การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 300 kV

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 300 kV IMPULSE VOLTAGE GENERATOR

โดย

นายเกื้อกุล มงคลทรง

นายจักรภพ นพรัตน์

นายชาตรี นิพนุติยันต์

นายณัฐพงศ์ กาญจนศร

ปริญญานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 300 kV

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 300 kV IMPULSE VOLTAGE GENERATOR

โดย

นายเกื้อกุล มงคลทรง

นายจักรภพ นพรัตน์

นายชาตรี นิพนุติยันต์

นายณัฐพงศ์ กาญจนศร

ปริญญานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 300 kV
IMPULSE VOLTAGE GENERATOR

Kuekul Mongkolsong

Jakkrapop Nopparat

Chatree Nipanutiyon

Nattaphong Kanjanasorn

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2561

การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 300 kV

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 300 kV IMPULSE VOLTAGE GENERATOR

โดย

นาย เกื้อกุล มงคลทรง

นาย จักรภพ นพรัตน์

นาย ชาตรี นิพนุติยันต์

นาย ณัฐพงศ์ กาญจนศร

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. พีรวุฒิ ยุทธโกวิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2561

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 300 kV

ผู้จัดทำ

1. นาย เกื้อกุล มงคลทรง
2. นาย จักรภพ นพรัตน์
3. นาย ชาตรี นิพนุติยันต์
4. นาย ณัฐพงศ์ กาญจนศร

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. พีรวุฒิ ยุทธโกวิท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 300 kV

นาย เกื้อกุล มงคลทรง
นาย จักรภพ นพรัตน์
นาย ชาตรี นิพนุติยันต์
นาย ณัฐพงศ์ กาญจนศร
ผศ.ดร. พีรวุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่น 1.2/50 μs ตามมาตรฐานสากล IEC 60060-1 เครื่องกำเนิดฯ ที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้นนั้นจะเป็นเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบ 2 ชั้นตามวิธีวงจรของมาร์กซ์ (Marx's circuit) ซึ่งมีพิกัดชั้นละ 150 kV, 11.25 kJ รวมเป็นพิกัด 300 kV, 22.5 kJ สามารถรองรับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในระบบจำหน่ายที่ระดับแรงดัน 22 kV, 24 kV และ 33 kV ได้ เช่น หม้อแปลงจำหน่าย สายไฟแรงสูง เป็นต้น ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทย ตัวเครื่องกำเนิดฯ ที่ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างขึ้นนั้น จะทำการออกแบบตัวต้านทานหน้าคลื่น และตัวต้านทานหลังคลื่นให้ไร้ความเหนี่ยวนำด้วยวิธีการพันลวดแบบสวนทางกัน และมีค่าความต้านทานที่เหมาะสมเพื่อให้เครื่องกำเนิดฯ สามารถรองรับวัสดุทดสอบที่มีค่าความจุไฟฟ้าได้สูงสุดถึง 4 nF และเพื่อเป็นการยืนยันผลการออกแบบและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดฯ จึงนำค่าความต้านทานที่คำนวณได้นั้นไปจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเมื่อได้ทำการออกแบบเสร็จสิ้นแล้วจึงได้ดำเนินการประกอบสร้างขึ้นจนเป็นที่เรียบร้อยดี จากนั้นจึงได้ทำการทดสอบก็พบว่ารูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่สร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นั้นมีช่วงเวลาหน้าคลื่น ช่วงเวลาหลังคลื่น และค่ายอดของแรงดัน อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 300 kV

IMPULSE VOLTAGE GENERATOR

Kuekul Mongkolsong
Jakkrapop Nopparat
Chatree Nipanutiyon
Nattaphong Kanjanasorn
Assistant.Prof.Dr.Peerawut Yutthagowith Advisor

ABSTRACT

This thesis presents about design and construction of lightning impulse voltage generator that generates 1.2/50 μs waveform according to the international standard IEC 60060-1. The generator is constructed by Marx's circuit with 2 stages. Each stage has a rating of 150 kV, 11.25 kJ, therefore the generator has the total rating of 300 kV, 22.5 kJ. The generator can support the testing of high voltage equipment in distribution systems at voltage levels 22 kV, 24 kV and 33 kV, such as distribution transformers, high voltage cables. The resistors, used in the generator, do not have inductance and have an appropriate value for doing experiment on the test object with capacitance upto 4 nF. To ensure the design and efficiency of the generator is operated by using simulation program. In conclusion, after the test of the lightning impulse voltage generator, the lightning impulse waveform is according to the international standard.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ข้อแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานมาด้วยดีโดยตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคุณปุณยวีร์ ฉายสิริ และ คุณณัฐพล มฤคทัต ที่ช่วยเป็นกำลังสำคัญใน การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ และช่วยให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และ แก้ไขปัญหาต่างๆ ในการทำโครงงานนี้มาโดยตลอด

ขอขอบคุณ พี่ๆ ที่กำลังศึกษาในระดับปริญญาโทและปริญญาเอกทุกท่าน ใน ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงที่ให้ความช่วยเหลือและช่วยออกแรงอย่างมากในการทำโครงงานนี้ มาโดยตลอด

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ที่ให้ ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัด และอุปกรณ์ประกอบโครงงานต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน ที่ช่วยออกแรงในการทำ โครงงานครั้งนี้

