระดับแรงดันขาร์จเท่ากัน จะมีค่าอิมพีแดนซ์ประมาณ 2  $\Omega$

ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5[1] นั้นเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์คลื่นผสมนี้จะมีอิมพัลส์แรงดันสูงสุดที่ 4.0kV และอิมพัลส์กระแสสูงสุด 2.0kA เท่านั้น แต่สำหรับโครงการนี้เราจะทดสอบที่แรงดัน 6.0 kV และ 3.0 kA

### 2.9.4 ข้อกำหนดสภาวะการทดสอบ

ในการทดสอบนั้นแต่ละสถานที่แต่ละเวลาอาจมีค่าสภาวะอากาศ หรือสิ่งแวดล้อมไม่เหมือนกัน ซึ่งอาจจะมีผลต่อการทดสอบได้ ดังนั้นจึงมีการกำหนดมาตรฐานของสภาวะอากาศและสภาวะแวดล้อมคือ

- อุณหภูมิ 15 °C ถึง 35 °C
- ความชื้นสัมพัทธ์ 10% ถึง 75%
- ความดันบรรยากาศ 86kPa ถึง 106kPa (860 ถึง 1,060 mbar)

และ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนไม่ควรมีผลต่อการทดสอบ

### 2.9.5 รูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน [1]

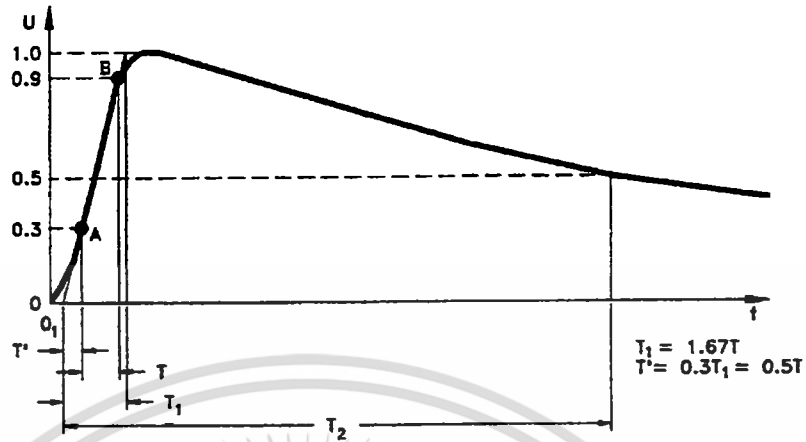
เครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์คลื่นผสมจะต้องสร้างแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานคือ ขณะเปิดวงจรจะต้องสร้างแรงดันรูปคลื่น 1.2/50  $\mu$ s โดย

หน้าคลื่น  $1.2 \pm 0.36 \mu$ s,

หลังคลื่น  $50 \pm 10 \mu$ s

มีเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ คือ  $1.67 \times (t_{90} - t_{30})$  โดย  $t_{90}$  คือ เวลาที่แรงดันอิมพัลส์เพิ่มขึ้น 90% ของค่ายอด และ  $t_{30}$  คือ เวลาที่แรงดันอิมพัลส์เพิ่มขึ้น 30% ของค่ายอด

เวลาช่วงหางคลื่น ( $T_2$ ) คือ ช่วงเวลาดังแต่แรงดันอิมพัลส์เริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่า ยอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานขณะเปิดวงจร

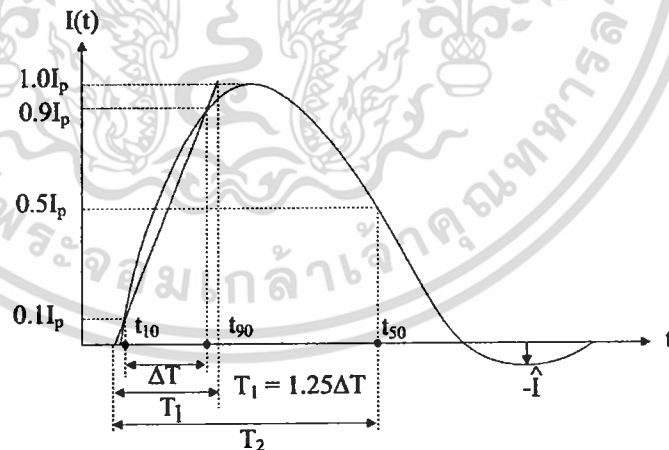
และขณะลัดวงจรจะต้องสร้างกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s โดย

หน้าคลื่น  $8 \pm 1.6 \mu$ s,

หลังคลื่น  $20 \pm 4 \mu$ s

มีเวลาหน้าคลื่นกระแสอิมพัลส์ คือ  $1.25 \times (t_{90} - t_{10})$  โดย  $t_{90}$  คือ เวลาที่กระแสอิมพัลส์ เพิ่มขึ้น 90% ของค่ายอด และ  $t_{10}$  คือ เวลาที่กระแสอิมพัลส์เพิ่มขึ้น 10% ของค่ายอด

เวลาหางคลื่น คือ ช่วงเวลาดังแต่กระแสอิมพัลส์เริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดกระแส อิมพัลส์ จนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดกระแสอิมพัลส์ ดังรูปที่ 2.17



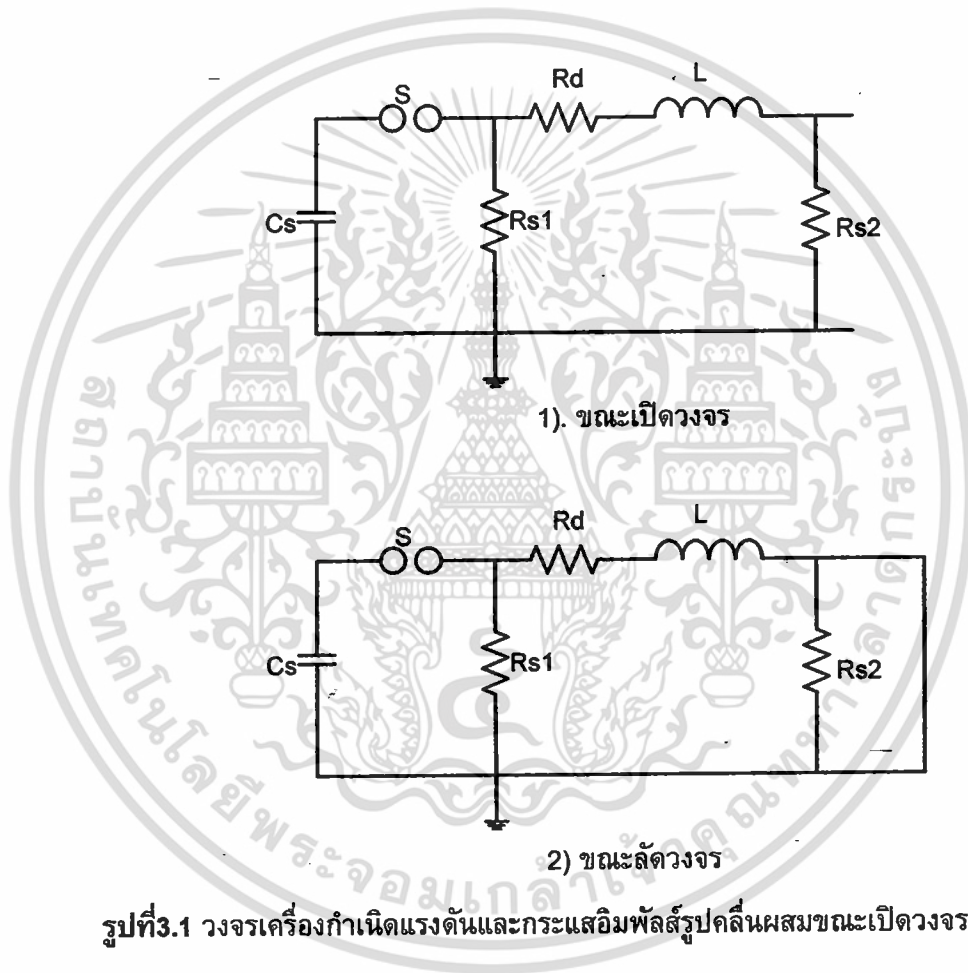
รูปที่ 2.17 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐานขณะลัดวงจร

### บทที่ 3

## การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม 6 kV 3kA

### 3.1 การออกแบบวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม [8]

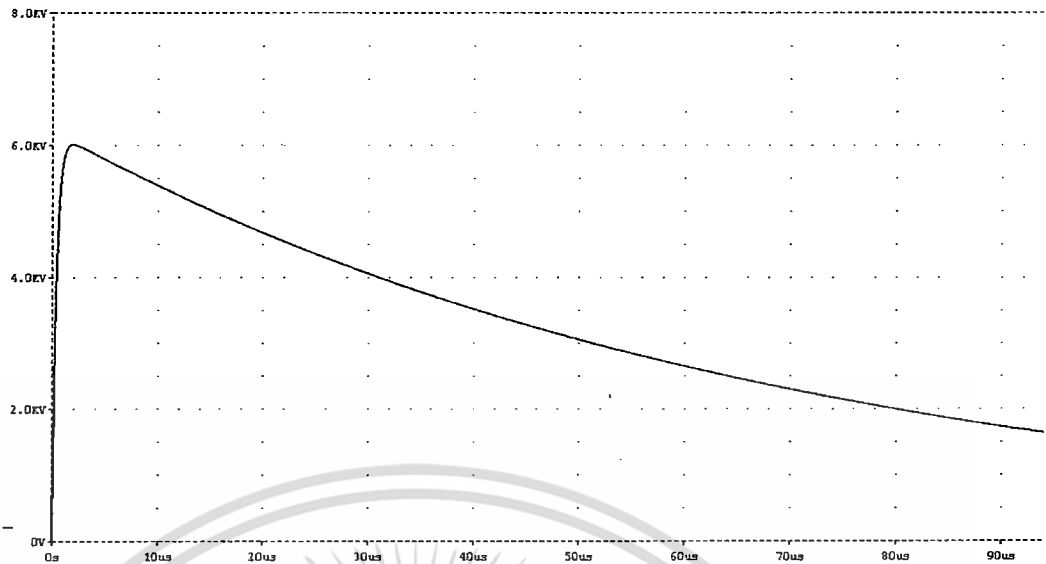
จากลักษณะวงจรที่ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5[1] จะหาค่า R, L, C ได้จากการจำลอง โดยใช้โปรแกรมไมโครซิม (MicroSim) ซึ่งจะแสดงรูปวงจร ดังรูปที่ 3.1