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวซึ่งให้การ สนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหา อุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงงานครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 ข้อกำหนดแรงดันอิมพัลส์	4
2.3 วงจรพื้นฐานในการสร้างแรงดันอิมพัลส์	7
2.4 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น	10
2.5 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	12
2.5.1 ตัวเก็บประจุอิมพัลส์	12
2.5.2 ตัวเก็บประจุโหลด	12
2.5.3 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ	12
2.5.4 ความต้านทานปรับรูปคลื่น	13
2.5.5 การหาขนาดของเส้นลวดและเอ็นฉนวน	14
2.5.6 สปาร์กแกปและไกสวิตซ์	15
2.6 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์	16
2.6.1 แรงดันอิมพัลส์ในเทอมเวลา	16
2.6.2 การคำนวณค่าองค์ประกอบวงจร	19
2.6.3 ประสิทธิภาพของวงจรหรือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	20
2.7 การวัดแรงดันอิมพัลส์	20
2.7.1 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลม	20
2.7.2 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดิไวเดอร์	22
บทที่ 3 การออกแบบและการประกอบสร้าง	25
3.1 เงื่อนไขการออกแบบ	25
3.1.1 แรงดันอัดประจุรวมและความจุไฟฟ้ารวม	25
3.1.2 พลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.3 ค่าความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ R_L	25
3.1.4 ค่าความต้านทานหน้าคลื่น (R_d) และค่าความต้านทานหลังคลื่น (R_e)	26
3.2 การจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	28
3.3 การออกแบบและประกอบสร้างตัวต้านทานหน้าคลื่นและหลังคลื่น	30
3.4 การออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	33
3.5 การประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	34
3.5.1 การติดตั้งตัวเก็บประจุอิมพัลส์	34
3.5.2 การติดตั้งตัวต้านทานหน้าคลื่นและตัวต้านทานหลังคลื่น	36
3.5.3 การติดตั้งแกปทรงกลมของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	37
3.5.4 การติดตั้งไดโอดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	39
3.5.5 การติดตั้งตัวต้านทานดิไวเดอร์	40
3.5.6 ตัวเก็บประจุช่วยจุดชนวน	42
บทที่ 4 การทดลองและการวิเคราะห์ผล	43
4.1 การทดสอบค่าองค์ประกอบตัวต้านทานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	43
4.2 การทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน	44
4.2.1 การสร้างแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก	46
4.2.2 การสร้างแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ	48
บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	50
5.1 สรุปผลการดำเนินงานในโครงงาน	50
5.2 อุปสรรคและวิธีการแก้ไขในโครงงาน	50
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก	52
ภาคผนวก ก Poster	53
ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการ	55
ประวัติผู้เขียน	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	รูปคลื่นแรงดันมาตรฐานแบบ Full wave	5
2.2	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตัดที่หลังคลื่น	5
2.3	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตัดที่หน้าคลื่น	6
2.4	วงจรพื้นฐานในการสร้างแรงดันอิมพัลส์	7
2.5	วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น	10
2.6	วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่มีไกสวิตช์	11
2.7	ตัวอย่างการพันความเหนี่ยวนำ	14
2.8	สปาร์กแกปมีไกสวิตช์	15
2.9	ลาปลาซทรานส์ฟอร์มของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์พื้นฐาน	16
2.10	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเอ็กซ์โพเนนเชียลสองเทอม	18
2.11	เส้นกราฟใช้หาแรงดันดิสชาร์จเบรกดาวน์ 50%	21
2.12	วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์	22
3.1	วงจรการจำลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบ B	28
3.2	ผลการจำลองเมื่อ C_b = 1 nF และ R_d= 300 Ω	29
3.3	ผลการจำลองเมื่อ C_b = 2.5 nF และ R_d= 150 Ω	29
3.4	ผลการจำลองเมื่อ C_b = 5 nF และ R_d= 75 Ω	30
3.5	การพันขดลวดความต้านทานในลักษณะพันสวนทิศทางกัน	31
3.6	การพันตัวต้านทาน	31
3.7	ระยะห่างการพันลวดนิโครมชั้นแรก	32
3.8	ระยะห่างการพันลวดนิโครมชั้นสอง	32
3.9	ตัวต้านทานหน้าคลื่นและหลังคลื่น	32
3.10	รูปแบบการประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบ B	33
3.11	รูปจำลองสามมิติของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	33
3.12	เนมเพลทของตัวเก็บประจุอิมพัลส์	34
3.13	ตัวเก็บประจุอิมพัลส์	34
3.14	การต่ออนุกรมกันของตัวเก็บประจุอิมพัลส์	35
3.15	จุดต่อกราวด์	35
3.16	การติดตั้งตัวต้านทานหน้าคลื่นและหลังคลื่น	36
3.17	แกปทรงกลมชั้นที่ 1	37
3.18	แกปทรงกลมชั้นที่ 2	37
3.19	การติดตั้งแกปทรงกลม	38
3.20	ไดโอด	39
3.21	การติดตั้งไดโอด	39
3.22	ตัวต้านทานดิไวเดอร์	40
3.23	ตัวต้านทานภาคแรงสูง ขนาด 50 MΩ	40
3.24	ตัวต้านทานภาคแรงต่ำ ขนาด 390 kΩ	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
3.25	จุดเชื่อมต่อสาย Coaxial	41
3.26	ตัวเก็บประจุช่วยจุดชนวน	42
3.27	ตำแหน่งของ DC blocking capacitor	42
3.28	การติดตั้ง DC blocking capacitor	42
4.1	การทดสอบค่าองค์ประกอบตัวต้านทาน	43
4.2	เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 300 kV	45
4.3	วงจรทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก	46
4.4	การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก	47
4.5	วงจรทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ	48
4.6	การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	การวางแผนขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานของการทำปริญญานิพนธ์	2
2.1	(ก) ขนาดแรงดันทดสอบ BIL (Basic insulation levels withstand)	9
2.2	(ข) ขนาดแรงดันทดสอบ BIL (Basic insulation levels withstand)	9
2.3	การคำนวณหาค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและเวลาช่วงหลังคลื่นโดยประมาณ	19
3.1	ค่าความต้านทานหน้าคลื่น(R_d)	26
3.2	ค่าความต้านทานหลังคลื่น(R_e)	27
3.3	ช่วงเวลาหน้าคลื่น(T_1)	27
3.4	ช่วงเวลาหน้าคลื่น(T_2)	27
3.5	ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้จำลองวงจรแบบ B	28
3.6	ส่วนประกอบของตัวต้านทานหน้าคลื่นและหลังคลื่นที่ออกแบบ	31
4.1	ผลการทดสอบค่าองค์ประกอบตัวต้านทานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	44
4.2	ค่าความต้านทานเปลี่ยนตามพิกัดโหลด	45
4.3	ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก	47
4.4	ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา

ปัจจุบันห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ขนาด 1200 kV , 22.5 kJ แต่เนื่องจากอุปกรณ์บางส่วนผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลานาน ส่งผลให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ และประกอบกับการควบคุมเวลาหน้าคลื่นและเวลาหลังคลื่นสามารถทำได้ยาก เนื่องจากตัวต้านทานในวงจรถูกประกอบกับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบค่าความต้านทานคงที่ไม่สามารถปรับค่าได้ ทำให้มีข้อจำกัดในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

จากปัญหาดังกล่าวทำให้ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง มีความจำเป็นต้องทำการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบปรับค่าความต้านทานได้ ที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60060-1 เพื่อให้ขอบเขตของพิกัดแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงกว้างขึ้น และสามารถควบคุมเวลาหน้าคลื่น และเวลาหลังคลื่นได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 ศึกษาหลักการทำงาน องค์ประกอบ และหน้าที่ของชุดจุดชนวน ชุดควบคุมแรงดันสำหรับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ และเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

1.2.2 ออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์พิกัด 300 kV

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการสร้างและการวัดแรงดันอิมพัลส์

1.3.2 ศึกษาอุปกรณ์ประกอบต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า

1.3.3 ศึกษาลักษณะของรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า

1.3.4 ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นอิลพัลส์ฟ้าผ่าพิกัด 300 kV

1.3.5 ทำการทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 µs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการสร้างและการวัดแรงดันอิมพัลส์

1.4.2 ศึกษาทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการสร้างชุดจุดชนวนและชุดควบคุมแรงดัน

1.4.3 ออกแบบและจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.4.4 สร้างและทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์พิกัด 300 kV

1.4.5 วิเคราะห์ ปรับปรุงและสรุปผลการทดสอบ

1.4.6 จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ตารางที่ 1.1 การวางแผนขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานของการทำปริญญานิพนธ์

การดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2561									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการสร้างและการวัดแรงดันอิมพัลส์	- - - ——	——	——							
2. ศึกษาทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการสร้างชุดจุดชนวน ชุดควบคุมแรงดัน		- - - ——	——							
3. ออกแบบและจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์			- - - ——	- - - ——	- - - ——					
4. สร้างและทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์				- - - ——	- - - ——	- - - ——	- - - ——	——		
5. วิเคราะห์ ปรับปรุงและสรุปผลการทดสอบ						- - -	- - - ——	- - - ——	——	
6. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์			——	- - - ——	- - - ——	- - - ——	- - - ——	- - - ——	- - - ——	

<- - - - - -> วางแผน

<——————> ดำเนินงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

1.5.1 เพื่อให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สามารถรองรับวัสดุทดสอบที่มีค่าความจุไฟฟ้าได้สูงสุดถึง 4 nF และสามารถควบคุมเวลาหน้าคลื่น และเวลาหลังคลื่นได้

1.5.2 เข้าใจหลักการทำงาน และการออกแบบวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

1.5.3 ใช้ประโยชน์จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันเกินเสิร์จทรานเซียนต์ที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า สำหรับเป้าหมายของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ในห้องทดสอบ เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยหรือ ทดสอบความคงทนฉนวนไฟฟ้าที่แรงดันสูงสำหรับการนำไปใช้งาน เพื่อดูว่าฉนวนสามารถทนแรงดันเกินและความเครียดสนามไฟฟ้าอิมพัลส์ได้ แต่ความคงทนฉนวนไฟฟ้าไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันสูงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับการแปรผันของแรงดันไปตามเวลาอีกด้วย ดังนั้นเพื่อความสะดวกต่อการทดสอบ จึงมีการกำหนดรูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐานขึ้น โดยยึดจากรูปคลื่นจริงที่เกิดตามธรรมชาติเป็นเกณฑ์กำหนด เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าสำหรับใช้ทดสอบฉนวนไฟฟ้าภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยต้องมีการกำหนดหรือควบคุมแรงดันได้ เพื่อให้แรงดันทดสอบมีความแม่นยำ ซึ่งการควบคุมทำได้โดยการใช้ไกสวิตซ์เป็นตัวทำให้ตัวเก็บประจุชั้นแรกเกิดการดิสชาร์จผ่านสปาร์กแกป ทำให้ชั้นอื่น ๆ เกิดการดิสชาร์จตามมา โดยการบังคับจากระยะไกลด้วยสัญญาอิมพัลส์ไกรสวิตซ์ ทำให้ขนาดแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละชั้นมีกระจายค่าแรงดันน้อยลง ซึ่งส่งผลให้แรงดันทดสอบมีความแม่นยำตามที่ต้องการและยังช่วยให้สามารถบังคับออสซิลโลสโคปเริ่มต้นบันทึกภาพรูปคลื่นอิมพัลส์ได้อีกด้วย

2.2 ข้อกำหนดแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์กำหนดด้วยข้อกำหนดของ IEC 60060-1 ต่อไปนี้