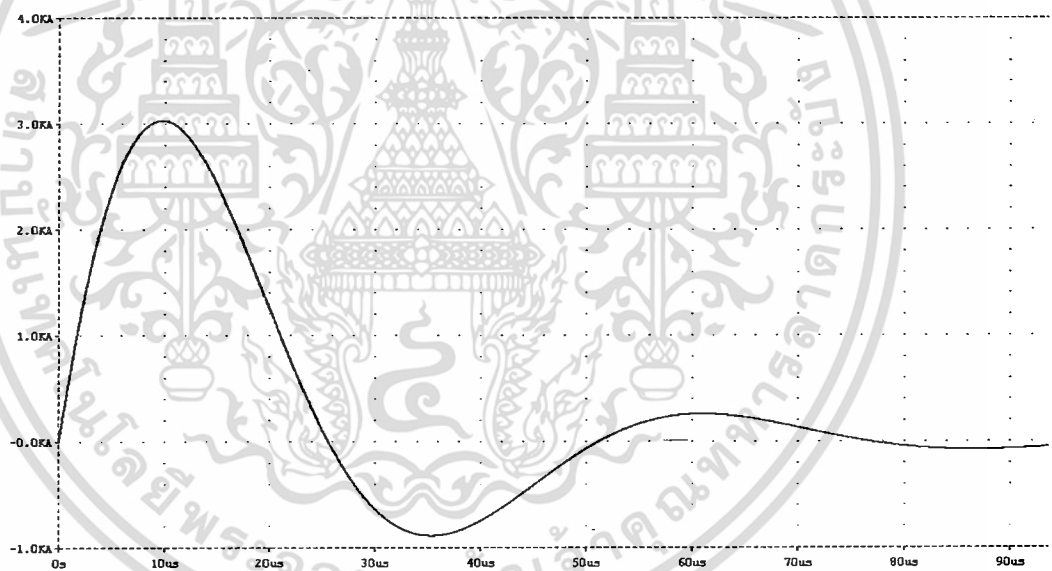
รูปที่ 3.1 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสมขณะเปิดวงจรถอร์และลัดวงจรถอร์

หลักการทำงานของวงจรคือเมื่อชาร์จประจุให้ตัวเก็บประจุ  $C_s$  ที่แรงดัน 6.375 kV ขณะเปิดวงจรถอร์ตัวเก็บประจุ  $C_s$  ทำการดีสชาร์จผ่าน  $L$ ,  $R_{s1}$ ,  $R_d$ ,  $R_{s2}$  โดยจะวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_{s2}$  ได้ค่า  $1.2/50 \mu s$  ที่ค่ายอดของแรงดัน 6 kV แสดงตามรูปที่ 3.2 และขณะลัดวงจรถอร์ก็ชาร์จตัวเก็บประจุ  $C_s$  ที่แรงดัน 6.375 kV และตัวเก็บประจุ  $C_s$  ทำการดีสชาร์จผ่าน  $L$ ,  $R_{s2}$ ,  $R_d$  ซึ่งจะวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ผ่านตัวต้านทาน  $R_d$  ได้ค่า  $8/20 \mu s$  ที่ค่ายอดของกระแส 3 kA แสดงตามรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขนาด 6 kV ที่ได้จากการจำลองโดยป้อนแรงดัน  
อัตรา 6.375 kV

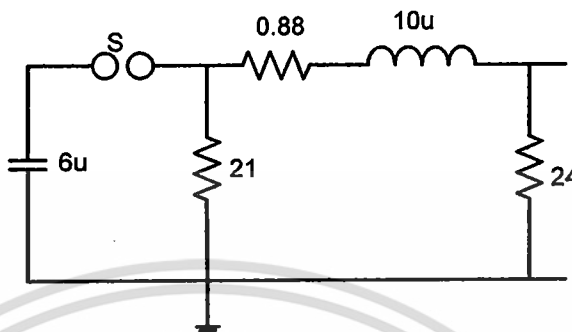


รูปที่ 3.3 แสดงรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ขนาด 3 kA ที่ได้จากการจำลองโดยป้อนแรงดัน  
อัตรา 6.375 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การคำนวณค่าความต้านทานของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม [8]

ในการหาค่าความต้านทานของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม จะหาค่าได้จากการจำลอง จากโปรแกรม Microsim



รูปที่ 3.4 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม

โดยมีรูปวงจรแสดงดังรูปที่ 3.4 โดยในการออกแบบนั้นจะเลือกค่า  $C_s$  ก่อน โดยค่า  $C_s$  ที่เลือกนั้นจะต้องสามารถปล่อยพลังงานให้กับ  $R_{s1}$ ,  $R_d$ ,  $L$  ในขณะลัดวงจร โดยจะต้องได้รูปกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน  $8/20 \mu s$  และในขณะที่เปิดวงจรจะต้องคายพลังงาน แล้วทำให้รูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน  $1.2/50 \mu s$  โดยค่า  $C_s$  ที่เลือกจะมีค่าเท่ากับ  $6 \mu F$

หลังจากได้ค่า  $C_s$  ที่ต้องการแล้วก็ทำการเปลี่ยนค่า  $R_{s1}$ ,  $R_{s2}$ ,  $R_d$ ,  $L$  ไปจนกระทั่งได้รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์  $8 \pm 20\%$ ,  $20 \pm 10\% \mu s$  และรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์  $1.2 \pm 30\%$ ,  $50 \pm 20\% \mu s$  จากการใช้โปรแกรม microsim จะได้ค่าดังนี้

$$R_{s1} = 21 \Omega, R_d = 0.88 \Omega, R_{s2} = 24 \Omega, L = 10 \mu H$$

### 3.2 การออกแบบตัวต้านทาน [6]

- ข้อกำหนดในการออกแบบตัวต้านทาน-

ในเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสมจะสร้างแรงดันได้สูงสุดที่ 6 kV ในขณะที่เปิดวงจรและสร้างกระแสอิมพัลส์ได้สูงสุดที่ 3 kA ในขณะปิดวงจร ดังนั้นตัวต้านทานที่ออกแบบจะต้องทนได้โดยไม่เกิดการเบรกดาวน์หรือเกิดการเสียหายขึ้น เนื่องจากกระแสสูงสุดไหลผ่านและค่าความต้านทานจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากกระแสไหลผ่านมีค่าสูง

- เงื่อนไขของการออกแบบ

องค์ประกอบความต้านทานแรงดันสูงจะมีเทคนิคแตกต่างไปจากความต้านทานแรงดันต่ำ โดยที่จนวนองค์ประกอบของความต้านทานแรงดันสูงนั้นจะต้องทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และในการออกแบบจะต้องพิจารณาการจนวนและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยรอบองค์ประกอบย่อย รวมทั้งการจนวนภายนอกของความต้านทาน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ

ชนิดของแรงดัน โดยการออกแบบนั้นจะใช้อากาศเป็นฉนวน ซึ่งการฉนวนด้วยอากาศตามความยาวของความต้านทานที่สภาวะห้องจะประมาณได้ดังนี้

ความยาวตามผิวฉนวนที่ใช้ภายในอาคาร โดยที่เป็นผิวเรียบจะใช้ความยาวจำเพาะดังนี้

ความยาวตามผิวฉนวนสำหรับแรงดันกระแสสลับ = 5 m / MV

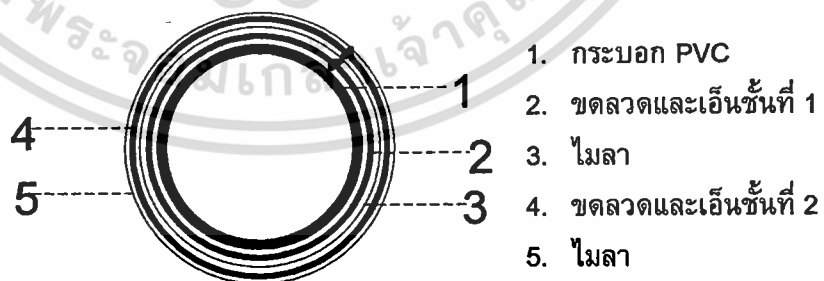
ความยาวตามผิวฉนวนสำหรับแรงดันอิมพัลส์ = 2.5 m / MV

ดังนั้นสำหรับองค์ประกอบความต้านทานสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ขนาดแรงดัน 6 kV จะต้องมีความยาวอย่างน้อยขนาด 1.5 cm ดังนั้นจะเลือกใช้ขนาดความยาวกระบอกพีวีซีให้มีค่ามากกว่า 1.5 cm

#### - ความต้านทาน $R_{s1}, R_d, R_{s2}$

ในการออกแบบความต้านทาน  $R_{s1}, R_d, R_{s2}$  จะต้องเป็นความต้านทานแบบไร้ความเหนียวน้ำ เนื่องจากค่าความต้านทาน  $R_d, R_{s2}$  เป็นตัวปรับช่วงเวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ และความต้านทาน  $R_{s1}$  จะเป็นตัวปรับเวลาช่วงหางคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ จะเห็นว่าตัวต้านทาน  $R_d$  จะมีผลต่อช่วงเวลาหน้าคลื่นและช่วงเวลาหลังคลื่นของกระแสอิมพัลส์ ดังนั้นในการออกแบบตัวต้านทานทั้งสามตัวนี้จะต้องทำให้มีค่าความเหนียวน้ำน้อยที่สุดหรือไม่ให้มีเลย เพื่อไม่ให้เกิดการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ โดยในการออกแบบวิธีการพันนั้นเลือกใช้วิธีการพันแบบพันสวนทิศทางกันเพื่อให้ฟลักซ์แม่เหล็กหักล้างกันเป็นศูนย์ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดค่าเหนียวน้ำขึ้น โดยวิธีออกแบบการพันจะมีทั้งหมด 3 วิธี

1. การพันโดยใช้ไนเกิล – โครเมียม (NiCr) เป็นขดลวดความต้านทานแล้วพันใส่กระบอก PVC โดยใช้เอ็นเป็นฉนวนกันระหว่างขดลวดต้านทานโดยก่อนที่จะพันใส่ PVC นั้นจะต้องหุ้ม PVC ด้วยไมลาก่อนเพื่อใช้ระบายความร้อนให้แก่ PVC เนื่องจาก PVC จะมีคุณสมบัติที่ระบายความร้อนได้ไม่ดี โดยการพันนั้นจะพันเป็นสองชั้นโดยให้แต่ละชั้นต่อกันแบบขนานและพันสวนทิศทางกันเพื่อให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นหักล้างกันเป็นศูนย์หลังจากพันเสร็จแล้วก็พันไมลาหุ้มไว้อีกรอบเพื่อเป็นการระบายความร้อนและป้องกันฝุ่นหรือสิ่งสกปรกที่จะเข้ามายังเอ็นและขดลวดซึ่งอาจทำให้เกิดการลัดวงจรในระหว่างรอบได้ซึ่งรูปในการพันจะแสดงดังรูปที่ 3.5



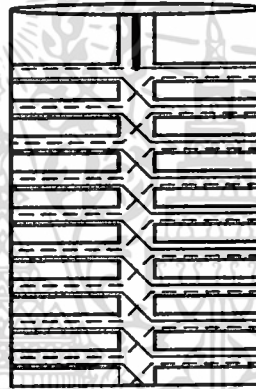
รูปที่ 3.5 รูปการพันขดลวดความต้านทานในลักษณะพันสวนทิศทางกันแบบที่ 1