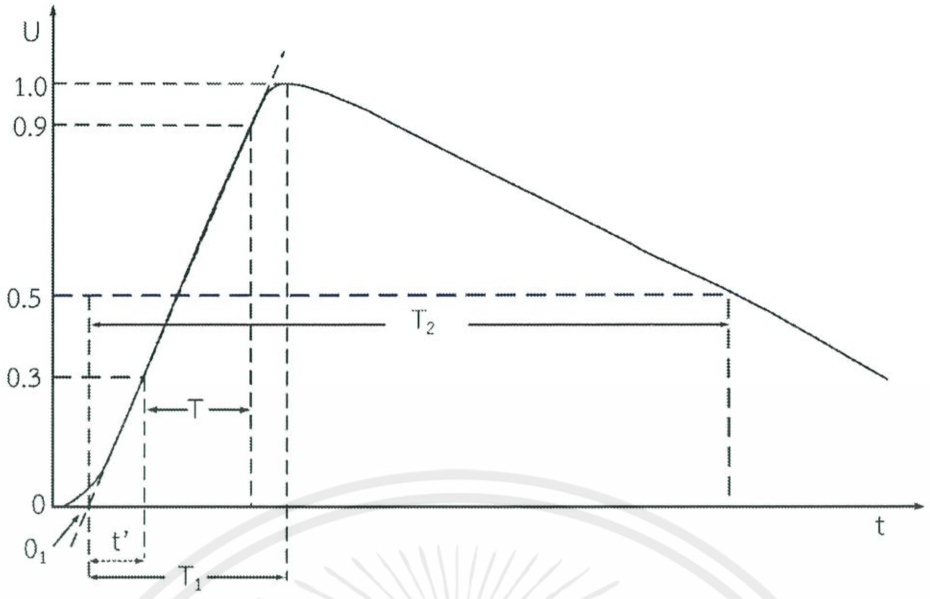
- ขนาดของแรงดัน โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน แต่ถ้ามีคลื่นระลอกซ้อน ที่เกิดจากออสซิลเลชั่นใกล้ๆ ยอดรูปคลื่น ให้เอาค่าเฉลี่ยของยอดรูปคลื่นระลอก
- ขั้วของแรงดันอาจจะเป็นบวกหรือลบก็ได้เมื่อเทียบกับดิน
- เวลาของช่วงหน้าคลื่น T_1 คือช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มต้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด
- เวลาของช่วงหลังคลื่น T_2 คือช่วงเวลานับจากแรงดันเริ่มต้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนถึงขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบ่งได้เป็น

1. รูปคลื่นเต็ม (full wave) คือ แรงดันอิมพัลส์ที่เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆจนถึงค่ายอดแล้วลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าเป็นศูนย์

2. รูปคลื่นตัด (chopped wave) คือ การที่ป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มไปในวัสดุทดสอบ แล้ววัสดุไม่สามารถทนต่อแรงดันทดสอบได้ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวหรือเบรกดาวน์ขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดการลัดวงจรเกิดขึ้น รูปคลื่นตัดอาจเกิดขึ้นที่ส่วนหน้าคลื่นหรือหลังคลื่นก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นแรงดันมาตรฐานแบบ Full wave

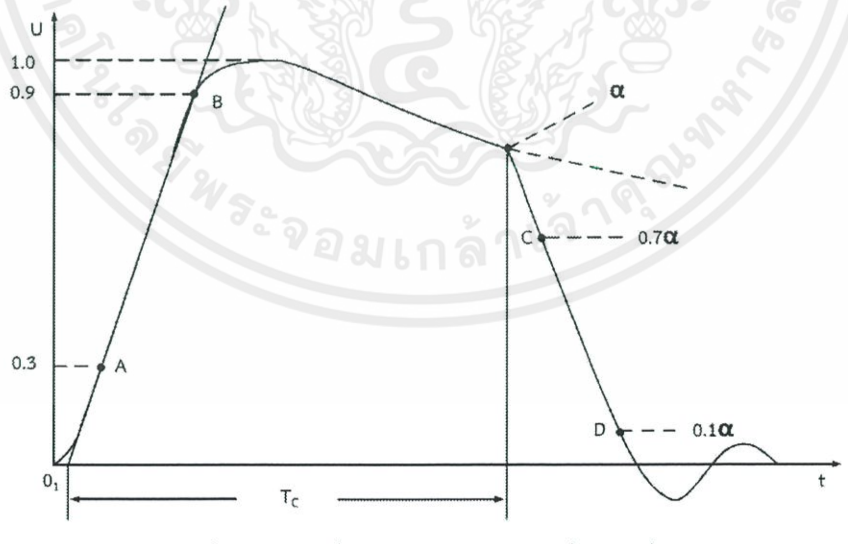
เมื่อ T_1 คือ ช่วงเวลาหน้าคลื่น

T_2 คือ ช่วงเวลาหลังคลื่น

t' คือ ช่วงเวลาตั้งแต่จุดกำเนิดเสมือนจนถึงเวลาที่ค่าแรงดันเพิ่มขึ้นได้ 30% ของค่ายอด

T คือ ผลต่างของเวลาที่ค่าแรงดัน 90% ของค่ายอด กับ ค่าแรงดัน 30% ของค่ายอด

0_1 คือ จุดกำเนิดเสมือนเกิดจากการลากเส้นตรงผ่านจุดที่ค่าแรงดัน 30% ของค่ายอด กับค่าแรงดัน 90% ของค่ายอด โดยจุดที่เส้นตรงตัดแกน t คือจุด 0_1