2. การพันด้วยขดลวดนิเกิล-โครเมียม (NiCr) ชูบนวนวานิสเป็นขดลวดความต้านทาน โดยจะพันใส่ท่อPVCโดยทำการกลิ้งท่อPVCให้มีร่องพอที่จะใส่ขดลวดได้สองเส้น ในแต่ละร่องที่กลิ้งจะต้องมีระยะห่างเท่า ๆ กัน โดยด้านข้างของท่อPVCจะทำการบากร่องไว้ เพื่อใช้สำหรับพันลวดขึ้นไปร่องใหม่ วิธีการพันจะมีวิธีทำดังต่อไปนี้

-ขั้นแรกนำขดลวดความต้านทาน ( NiCr ) ไปชูบนวนวานิสก่อน

-จากนั้นทำการตีเกลียวขดลวดความต้านทานโดยใช้สองเส้นเพื่อทำให้ขดลวดความต้านทานต่อขนานกัน

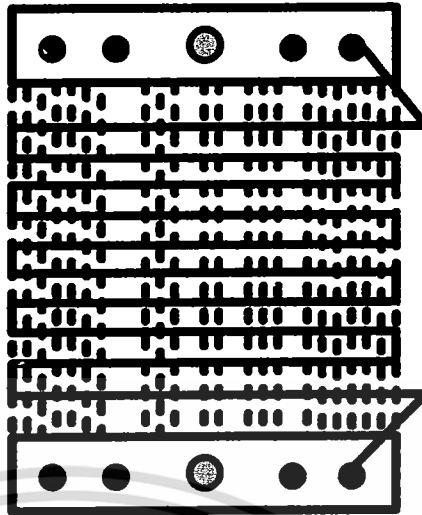
-แล้วทำการพันขดลวดความต้านทานใส่ในร่องที่กลิ้งไว้โดยให้พันในทิศทางตรงข้ามกัน และเมื่อพันครบรอบก่อนที่จะพันขึ้นร่องใหม่ให้ทำการไขว้ขดลวดความต้านทานเพื่อเป็นการทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นหักล้างกันมากที่สุดเพื่อไม่ให้เกิดความเหนียวนำเลย จากนั้นก็พันไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้จำนวนรอบที่ต้องการ ซึ่งวิธีการพันจะแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 รูปการพันขดลวดความต้านทานในลักษณะพันสวนทิศทางกันแบบที่ 2

- โดยที่
1. ขดลวดเส้นที่ 1 แทนด้วย \_\_\_\_\_
  2. ขดลวดเส้นที่ 2 แทนด้วย \_\_\_\_\_
  3. ขดลวดเส้นตีเกลียวแทนด้วย \_\_\_\_\_

3. การพันขดลวดความต้านทานที่ใช้นิเกิล-โครเมียม (NiCr) เป็นขดลวดความต้านทาน โดยวิธีการพันในแบบที่ 3 นี้จะใช้เส้นด้ายและอากาศเป็นฉนวน โดยวิธีการพันจะพันเป็นชั้นๆ แบบพับเพื่อจะให้กระแสไหลในทิศทางตรงข้ามกัน เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กที่หักล้างกันเพื่อทำให้ไม่เกิดความเหนียวนำขึ้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.7

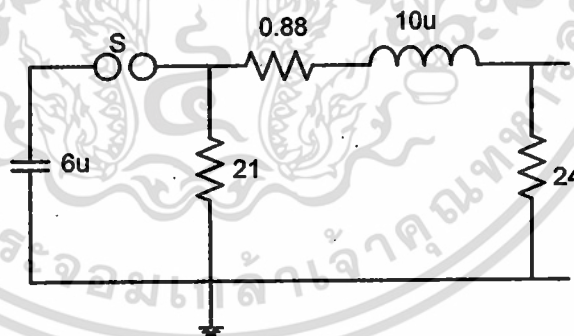


รูปที่ 3.7 รูปการพันขดลวดความต้านทานในลักษณะพื้นสวนทิศทางกันแบบที่ 3

----- แทนด้วย เส้นด้าย  
 ————— แทนด้วย ลวดความต้านทาน

- ความต้านทานที่ออกแบบไว้สำหรับเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม [6]

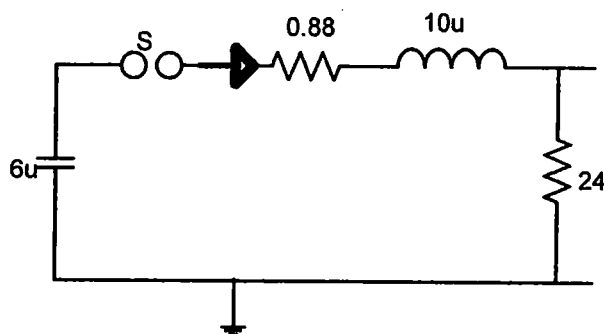
จะพิจารณาจากวงจรสมมูลในกรณีสร้างแรงดันอิมพัลส์ซึ่งอยู่ในกรณีที่เปิดวงจรหรือสร้างแรงดันอิมพัลส์ซึ่งแสดงตามรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 รูปวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม ในกรณีเปิดวงจร

กรณีที่สร้างแรงดันอิมพัลส์ช่วงหน้ารูปคลื่น โดยรูปคลื่นมาตรฐาน  $1.2/50\mu s$

จะพิจารณาวงจรสมมูลหน้าคลื่นของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม โดยจะพิจารณาที่กระแสสูงสุดที่ไหลผ่านความต้านทาน  $R_d$  และ  $R_{s2}$  ตามรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลหน้าคลื่นของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม ที่ขณะเปิดวงจร พิจารณาที่ช่วงหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์

จากรูปที่ 3.9 จะพิจารณาได้ว่าที่แรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_{s2}$  เท่ากับ 6 kV ดังนั้นกระแสสูงสุดที่ผ่านตัวต้านทาน  $R_{s2}$  จะคำนวณได้ดังต่อไปนี้

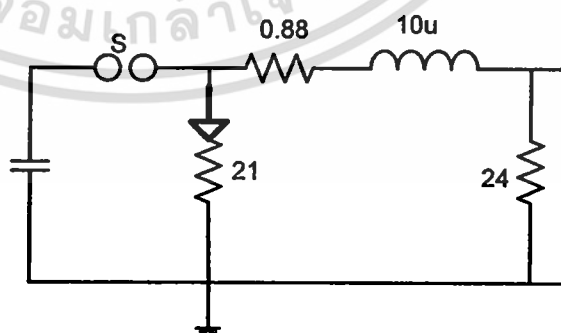
$$I_{1\max} = \frac{U_0}{R_{s2}} \quad (3.1)$$

$$I_{1\max} = \frac{6 \text{ kV}}{24 \Omega} \quad \text{จาก } R_{s2} = 24 \Omega$$

$$I_{1\max} = 250 \text{ A}$$

ซึ่งในขณะเดียวกันกระแสสูงสุดที่ไหลผ่าน  $R_d$  ก็จะมีค่าเท่ากับ 250 A เหมือนกัน เนื่องจากในกรณีสร้างรูปคลื่นแรงดันช่วงหน้าคลื่น  $R_d$  และ  $R_{s2}$  จะต่ออนุกรมกัน แต่เนื่องจาก  $R_d$  จะต้องใช้ในกรณีที่ลัดวงจรหรือสร้างกระแสอิมพัลส์ ดังนั้นจึงพิจารณากระแสสูงสุดที่ไหลผ่าน  $R_d$  ในกรณีลัดวงจร

จะพิจารณาวงจรสมมูลทางคลื่นของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม โดยจะพิจารณาที่กระแสสูงสุดที่ไหลผ่านความต้านทาน  $R_{s1}$  ตามรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลหน้าคลื่นของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม ที่ขณะเปิดวงจร พิจารณาที่ช่วงทางคลื่นของแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.10 จะพิจารณาได้ว่าที่แรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_{s1}$  เท่ากับ 6.3635 kV ดังนั้นกระแสสูงสุดที่ผ่านตัวต้านทาน  $R_{s1}$  จะคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$I_{2max} = \frac{U_{\varepsilon}}{R_{s1}} \quad (3.1)$$

$$I_{2max} = \frac{6.375 \text{ kV}}{21 \Omega} \quad \text{จาก } R_{s1} = 21 \Omega$$

$$I_{2max} = 303.57 \text{ A}$$

แต่เนื่องจาก  $R_{s1}$  จะต้องใช้ในกรณีที่ลัดวงจรหรือสร้างกระแสฮัมพัลส์ ดังนั้นจึงพิจารณากระแสสูงสุดที่ไหลผ่าน  $R_{s1}$  ในกรณีที่ลัดวงจร จากการคำนวณแล้วในกรณีที่ลัดวงจรค่ากระแสที่ไหลผ่าน  $R_{s1}$  ยังมีค่าเท่าเดิมกับในกรณีที่เปิดวงจรคือเท่ากับ 303.57 A

จากกระแสสูงสุดที่ไหลผ่านตัวต้านทาน  $R_{s1}, R_{s2}$  จะมีค่าสูงมากดังนั้นในการออกแบบจะเลือกใช้ลวดนิเกิล-โครเมียม (NiCr) โดยส่วนผสมของ Ni 80% และ Cr 20% ซึ่งมีคุณสมบัติในการทนความร้อนได้สูง ดังนั้นจึงไม่ต้องคำนึงถึงกระแสฮัมพัลส์ที่มีค่าเป็นร้อยแอมป์ แต่อยู่ในช่วงเวลาเพียงสั้นๆ แค่นิโครวินาทีเท่านั้น ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนั้นต้องไม่เกิน 60°C เนื่องจาก PVC ทนความร้อนได้แค่ 60°C ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยจึงให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นแค่ 50°C ดังนั้นในการออกแบบจะต้องคำนวณถึงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของตัวต้านทานด้วยซึ่งมีสมการในการคำนวณดังต่อไปนี้

$$W = m \times c \times (t_2 - t_1) \quad (3.2)$$

$W$  คือ ค่าพลังงานที่ป้อนให้กับตัวต้านทาน (kJ)

$m$  คือ มวลของขดลวดความต้านทาน (kg)

$c$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ หน่วยเป็น  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$

$t_2$  คือ อุณหภูมิหลังจากมีกระแสสูงสุดไหลผ่านขดลวดทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุด

$t_1$  คือ อุณหภูมิก่อนที่จะมีกระแสไหลผ่านเข้ามา

จากค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่าน  $R_{s1}, R_{s2}$  นำมาคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไหลผ่านเพื่อหาความยาวของขดลวดที่ต้องใช้พัน

### ในกรณีของ $R_{s2}$

จาก 
$$W = \int P dt \quad (3.3)$$

$$W = \frac{1}{2}(I_{1max})^2 R_{s2} dT_1 + \frac{1}{2}(I_{2max})^2 R_{s2} d(T_3 - T_2) \quad , T_3 \text{ คือเวลาที่แรงดันอิมพัลส์ลดลงเป็น 0}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$W = \frac{1}{2}[(250)^2 \times (24) \times (1.2 \times 10^{-6})] + \frac{1}{2}[(303.57)^2 \times (24) \times ((250-50) \times 10^{-6})] \quad \text{J}$$

$$W = 222.07 \text{ J}$$

จากสมการที่ 3.2 จะได้ว่า

$$W = m \times c \times (t_2 - t_1)$$

$$222.07 \text{ J} = m \times c \times (t_2 - t_1)$$

จาก  $c = 0.46 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  และ  $t_2 - t_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  เนื่องจากอุณหภูมิที่ยอมให้เพิ่มขึ้นเท่ากับ  $50 \text{ }^\circ\text{C}$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$m = \frac{222.07 \text{ J}}{[(0.46 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}) \times (50 \text{ }^\circ\text{C})]} \quad \text{kg}$$

$$m = 0.00965 \text{ kg}$$

จาก  $m = \rho V = \rho A l$  จากค่า  $\rho = 8.2 \text{ g/cm}^3$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$0.00965 \text{ kg} = (8200 \text{ kg/m}^3) \times A l$$

$$\text{ดังนั้น } A l = 0.00000118 \text{ m}^3$$

ดังนั้นจะเลือกค่า เส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ  $0.55 \text{ mm}$  ซึ่งมีค่าความต้านทานเท่ากับ  $6.5 \Omega / \text{m}$

โดยเลือกใช้  $12.92 \text{ m}$  ได้ความต้านทาน  $84 \text{ โอห์ม}$

### ในกรณีของ $R_{s1}$

จาก 
$$W = \frac{1}{2}(I_{2max})^2 R_{s1} dT \quad (3.4)$$

$$W = \frac{1}{2}(303.57)^2 \times (21) \times (250-1.2) \times 10^{-6} \quad \text{J}$$

$$W = 240.74 \text{ J}$$

จากสมการที่ 3.2 จะได้ว่า  $W = m \times c \times (t_2 - t_1)$

$$240.74 \text{ J} = m \times c \times (t_2 - t_1)$$

จาก  $c = 0.46 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  และ  $t_2 - t_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  เนื่องจากอุณหภูมิที่ยอมให้เพิ่มขึ้นเท่ากับ  $50 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\text{ดังนั้น } m = \frac{240.74 \text{ J}}{[(0.46 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}) \times (50 \text{ }^\circ\text{C})]} \quad \text{kg}$$

$$m = 0.0105 \text{ kg}$$

จาก  $m = \rho V = \rho A l$  จากค่า  $\rho = 8.2 \text{ g/cm}^3$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$0.0105 \text{ kg} = (8200 \text{ kg/m}^3) \times A l$$

$$\text{ดังนั้น } A l = 0.00000128 \text{ m}^3$$

ดังนั้นจะเลือกค่า เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.55 mm ซึ่งมีค่าความต้านทานเท่ากับ 6.5  $\Omega$  /m โดยเลือกใช้ 15 m. ได้ความต้านทาน 97.5 โอห์ม

ส่วนกรณีของความต้านทาน  $R_d$  ในกรณีลัดวงจรจะต้องทนกระแสลมพัลส์ให้ได้ที่ 3 kA โดยไม่เกิดการเบรกดาวหรือเกิดความเสียหายขึ้น โดยกระแสสูงสุดไหลผ่าน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะต้องไม่เกิน 50  $^{\circ}\text{C}$  และค่าความต้านทานจะต้องมีค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ดังนั้นจะออกแบบ  $R_d$  ดังนี้

$$\text{จาก } W = \frac{1}{2}(I_{1\max})^2 R_d dT_1 + \frac{1}{2}(I_{2\max})^2 R_d dT_2 \quad (3.5)$$

$$W = \frac{1}{2}[(3000)^2 \times 0.88 \times 8 \times 10^{-6}] + \frac{1}{2}[(1500)^2 \times 0.88 \times 20 \times 10^{-6}] \quad \text{J}$$

$$W = 51.48 \text{ J}$$

เนื่องจากความต้านทานที่ออกแบบนี้มีค่าน้อยมาก จึงทำให้เกิดพลังงานความร้อนน้อยแม้ว่าจะกระแสมีค่าสูงก็ตามดังนั้นจะหาขดลวดที่พื้นเป็นความต้านทานไร้ความเหนียวนำได้ดังนี้ จากสมการที่ 3.2 จะได้ว่า

$$W = m \times c \times (t_2 - t_1)$$

$$51.48 \text{ J} = m \times c \times (t_2 - t_1)$$

จาก  $c = 0.46 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$  และ  $t_2 - t_1 = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากอุณหภูมิที่ยอมให้เพิ่มขึ้นเท่ากับ 50  $^{\circ}\text{C}$

$$\text{ดังนั้น } m = \frac{51.48 \text{ J}}{[(0.46 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}) \times (50 \text{ }^{\circ}\text{C})]} \quad \text{kg}$$

$$m = 0.00224 \text{ kg}$$

จาก  $m = \rho V = \rho A \ell$  จากค่า  $\rho = 8.2 \text{ g/cm}^3$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$0.00224 \text{ kg} = (8200 \text{ kg/m}^3) \times A \ell$$

$$\text{ดังนั้น } A \ell = 0.00000273 \text{ m}^3$$

ดังนั้นจะเลือกค่า เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.2 mm ซึ่งมีค่าความต้านทานเท่ากับ 0.964  $\Omega$  /m

$$\ell = \frac{0.00000273 \text{ m}^3}{2.54 \text{ mm}^2}$$

$$\ell = 1.075 \text{ m}$$

สรุปได้ว่า ความยาวของขดลวดความต้านทานที่ใช้เท่ากับ 1.075 m โดยมีความต้านทานทั้งหมดเท่ากับ 1.215  $\Omega$  ซึ่งความต้านทานได้ไม่ถึงค่าที่ต้องการ ดังนั้นจึงเลือกใช้ขดลวดความต้านทานที่มีขนาดยาวกว่าเดิม โดยเลือกใช้ 3.652 m. ได้ความต้านทาน 3.52 โอห์ม

- การพันขดลวดความต้านทาน  $R_{s1}$ ,  $R_{s2}$ ,  $R_d$  [6]

จากในหัวข้อที่แล้วได้คำนวณหาความยาวของขดลวดความต้านทานที่ต้องการนำมาใช้ พันความต้านทานไร้ค่าความเหนียวแล้ว ในหัวข้อนี้จะคำนวณหาจำนวนรอบที่ต้องใช้พัน ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

ในหลักการจะพิจารณาจากขดลวดความต้านทานที่คำนวณได้จากหัวข้อที่แล้ว โดยพิจารณาที่ค่าความต้านทาน  $R_{s1}$  และกระบอกท่อ PVC ที่เลือกใช้ขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 2.5 cm ขนาดความยาวเท่ากับ 20 cm ใช้ขดลวดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 0.55 mm เลือกใช้เอ็นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.55 mm ดังนั้นแต่ละรอบของการพันขดลวดจะมีความกว้างเท่ากับ 0.165 cm ดังนั้นแต่ละกระบอกจะพันได้สูงสุด เท่ากับ  $\frac{20}{0.165} = 121$  รอบ

แต่เลือกพันที่ 74 รอบแต่ละรอบของ PVC ของการพันชั้นแรกจะมีความยาวเท่ากับ  $2\pi r = 8.45$  cm ดังนั้นจะใช้ความยาวของขดลวดเท่ากับ  $74 \times 0.0845 = 6.253$  m และแต่ละรอบของ PVC ของการพันชั้นที่สองจะมีความยาวเท่ากับ  $2\pi r = 8.81$  cm ดังนั้น จะใช้ความยาวของขดลวดเท่ากับ  $74 \times 0.0881 = 6.52$  m ดังนั้นจะได้ความต้านทานทั้งหมดของลวดความต้านทานเท่ากับ  $6.5 \times (6.253 + 6.52) = 83.024$   $\Omega$  ทำการพันโดยใช้ลวดยาว 13 เมตร (84 $\Omega$ ) ซึ่งการพันลวดด้วยวิธีที่ 1 โดยทำการแบ่งลวดออกเป็นสองส่วนที่มีความยาวเท่ากัน แต่ละส่วนมีค่าความต้านทาน 42 $\Omega$  ทำการต่อลวดทั้งสองส่วนเข้าด้วยกันแบบขนานจะได้ค่าความต้านทานรวมของขดลวดเท่ากับ 21 $\Omega$

**พิจารณาที่ค่าความต้านทาน  $R_{22}$  กระบอกท่อ PVC** ที่เลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm ขนาดความยาวเท่ากับ 20 cm ใช้ขดลวดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 0.55 mm เลือกใช้เอ็นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.55 mm ดังนั้นแต่ละรอบของการพันขดลวดจะมีความกว้างเท่ากับ 0.165 cm ดังนั้นแต่ละกระบอกจะพันได้สูงสุด  $\frac{20}{0.165} = 121$  รอบ แต่เลือกพัน

ที่ 85 รอบ แต่ละรอบของ PVC ของการพันชั้นแรกจะมีความยาวเท่ากับ  $2\pi r = 8.45$  cm ดังนั้นจะใช้ความยาวของขดลวด  $85 \times 0.0845 = 7.18$  m และแต่ละรอบของ PVC ของการพันชั้นที่สองจะมีความยาวเท่ากับ  $2\pi r = 8.81$  cm. ดังนั้นจะใช้ความยาวของขดลวด  $85 \times 0.0881 = 7.49$  m ดังนั้นจะได้ความต้านทานทั้งหมดของลวดความต้านทานเท่ากับ  $(7.18 + 7.49) \times 6.5 = 95.355$   $\Omega$  ทำการพันโดยใช้ลวดยาว 15 เมตร (96 $\Omega$ ) ซึ่งการพันลวดด้วยวิธีที่ 1 โดยทำการแบ่งลวดออกเป็นสองส่วนที่มีความยาวเท่ากัน แต่ละส่วนมีค่าความต้านทาน 48 $\Omega$  ทำการต่อลวดทั้งสองส่วนเข้าด้วยกันแบบขนานจะได้ค่าความต้านทานรวมของขดลวดเท่ากับ 24 $\Omega$

**พิจารณาที่ค่าความต้านทาน  $R_0$  และกระบอกท่อ PVC** ที่เลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm ขนาดความยาวเท่ากับ 15 cm ใช้ขดลวดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.2 mm เลือกใช้เอ็นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.5 mm ดังนั้นแต่ละรอบของการพันขดลวดจะมีความกว้างเท่ากับ 0.42 cm ดังนั้นแต่ละกระบอกจะพันได้สูงสุด  $= \frac{15}{0.42} = 37$  รอบ