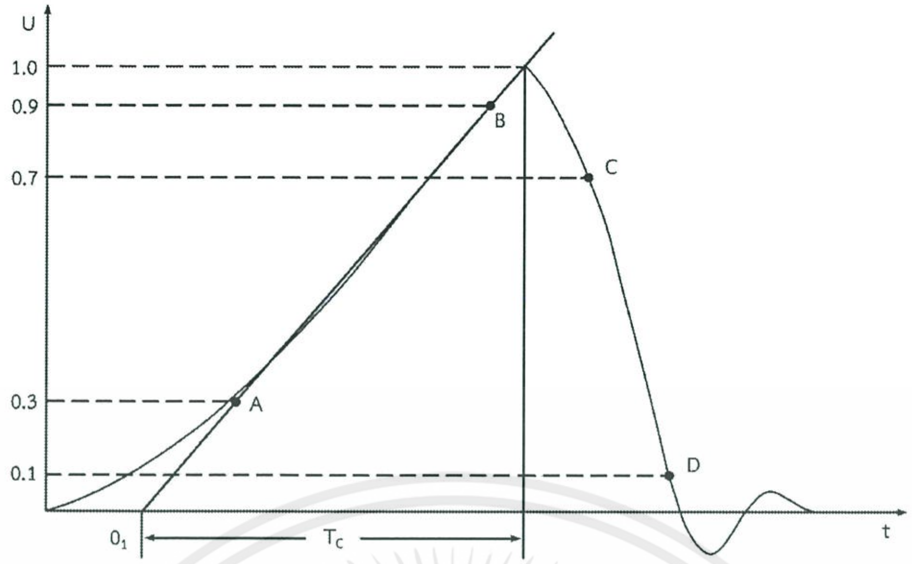


รูปที่ 2.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตัดที่หลังคลื่น

เมื่อ T_c คือ ช่วงเวลาตั้งแต่จุดกำเนิดเสมือนจนถึงเวลาของแรงดันที่ทำให้เกิด chopping ซึ่งเกิดที่ช่วงหลังคลื่น

0_1 คือ จุดกำเนิดเสมือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตัดที่หน้าคลื่น

เมื่อ T_c คือ ช่วงเวลาตั้งแต่จุดกำเนิดเสมือนจนถึงเวลาของแรงดันที่ทำให้เกิด chopping ซึ่งเกิดที่ช่วงหน้าคลื่น

0_1 คือ จุดกำเนิดเสมือน

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานจะมีเกณฑ์กำหนดดังต่อไปนี้

ช่วงเวลาหน้าคลื่น	T_1 = 1.2 μs ± 30%	จะต้องอยู่ในช่วง 0.84 - 1.56 μs
ช่วงเวลาหลังคลื่น	T_2 = 50 μs ± 20%	จะต้องอยู่ในช่วง 40 – 60 μs
ค่ายอดแรงดัน	U_m ยอมให้ผิดพลาดได้เมื่อเกิน 3% ของค่าที่ระบุรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์	

การวัดรูปคลื่นจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะต้องมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในขอบเขตของมาตรฐาน IEC 60060-1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- การวัดช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1) คำนวณได้จาก 10/6 เท่าของเวลาในช่วงที่แรงดันเพิ่มจาก 30% จนถึง 90% ของค่ายอดแรงดันอิมพัลส์

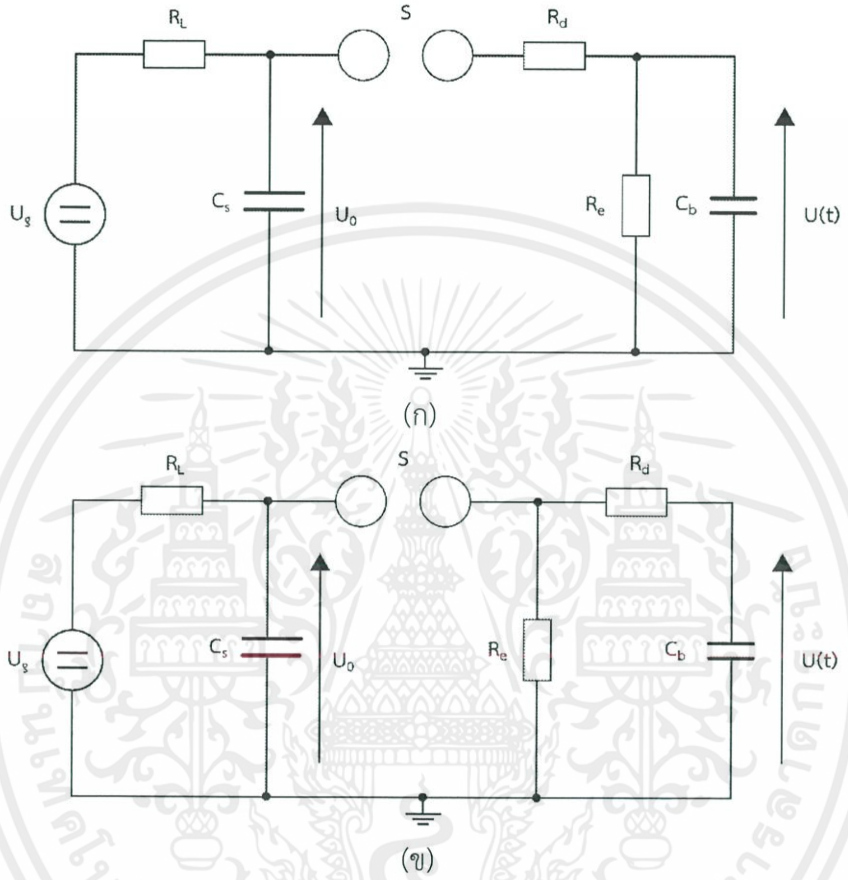
- การวัดช่วงเวลาหลังคลื่น (T_2) คำนวณได้จาก ช่วงเวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นผ่านค่ายอดจนถึงขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

- จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ คือ จุดตัดที่แกนเวลา (t) ของเส้นตรงผ่านจุดที่ค่าแรงดัน 30% ของค่ายอด กับ ค่าแรงดัน 90% ของค่ายอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 วงจรพื้นฐานในการสร้างแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์อาจสร้างขึ้นโดยอาศัยวงจร Transient RC หรือวงจร Transient RLC แต่โดยทั่วไปนิยมใช้วงจร Transient RC มากกว่า โดยอาศัยหลักการอัดประจุเข้าไปที่ตัวเก็บประจุจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการ แล้วปล่อยให้คายประจุหรือดิสชาร์จผ่านวงจร RC โดยวงจรพื้นฐานในการสร้างแรงดันอิมพัลส์สามารถต่อวงจรได้ 2 แบบ คือ วงจร A และวงจร B



รูปที่ 2.4 วงจรพื้นฐานในการสร้างแรงดันอิมพัลส์

(ก) วงจารอิมพัลส์แบบ A

(ข) วงจารอิมพัลส์แบบ B

ความหมายในรูปวงจรทั้งสอง

U_g	=	แรงดันกระแสตรงของตัวจ่ายเป็นตัวป้อนแรงดันอัดประจุให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์
U_0	=	แรงดันอัดประจุกระแสตรง
C_s	=	ตัวเก็บประจุอิมพัลส์
C_b	=	ตัวเก็บประจุโหลด
R_L	=	ตัวต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ
R_d	=	ตัวต้านทานหน่วง ทำหน้าที่ปรับหน้าคลื่น T_1
R_e	=	ตัวต้านทานปล่อยประจุ ทำหน้าที่ปรับช่วงเวลาหลังคลื่น T_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

U(t) = แรงดันอิมพัลส์ที่ผันแปรได้ตามเวลา

SG = สปาร์คแกป ทำหน้าที่กำหนดค่าแรงดันอัดประจุ และเป็นไกสวิตช์ให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s ดิสชาร์จประจุให้โหลด

หน้าที่ของส่วนประกอบในวงจร คือ แรงดันกระแสตรง U_g เป็นตัวป้อนแรงดันอัดประจุให้ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์จนกระทั่งได้แรงดันที่ต้องการ (U_0) เวลาการอัดประจุเร็วหรือช้าถูกควบคุมโดย R_L ค่าแรงดันอัดประจุ U_0 ขึ้นอยู่กับระยะห่างของสปาร์คแกป SG ที่ปรับได้เพื่อให้สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้มากน้อยตามต้องการ สปาร์คแกปนอกจากเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันอัดประจุแล้ว ยังทำหน้าที่เหมือนกับสวิตช์หรือไก (Trigger) เพื่อให้ตัวเก็บประจุ C_S ทำการปล่อยประจุให้กับโหลด การเกิดสปาร์คในช่องสปาร์คแกปจะดำเนินไปด้วยความรวดเร็ว (ใช้เวลาน้อยกว่า 100 μs) ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์คอาจแตกต่างกับค่าที่กำหนดระยะห่างช่องสปาร์คแกปเพราะอากาศไม่ใช่สภาวะมาตรฐาน หากอากาศสะอาดปราศจากฝุ่นละออง ช่วงระยะเวลาระหว่างการเกิดสปาร์คต่อเนื่องจะถี่หรือห่างขึ้นอยู่กับแรงดันกระแสตรงที่ป้อนให้กับ C_S ถ้าปรับ U_g ให้สูงมาก ๆ ก็จะเกิดสปาร์คง่าย หรือสปาร์คถี่ขึ้น เมื่อเกิดสปาร์คที่ SG แรงดันประจุ U_0 จะคร่อม R_d และ C_b ประจุจะถ่ายทอดไปยังวัสดุทดสอบซึ่งแทนด้วย C_b การถ่ายทอดหรือปล่อยประจุนี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับ R_d และ C_b นับเป็นเวลาช่วงหน้าคลื่น จึงกล่าวได้ว่า R_d และ C_b จะเป็นตัวกำหนดเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 เมื่อถ่ายประจุให้ C_b จนเต็มแล้วประจุนี้ก็จะดิสชาร์จ หรือปล่อยประจุออกไปสู่ R_e จึงกล่าวได้ว่า R_e ทำหน้าที่ควบคุมเวลาช่วงหลังคลื่น T_2 คือถ้า R_e มีค่าสูง T_2 ก็จะมีค่ามากตามไปด้วย ค่าคงตัวเวลาคายประจุของ วงจร A เท่ากับ $C_s(R_d+R_e)$ และวงจร B เท่ากับ $C_s \cdot R_e$

ค่ายอดแรงดันที่จ่ายออกที่ปลายแรงสูง U จะน้อยกว่าแรงดันอัดประจุ U_0 เพราะประจุจะกระจายให้กับ C_s และ C_b ฉะนั้นอัตราส่วนของ U ต่อ U_0 จะน้อยกว่า 1 เสมอ และเรียกอัตราส่วนนี้เป็นประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ นั่นคือ

ประสิทธิภาพของวงจร
$$\eta = \frac{U}{U_0} \leq \frac{C_s}{C_s + C_b} \tag{2.1}$$

ฉะนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีควรเลือกให้ C_s มีค่าสูงกว่าโหลด C_b มาก ๆ (เกินกว่า 10 เท่า) ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปจะกำหนดด้วย

- แรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิด
- แรงดันอัดประจุรวมทั้งหมด U_0
- ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด C_s
- พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด
- อัตราการดิสชาร์จจำนวนครั้งต่อนาที
- รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า และแบบสวิตชิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแรงดันพิกัดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ BIL (Basic insulation levels withstand) หรือ SIL (Standard impulse levels) ตามมาตรฐานกำหนดตามระดับแรงดันของระบบที่จะนำอุปกรณ์ไปใช้ได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1 (ก) และ 2.2 (ข)

ตารางที่ 2.1 (ก) ขนาดแรงดันทดสอบ BIL (Basic insulation levels withstand)

Highest Voltage for equipment U_m kV_{rms}	Rate lightning impulse withstand voltage kV_{peak}		Rate power frequency short duration withstand voltage kV_{rms}
	List 1	List 2	
3.6	20	40	10
7.2	40	60	20
12.0	60	75	28
17.5	75	95	38
24.0	95	125	50
36.0	145	170	70

ตารางที่ 2.2 (ข) ขนาดแรงดันทดสอบ BIL (Basic insulation levels withstand)

1	2	3	4
Highest Voltage for equipment U_m kV_{rms}	Base for p.u. values $U_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ kV_{peak}	Rate lightning impulse withstand voltage kV_{peak}	Rate power frequency short duration withstand voltage kV_{rms}
52	42.5	250	95
72.5	59	325	140
123	100	450	185
145	118	550	230
170	139	650	375
245	200	750	325
		850	360
		950	395
		1050	460

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ BIL หรือ SIL ตามที่มาตรฐานกำหนดตามระดับแรงดันของระบบที่จะนำเอาอุปกรณ์ไปใช้ ซึ่งมีหลักการเลือกและการกำหนดเช่นเดียวกับการกำหนดขนาดแรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

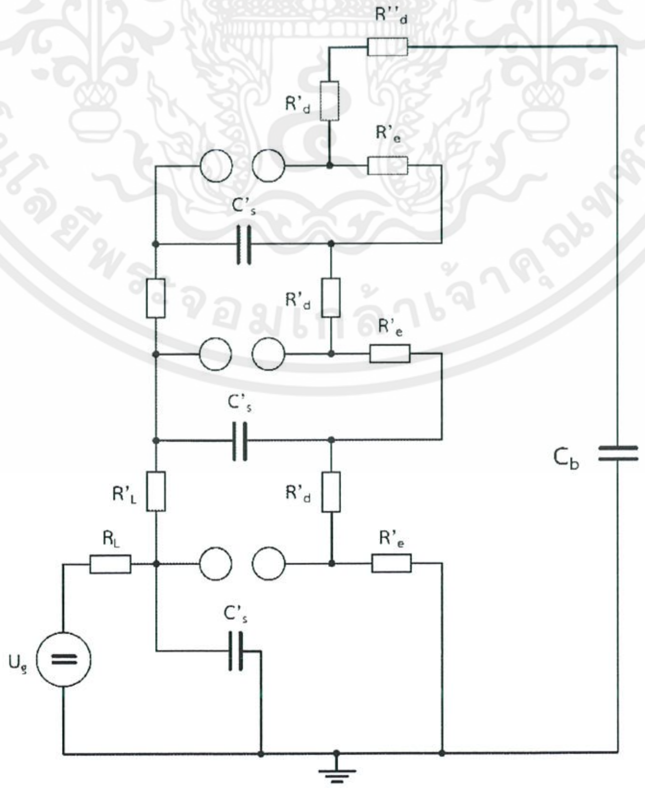
พลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เป็นลักษณะสำคัญประการหนึ่งที่จะต้องกำหนดพลังงานของเครื่องกำเนิดขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้า C_s และแรงดันอัดประจุ U_0 ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$W = \frac{1}{2} C_s U_0^2 \tag{2.2}$$

เมื่อ	W	คือ พลังงานอัดประจุ	มีหน่วยเป็น kJ
	C_s	คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุอิมพัลส์	มีหน่วยเป็น μF
	U_0	คือ แรงดันอัดประจุ	มีหน่วยเป็น kV

2.4 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้นประกอบด้วยวงจรอิมพัลส์พื้นฐานหลายๆ ขั้นมาซ้อนต่อกันตามหลักของวงจรมาร์กซ์ คือ ใช้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์หลายๆตัวมาต่อขนานกันเพื่ออัดประจุดังรูปที่ 2.5 เมื่อได้แรงดันอัดประจุตามที่ต้องการแล้วให้ตัวเก็บประจุเหล่านั้นปล่อยประจุผ่านสปาร์คแกปตัวเก็บประจุที่อัดประจุไว้จะต่อกันแบบอนุกรม จึงได้แรงดันเพิ่มมากขึ้นในแต่ละขั้น วงจรของมาร์กซ์จะจัดให้สปาร์คแกปสามารถปรับระยะได้ และปรับให้สปาร์คแกปล่างมีระยะน้อยที่สุดเพื่อให้เริ่มสปาร์กแกปก่อน และค่อยๆเกิดการสปาร์กแกปในชั้นถัดๆขึ้นมาตามลำดับ



รูปที่ 2.5 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหมายของสัญลักษณ์ในวงจรจะเหมือนกับวงจรขั้นพื้นฐาน เครื่องหมาย ' แสดงถึงเป็นค่าต่อขั้น และเครื่องหมาย " แสดงถึงองค์ประกอบที่เพิ่มขึ้นเพื่อปรับรูปคลื่น