แต่เลือกพันที่ 21 รอบ แต่ละรอบของ PVC จะมีความยาวเท่ากับ  $2\pi r = 8.734$  cm ดังนั้นจะใช้ความยาวของขดลวด ในการพันชั้นแรกเท่ากับ  $21 \times 0.08734 = 1.834$  m และแต่ละรอบของ PVC ของการพันชั้นที่สองจะมีความยาวเท่ากับ  $2\pi r = 9.613$  cm ดังนั้นจะใช้ความยาวของขดลวด  $21 \times 0.09613 = 2.019$  m ดังนั้นจะได้ความต้านทาน  $(1.834 + 2.019) \times 0.964 = 3.7$   $\Omega$  ทำการพันโดยใช้ลวดยาว 4 เมตร (3.52  $\Omega$ ) ซึ่งการพันลวดด้วยวิธีที่ 1 โดยทำการแบ่งลวดออกเป็นสองส่วนที่มีความยาวเท่ากัน แต่ละส่วนมีค่าความต้านทาน 1.76 $\Omega$  ทำการต่อลวดทั้งสองส่วนเข้าด้วยกันแบบขนานจะได้ค่าความต้านทานรวมของขดลวดเท่ากับ 0.88 $\Omega$



จากมาตรฐาน IEC60052(1960) [9] ได้กำหนดไว้ว่า ถ้าแกปทรงกลมที่มีตั้งแต่ 6.25 cm ลงมาจะเลือกใช้ค่าของระยะ A ได้ดังนี้ ระยะที่ต่ำสุดมีขนาดเท่ากับ 7D และระยะที่สูงสุดเท่ากับ 9D ซึ่ง D คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของแกปทรงกลม

ซึ่งจะปรับระยะห่างระหว่างแกปทรงกลมไว้ที่ 1.52 mm เพื่อจะได้ค่าแรงดันเบรกดาวนตามที่ต้องการ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.375 kV โดยเราสามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างแกปทรงกลมได้ดังนี้ จากสมการหาค่าแรงดันเบรกดาวนโดยตรงในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ [4]

$$U_b = E_b \times d \quad (3.7)$$

และจะหาค่า  $E_b$  ได้จากสมการดังต่อไปนี้ [10]

$$\text{จาก } \frac{\alpha}{P} = C \left[ \frac{E}{P} - \left[ \frac{E}{P} \right]_M \right]^2 - A \quad (3.8)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\alpha = PC \left[ \frac{E}{P} - \left[ \frac{E}{P} \right]_M \right]^2 - PA \quad (3.9)$$

ที่สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะได้ว่า

$$\int_0^d \alpha dx = K \quad (3.10)$$

$$\alpha d = K$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$PCd \left[ \frac{E}{P} - \left[ \frac{E}{P} \right]_M \right]^2 - PA d = K \quad (3.11)$$

เมื่อแก้สมการหาค่า E จะได้ว่า

$$E = P \left[ \left[ \frac{E}{P} \right]_M + \sqrt{\frac{1}{C} \left( \frac{K}{Pd} + A \right)} \right] \quad (3.12)$$

เมื่อนำค่า E ที่ได้ไปแทนที่สมการ (3.7) จะได้ว่า

$$U_b = Pd \left[ \left[ \frac{E}{P} \right]_M + \sqrt{\frac{1}{C} \left( \frac{K}{Pd} + A \right)} \right] \quad (3.13)$$

โดยที่  $K = 9.15$   
 $P = 1.013 \text{ bar}$   
 $\left[ \frac{E}{P} \right]_M = 2.165 \text{ kV/mm.bar}$   
 $A = 0.2873 \text{ 1/mm.bar}$   
 $C = 1.6053 \text{ mm.bar/kV}^2$   
 $D = \text{ระยะห่างระหว่างแกป}$

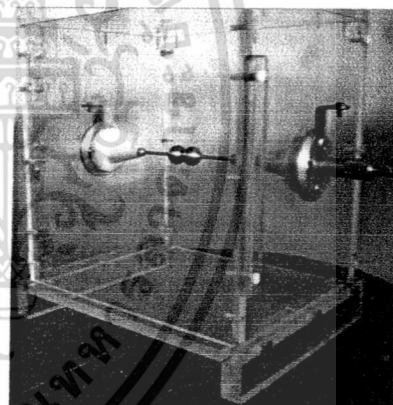
จากสมการที่ (3.13) แทนค่า  $U_b = 6.375 \text{ kV}$  จะได้ค่า  $d$  เท่ากับ  $1.52 \text{ mm}$

หมายเหตุ เนื่องจากระยะห่างระหว่างแกปทรงกลมมีค่าน้อยมากจึงทำให้ใช้สมการหาค่าแรงดันเบรกดาวน์โดยตรงในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอได้

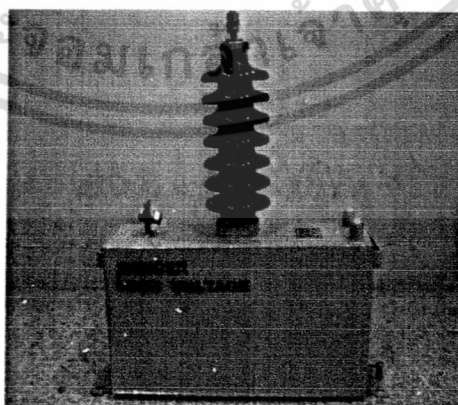
### 3.5 ตัวอย่างชิ้นงานที่ออกแบบ



ก) ตัวต้านทาน  $R_d, R_{s1}, R_{s2}$

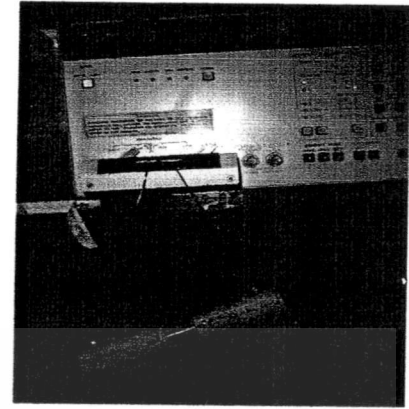
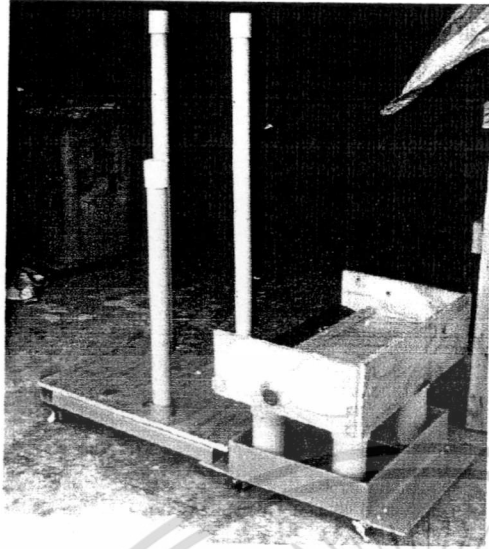


ข) สปาร์กแกป



ค) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์  $6\mu\text{F}$

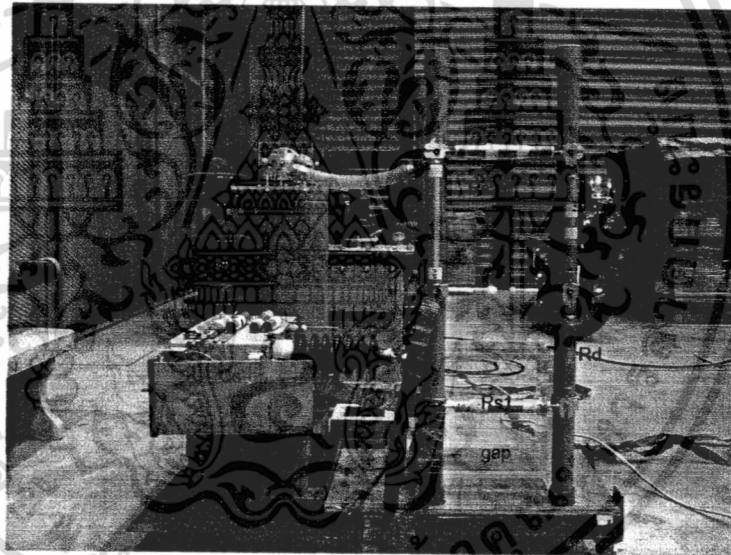
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จ) ตัวเหนี่ยวนำ L

ง) สถานที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด

รูปที่ 3.12 รูปตัวอย่างชิ้นงาน



รูปที่ 3.13 รูปชิ้นงานที่สมบูรณ์เมื่อประกอบเสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

การทดลองการใช้งานของเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม 6kV, 3kA จะประกอบด้วย การทดสอบสองอย่าง

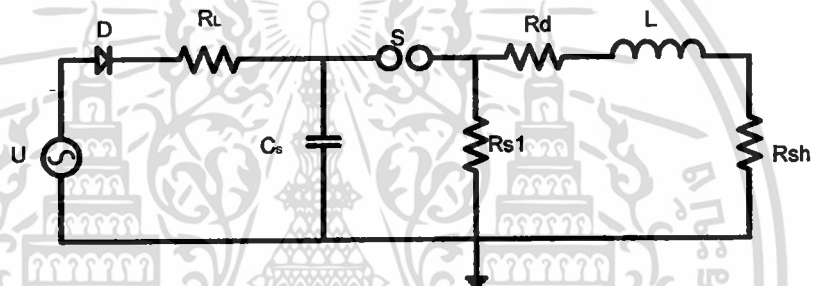
1. การทดสอบกระแสอิมพัลส์
2. การทดสอบแรงดันอิมพัลส์

ซึ่งทั้งแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ ที่สร้างจากเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม 6kV, 3kA นี้จะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 6100-4-5 [1]

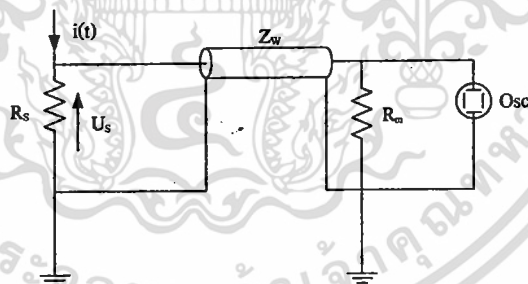
#### 4.1 การทดสอบกระแสอิมพัลส์

##### 4.1.1 การทดสอบกระแสอิมพัลส์มาตรฐานรูปคลื่น 8/20 $\mu$ s ด้วยตัวต้านทานชั้นที่

การทดสอบหาค่าประกอบกระแสอิมพัลส์มาตรฐานรูปคลื่น 8/20 $\mu$ s ด้วยตัวต้านทานชั้นที่ลักษณะของวงจรการวัด จะเป็นดังรูปที่ 4.1-4.3 ตามลำดับ



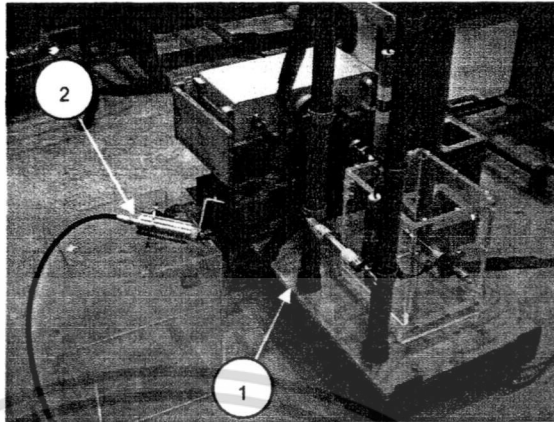
รูปที่ 4.1 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสมที่มีความต้านทานชั้นที่ต่อในวงจร



รูปที่ 4.2 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ด้วยตัวต้านทานชั้นที่

-เครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม 6kV, 3kA

ขณะลัดวงจร 8/20  $\mu$ s



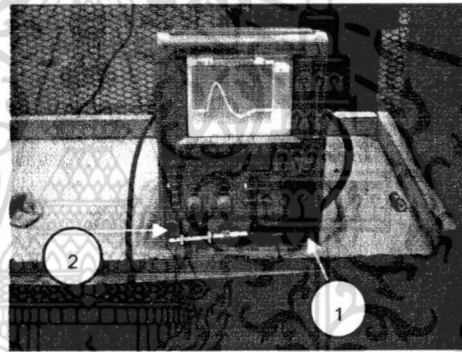
รูปที่ 4.3 เครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม 6kV, 3kA ขณะลัดวงจร

โดยที่

1) เครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม 6kV, 3kA

2) ตัวต้านทานชัณฑ์

- ออสซิลโลสโคป ใช้สำหรับวัดรูปคลื่นสัญญาณอิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 4.4 ออสซิลโลสโคปและตัวต้านทานแมทซิ่ง

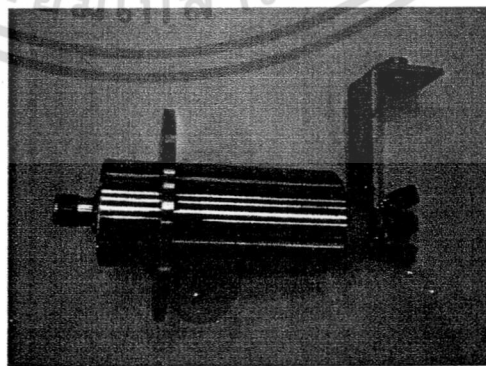
โดยที่

1) ออสซิลโลสโคป

2) ตัวต้านทานแมทซิ่ง 50 $\Omega$

- ตัวต้านทานชัณฑ์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดกระแสอิมพัลส์โดยตัวต้านทานชัณฑ์มีค่า

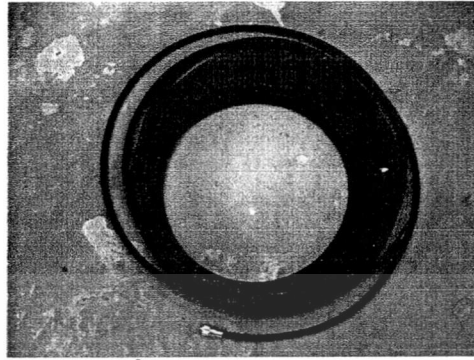
0.00432 $\Omega$



รูปที่ 4.5 ตัวต้านทานชัณฑ์

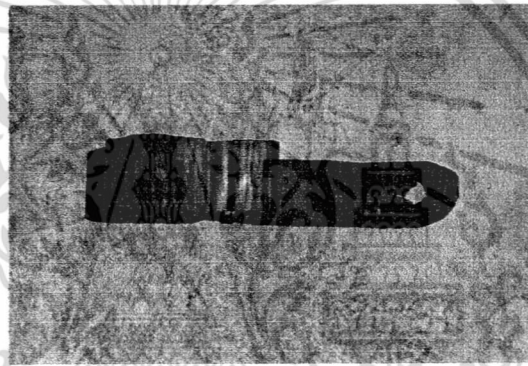
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สายเคเบิลวัด ใช้สำหรับนำสัญญาณแรงดันที่วัดได้มายังออสซิลโลสโคปสายที่ใช้เป็นสายโคแอกเชียล RG-8



รูปที่ 4.6 สายเคเบิล

- สายนำส่งแรงสูง เป็นสายเชื่อมต่อวงจรจะต้องมีขนาดโตพอและไม่บางจนเกินไป สายนำส่งแรงสูงจะมีลักษณะกลมหรือแบนก็ได้



รูปที่ 4.7 สายนำส่งแรงสูง

#### 4.1.2 ผลการทดสอบกระแสอิมพัลส์ด้วยตัวต้านทานชั้นที่

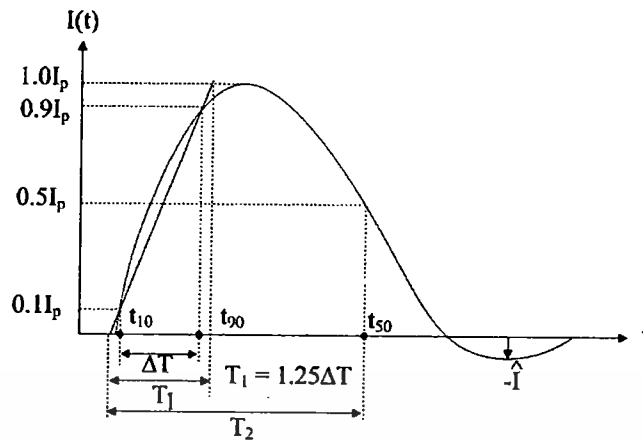
การทดสอบหาค่าประกอบกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20 $\mu$ s ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5 ต้องมีองค์ประกอบดังนี้

หน้าคลื่น 8  $\mu$ s  $\pm$  20%

หลังคลื่น 20  $\mu$ s  $\pm$  20%

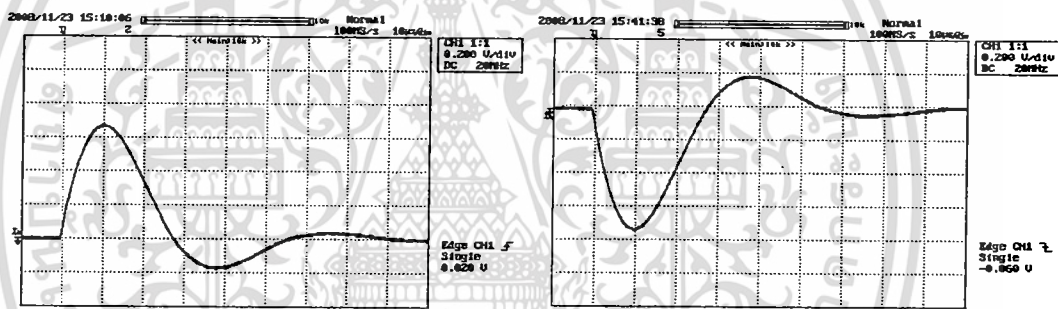
มีเวลาหน้าคลื่นกระแสอิมพัลส์ คือ  $1.25 \times (t_{90} - t_{10})$  โดย  $t_{90}$  คือ เวลาที่กระแสอิมพัลส์เพิ่มขึ้น 90% ของค่ายอด และ  $t_{10}$  คือ เวลาที่กระแสอิมพัลส์เพิ่มขึ้น 10% ของค่ายอด เวลาทางคลื่น คือ ช่วงเวลาตั้งแต่กระแสอิมพัลส์เริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดกระแสอิมพัลส์ จนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

ค่ากระแสอิมพัลส์ชั่วตรงข้ามจะต้องมีค่าไม่มากกว่า 30% ของค่ายอด



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นกระแสสมพัลส์มาตรฐานขณะลัดวงจร

ผลการทดสอบการสร้างกระแสสมพัลส์มาตรฐาน รูปคลื่น 8/20μs สร้างโดยเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสสมพัลส์รูปคลื่นผสม 6kV, 3kA ขณะลัดวงจร และทำการวัดด้วยตัวต้านทานชั้นที่ ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.9 โดยใช้หม้อแปลงกระแสสลับพิกัด 10kV เป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับเครื่องกำเนิด



ก)รูปคลื่นกระแสพัลส์ชั่วคราว

ข)รูปคลื่นกระแสพัลส์ชั่วลบ

รูปที่ 4.9 ผลการทดลองที่ได้จากการวัดด้วยตัวต้านทานชั้นที่

ในการทดสอบเพื่อให้ได้แรงดันอิมพัลส์เอาท์พุทขณะเปิดวงจรเป็น 6kV และกระแสขณะลัดวงจรเป็น 3kA จะต้องชาร์จตัวเก็บประจุที่แรงดันประมาณ 6.7kV โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

จากรูปที่ 4.9ก ที่ระยะแกป 1.6 mm. ค่า  $\Delta T = 6.88 \mu s$

$$\begin{aligned}
 V_{peak} &= 138.49 \times 45.45 &= 6,294 \text{ V} \\
 I_{peak} &= 13.5 / 0.00432 &= 3,125 \text{ A} \\
 T_1 &= 6.88 \times 1.25 &= 8.6 \mu s \\
 T_2 &= &21.32 \mu s
 \end{aligned}$$

ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานจะพบว่าความคลาดเคลื่อนจะอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดตามตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20  $\mu\text{s}$  ขั้วบวกที่วัดได้จากตัวต้านทานชั้นที่เปรียบเทียบกับค่าตามมาตรฐาน

ค่าองค์ประกอบ	ค่าที่วัดได้	ค่ามาตรฐาน	ความคลาดเคลื่อน
$T_1$	8.6	8	7.5%
$T_2$	21.32	20	6.6%
กระแสกลับหัว	29.24%	$\leq 30\%$	ผ่านตามาตรฐาน

และสามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ ได้  $Z = \frac{6,294\text{V}}{3,125\text{A}} = 2.01\Omega$

จากรูปที่ 4.9x ที่ระยะแก๊ป 1.64 mm.ค่า  $\Delta T = 6.7 \mu\text{s}$

$$V_{\text{peak}} = -138.51 \times 45.45 = -6,295 \text{ V}$$

$$I_{\text{peak}} = -13.1 / 0.00432 = -3,032 \text{ A}$$

$$T_1 = 6.7 \times 1.25 = 8.375 \mu\text{s}$$

$$T_2 = 21.08 \mu\text{s}$$

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20  $\mu\text{s}$  ขั้วลบที่วัดได้จากตัวต้านทานชั้นที่เปรียบเทียบกับค่าตามมาตรฐาน

ค่าองค์ประกอบ	ค่าที่วัดได้	ค่ามาตรฐาน	ความคลาดเคลื่อน
$T_1$	8.375	8	4.7%
$T_2$	21.08	20	5.4%
กระแสกลับหัว	26%	$\leq 30\%$	ผ่านตามาตรฐาน

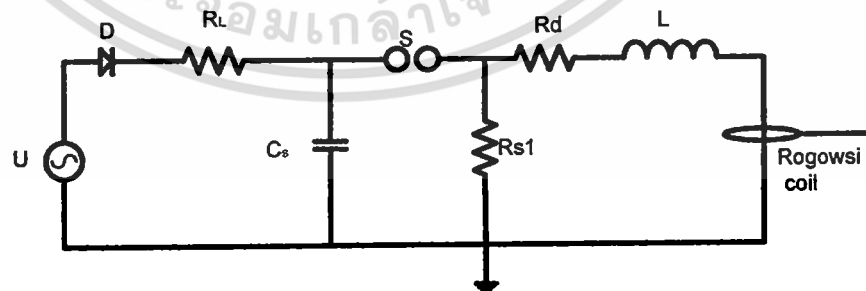
และสามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ ได้  $Z = \frac{-6,320\text{V}}{-3,032\text{A}} = 2.08\Omega$

จากผลการทดลองที่ได้แสดงว่ารูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ได้ผ่านตามาตรฐาน

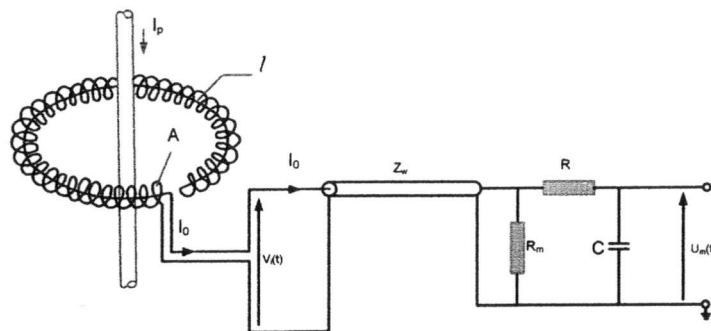
#### 4.1.3 การทดสอบหาองค์ประกอบกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน รูปคลื่น 8/20 $\mu\text{s}$

ด้วยโรกอฟสกีคอยล์

การทดสอบหาองค์ประกอบกระแสอิมพัลส์มาตรฐานรูปคลื่น 8/20 $\mu\text{s}$  ด้วยโรกอฟสกีคอยล์ ลักษณะของวงจรการวัด จะเป็นดังรูปที่ 4.10-4.13ตามลำดับ

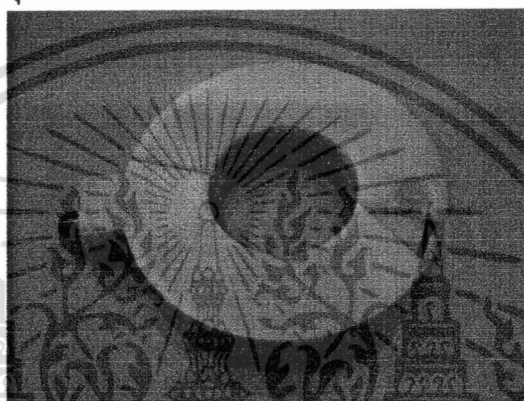


รูปที่ 4.10 วงจรสมมูลของการทดสอบ



รูปที่ 4.11 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสพัลส์ด้วยโรกอฟสกีคอยล์

- โรกอฟสกีคอยล์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดกระแสพัลส์



รูปที่ 4.12 โรกอฟสกีคอยล์

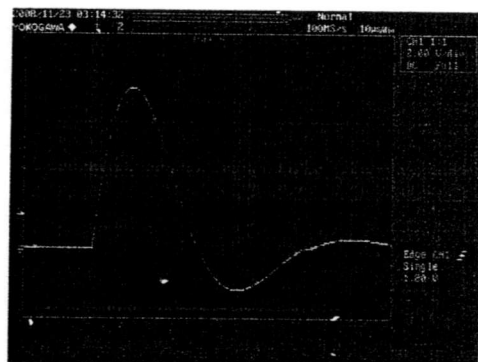


รูปที่ 4.13 วงจรการทดสอบจริงของการใช้โรกอฟสกีคอยล์

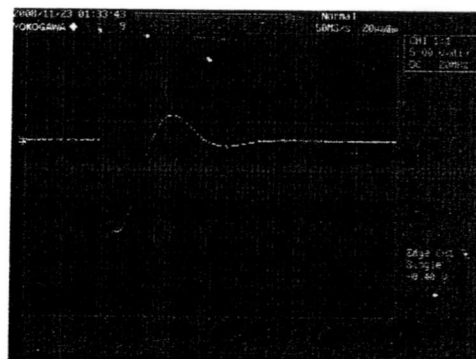
โดยที่ 1) เครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสพัลส์รูปคลื่นผสม 6kV, 3kA  
2) โรกอฟสกีคอยล์

#### 4.1.4 ผลการทดสอบกระแสพัลส์ ด้วยโรกอฟสกีคอยล์

ผลการทดสอบกระแสพัลส์มาตรฐาน รูปคลื่น  $8/20 \mu s$  สร้างโดยเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสพัลส์รูปคลื่นผสม 6kV, 3kA ขณะลัดวงจร และทำการวัดด้วยโรกอฟสกีคอยล์ แสดงดังรูปที่ 4.14



ก) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ชั่วคราว



ข) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ชั่วคราว

## รูปที่ 4.14 ผลการทดลองที่ได้จากการวัดด้วยโรกอฟสกีคอยล์

ในการทดสอบเพื่อให้ได้แรงดันอิมพัลส์เอาท์พุทขณะเปิดวงจรเป็น 6kV และกระแสขณะลัดวงจรเป็น 3kA จะต้องชาร์จตัวเก็บประจุที่แรงดันประมาณ 6.7kV โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

จากรูปที่ 4.14ก ที่ระยะแกป 1.53 mm. ค่า  $\Delta T = 6.5 \mu s$  ค่าสเกลแฟกเตอร์ของโรกอฟสกีคอยล์เท่ากับ 4.1096 kA/V

$$V_{\text{peak}} = 138.1 \times 45.45 = 6,276 \text{ V}$$

$$I_{\text{peak}} = 0.730 \times 4,109.6 = 3,000 \text{ A}$$

$$T_1 = 6.5 \times 1.25 = 8.125 \mu s$$

$$T_2 = 20.38 \mu s$$

ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานจะพบว่าความคลาดเคลื่อนจะอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด ตามตารางที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20  $\mu s$  ชั่วคราวที่วัดได้จากโรกอฟสกีคอยล์เปรียบเทียบกับค่าตามมาตรฐาน

ค่าองค์ประกอบ	ค่าที่วัดได้	ค่ามาตรฐาน	ความคลาดเคลื่อน
$T_1$	8.125	8	1.56%
$T_2$	20.38	20	1.9%
กระแสกลับชั่ว	26%	$\leq 30\%$	ผ่านตามาตรฐาน

และสามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ ได้  $Z = \frac{6,276 \text{ V}}{3,000 \text{ A}} = 2.09 \Omega$

จากรูปที่ 4.14ข ที่ระยะแกป 1.64 mm. ค่า  $\Delta T = 6.43 \mu s$  ค่าสเกลแฟกเตอร์ของโรกอฟสกีคอยล์เท่ากับ 4.1096 kA/V

$$V_{\text{peak}} = -135.6 \times 45.45 = -6,163 \text{ V}$$

$$I_{\text{peak}} = -0.782 \times 4,109.6 = -3,213 \text{ A}$$

$$T_1 = 6.43 \times 1.25 = 8.037 \mu s$$

$$T_2 = 20.38 \mu s$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบกระแสимพัลส์รูปคลื่น 8/20  $\mu\text{s}$  ขั้วลวดที่วัดได้จากโรกอฟสกีคอยล์ เปรียบเทียบกับค่าตามมาตรฐาน

ค่าองค์ประกอบ	ค่าที่วัดได้	ค่ามาตรฐาน	ความคลาดเคลื่อน
$T_1$	8.037	8	0.46%
$T_2$	20.38	20	1.9%
กระแสกลับชั่ว	26%	$\leq 30\%$	ผ่านตามาตรฐาน

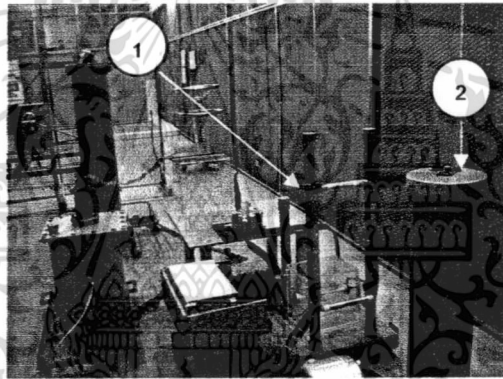
และสามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ ได้  $Z = \frac{-6,123\text{V}}{-3,213\text{A}} = 1.9\Omega$

จากผลการทดลองที่ได้แสดงว่ารูปคลื่นกระแสимพัลส์ที่ได้ผ่านตามาตรฐาน

#### 4.2 การทดสอบแรงดันอิมพัลส์

##### 4.2.1 การทดสอบหาค่าองค์ประกอบแรงดันอิมพัลส์ รูปคลื่น 1.2/50 $\mu\text{s}$

การทดสอบหาค่าองค์ประกอบแรงดันอิมพัลส์ ที่สร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสимพัลส์รูปคลื่นผสม 6kV, 3kA และใช้โวลเตจดีไวเดอร์เป็นเครื่องมือวัด วงจรการทดสอบจะเป็นดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 วงจรการทดสอบจริงในการวัดแรงดันอิมพัลส์

โดยที่

- 1) เครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสимพัลส์รูปคลื่นผสม 6kV, 3kA
- 2) โวลเตจดีไวเดอร์

##### 4.2.2 ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์

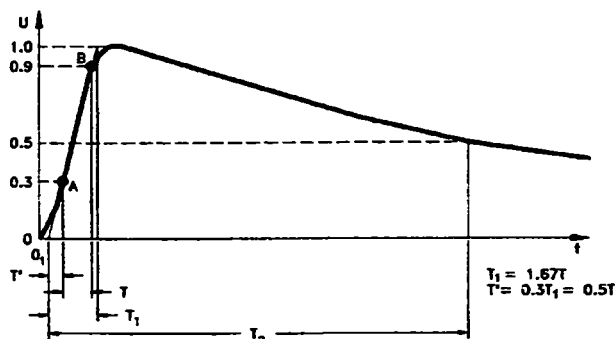
รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่วัดได้นั้น จะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 6100-4-5 [1] ซึ่งได้กำหนดองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50  $\mu\text{s}$  ไว้ดังนี้คือ

หน้าคลื่น  $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$

หลังคลื่น  $50 \mu\text{s} \pm 20\%$

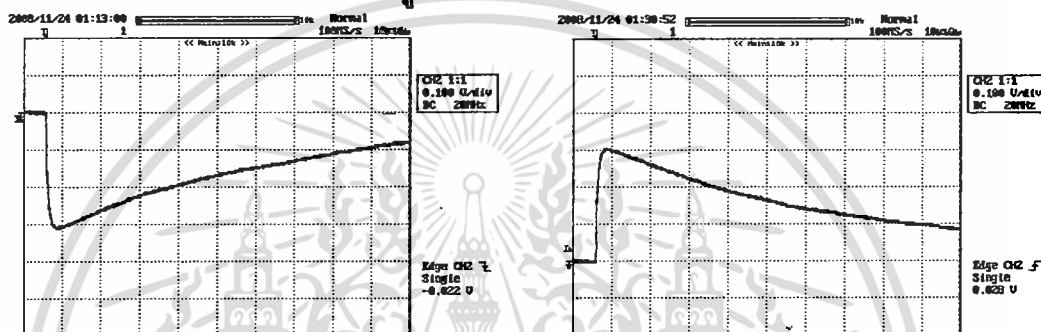
มีเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ คือ  $1.67 \times (t_{90} - t_{30})$  โดย  $t_{90}$  คือ เวลาที่แรงดันอิมพัลส์เพิ่มขึ้น 90% ของค่ายอด และ  $t_{30}$  คือ เวลาที่แรงดันอิมพัลส์เพิ่มขึ้น 30% ของค่ายอด

เวลาช่วงหางคลื่น ( $T_2$ ) คือ ช่วงเวลาดังแต่แรงดันอิมพัลส์เริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานขณะเปิดวงจร

ซึ่งผลการทดลองสร้างแรงดันอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม ขณะเปิดวงจร ที่วัดได้จะเป็นไปตามรูปที่ 4.17

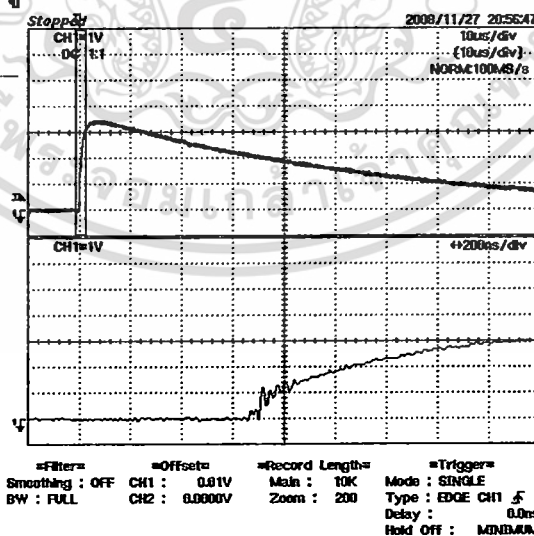


ก)รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ

ข)รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก

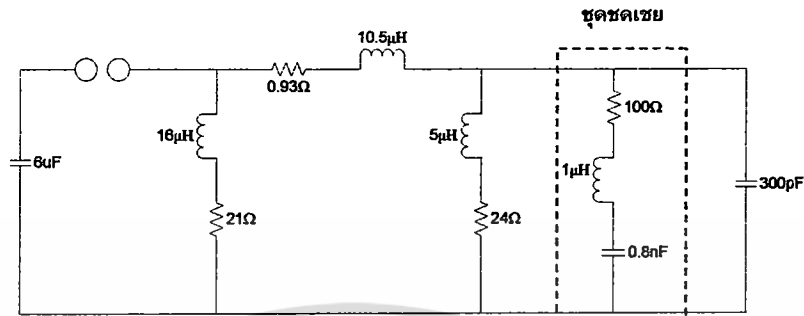
รูปที่ 4.17 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 6.32kV ขณะเปิดวงจร

แต่เมื่อได้ทำการหาช่วงเวลาน้ำคลื่นพบว่าเกิดการออสซิลเลชันในช่วงหน้าคลื่นและช่วงหน้าคลื่นยังชันไม่พอทำให้เวลาช่วงหน้าคลื่นเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากมีค่าความเหนี่ยวนำในวงจรมากเกินไป ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก 6.32kV เมื่อขยายดูที่ช่วงหน้าคลื่น

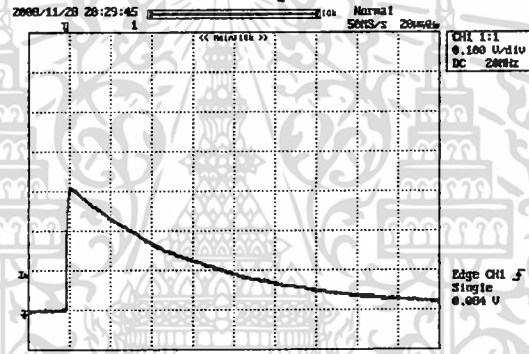
วิธีการแก้คือ ต้องทำการเพิ่มชุดชดเชยและลดค่าความเหนี่ยวนำลาง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ภายในชุดชดเชยนี้ได้จากการซิมูเลชันด้วยโปรแกรมMicrosim ซึ่งชุดชดเชยนี้จะทำให้รูปคลื่นมีช่วงหน้าคลื่นที่ชันขึ้นและลดผลของการเกิดออสซิลเลชันที่หน้าคลื่น รูปที่ 4.19 แสดงวงจรชุดชดเชยที่เพิ่มเข้ามา



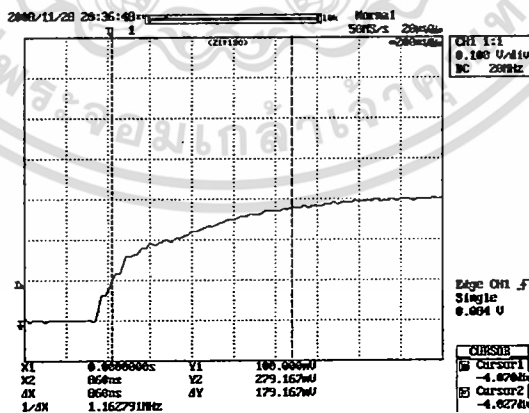
รูปที่ 4.19 วงจรของเครื่องกำเนิดเมื่อใส่ชุดชดเชย

หมายเหตุ : ค่าตัวเก็บประจุของดีไวเดอร์ที่ใช้วัดต้องมีค่าไม่เกิน 300 pF

เมื่อใส่วงจรชดเชยและทำการยิงที่พิกัดแรงดัน 6kV จะได้รูปคลื่นแรงดันที่มีออสซิลเลชันน้อยลงและหน้าคลื่นมีความชันมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.20



ก) รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว 6.32kV เมื่อมีการชดเชย



ข) รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว 6.32kV เมื่อมีการชดเชยเมื่อขยายดูที่ช่วงหน้าคลื่น

รูปที่ 4.20 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เมื่อใส่ชุดชดเชย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.21 ข ที่ระยะแกป 1.6 mm. ค่า  $\Delta T = 0.860 \mu\text{s}$

$$V_{\text{peak}} = 6.32 \text{ kV}$$

$$T_1 = 0.860 \times 1.67 = 1.436 \mu\text{s}$$

$$T_2 = 48.32 \mu\text{s}$$

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/50  $\mu\text{s}$  ชั่วบวที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าตามมาตรฐาน

ค่าองค์ประกอบ	ค่าที่วัดได้	ค่ามาตรฐาน	ความคลาดเคลื่อน
$T_1$	1.436	1.2	19.6%
$T_2$	48.32	50	3.4%

จากผลการทดลองเมื่อแก้ด้วยวิธีชดเชยจะพบว่ารูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5 สรุป

### 5.1 สรุป

จากการทดสอบความสามารถในการสร้างรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์และแรงดันอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม 6 KV, 3kA พบว่าขณะเปิดวงจรสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่า 6 KV ได้แต่ยังเกิดการออสมิเลทที่หน้าคลื่น และยังมี ความชันไม่เพียงพอ ทำให้ช่วงเวลาหน้าคลื่นไม่ได้ตามที่มาตรฐานกำหนด เมื่อทำการใส่ชุดชดเชยเข้ามาเพื่อแก้ช่วงเวลาหน้าคลื่นของแรงดัน ทำให้ช่วงเวลาหน้าคลื่นของแรงดันมีค่า ดีขึ้นโดยอยู่ในช่วง  $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$  ช่วงเวลาหลังคลื่น  $50 \mu\text{s} \pm 20\%$  ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดได้ และเมื่อลัดวงจรสามารถสร้างกระแสอิมพัลส์ที่มีค่า 3 kA ที่มีช่วงเวลาหน้าคลื่น  $8 \mu\text{s} \pm 20\%$  และช่วงเวลาหลังคลื่น  $20 \mu\text{s} \pm 20\%$  ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ได้

### 5.2 กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ดำเนินงานขอขอบคุณ พี่ปริญญาโทห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบางพลี ที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือวัดค่าความต้านทานและค่าเหนี่ยวนำ และสุดท้ายขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่อำนวยความสะดวกในการทำวิจัย รวมทั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้จัดสรรงบประมาณสำหรับการทำวิจัยครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] "Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4 – 5 testing and measurement techniques Surge immunity test," **IEC 61000-4-5**, 2005 – 11.
- [2] "IEEE Recommended Practice on Characterization of Surges in Low-Voltage (1000 V and Less) AC Power Circuits," **IEEE C62.41.2**, 2003 – 11.
- [3] "High Voltage Test Techniques Part I: General Definitions and Test Requirement," **IEC Publication 60060-1**, 1989.
- [4] สํารวย สํงษ์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 3, 2549.
- [5] "High Voltage Test Techniques Part II: General Measuring System," **IEC Publication 60060-2**, 1994.
- [6] องอาจ หาญทวีสมพล และ ปรีชา เตชทิพากร, "การออกแบบสร้างตัวต้านทานสำหรับเครื่องกำเนิดแรงดันสูง 100 กิโลโวลต์," **โครงการการเรียนการสอนเพื่อประสบการณ์**, 2532.
- [7] พงศ์พันธ์ ปริยวงศ์, "การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดกระแสสลับพัลส์ขนาด 75 กิโลแอมป์ 30 kJ", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544
- [8] Nosh K. Medora and Alexandra Kusko, **An Enhanced Computer Simulation Model of the IEEE Std C62.41.2-2002 Surge Generator for Simulated Surge Testing of Electrical Systems**, 2002.
- [9] "High Voltage Measurement by Means of Sphere-gap," **IEC Publication 60052**, 1960.
- [10] Komson Petcharaks, **Application of The Streamer Breakdown Criterion To Inhomogeneous Gas Gaps**, Ph.D. Thesis, ETH No.11192, 1995.