ถ้าเป็นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ปกติ $R_d^{''} = 0$ แต่ถ้าเป็นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตชิ่ง

$$R_d^{''} \gg R_d^{'} \tag{2.3}$$

เมื่อสปาร์คแกปเกิดการสปาร์คครบทุกอัน $C_s^{'}$ จะต่อกันเป็นอันดับ ฉะนั้น C_b จะได้รับอัดประจุผ่านความต้านทานหน่วง $R_d^{'}$ ต่อกันแบบอันดับ และในที่สุดทั้ง $C_s^{'}$ และ C_b ต่างก็จะดิสชาร์จปล่อยประจุผ่าน $R_e^{'}$ และ $R_d^{'}$ ต่อไป

ในกรณีที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มี n ขั้น และถ้า $R_e = \infty$ ความต้านทานปล่อยประจุรวม R_e อาจคำนวณได้จากสมการ

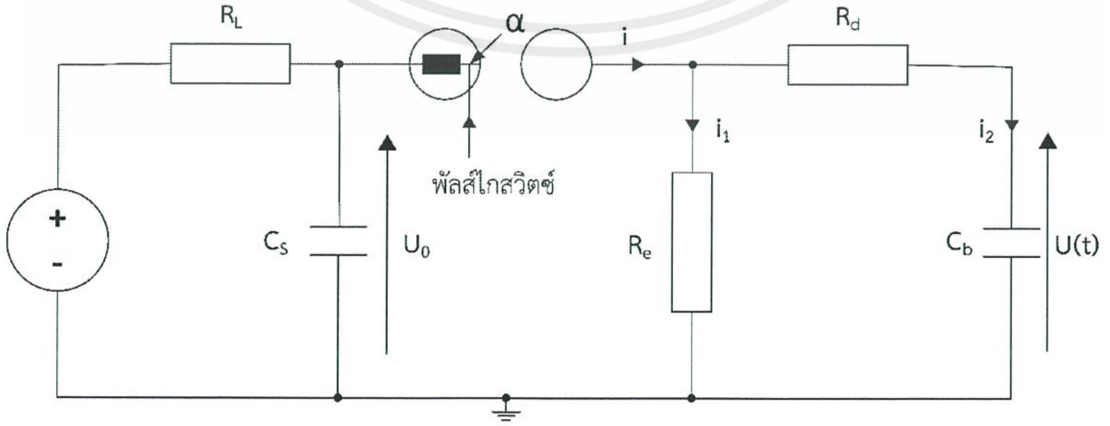
$$R_e = \frac{(n-1)R_e^{'} \cdot (n-1)R_L^{'}}{(n-1)(R_e^{'} + R_L^{'})} + R_e^{'} \tag{2.4}$$

โดยปกติมักจะออกแบบสร้างให้ $R_L^{'} >> R_e^{'}$ ฉะนั้นผลรวมของ R_e จะเท่ากับ $nR_e^{'}$ ถ้าคิดเทียบให้เป็นวงจรขั้นเดียวดังวงจรขั้นพื้นฐานจะได้ค่ารวมต่างๆ ดังนี้

$$U_0 = nU_0^{'} \quad , \quad C_s = \frac{C_s^{'}}{n}$$

$$R_d = nR_d^{'} \quad , \quad R_e = nR_e^{'}$$

แรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต้องกำหนดหรือควบคุมได้ เพื่อให้ค่าแรงดันที่ป้อนเข้าไปที่วัสดุหรืออุปกรณ์ทดสอบหลายๆครั้งได้ค่าคงที่ ซึ่งควบคุมโดยใช้ไกสวิตช์เป็นตัวเริ่มเกิดดิสชาร์จในสปาร์คแกปช่วยที่อยู่ในสปาร์คแกปของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยการบังคับจากระยะไกลดังรูปที่ 2.6 การใช้ไกสวิตช์บังคับให้เกิดการสปาร์คตามที่กำหนดจะช่วยให้แรงดันที่จ่ายออกกระจายน้อยลง หมายความว่าจะได้ค่าแรงดันทดสอบที่คงที่ตามต้องการ และช่วยให้สามารถบังคับออสซิลโลสโคปเริ่มต้นบันทึกภาพรูปคลื่นอิมพัลส์ U(t) ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.6 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่มีไกสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ประกอบไปด้วยองค์ประกอบสำคัญดังต่อไปนี้

- ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s)
- ตัวเก็บประจุโหลด (C_b)
- ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L)
- ความต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) และความต้านทานปรับหลังคลื่น (R_e)
- สปาร์กแกปและไกสวิตช์

2.5.1 ตัวเก็บประจุอิมพัลส์

ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ทำหน้าที่เก็บพลังงานไว้ในรูปสนามไฟฟ้า โดยการอัดประจุโดยแรงดันสูงกระแสตรง แล้วทำการดิสชาร์จพลังงานออกไปอย่างรวดเร็วแบบทรานเชี้ยน ตัวเก็บประจุต้องเป็นประเภทที่มีความเหนี่ยวนำต่ำ หรือไม่มีเลยก็ยิ่งดี เพื่อป้องกันไม่ให้รูปคลื่นแรงดันที่สร้างขึ้นเกิดออสซิเลชัน

ค่าความจุไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะต้องใหญ่พอที่จะทำให้เกิดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน (1.2/50 μs) ได้ โดยค่า C_s จะต้องมีค่าอย่างน้อย10เท่าของค่าตัวเก็บประจุโหลด (C_b)

$$C_s \geq 10C_b \tag{2.5}$$

โดยที่ตัวเก็บประจุโหลด (C_b) คือ ผลรวมของความจุไฟฟ้าวัสดุและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงรวมกับตัวเก็บประจุที่เพิ่มเข้าไปเพื่อปรับรูปคลื่นให้ได้ตามมาตรฐาน

2.5.2 ตัวเก็บประจุโหลด

ตัวเก็บประจุโหลดมีความสำคัญในการปรับรูปแบบคลื่นโดยเฉพาะหน้าคลื่น แต่มีผลน้อยกับหลังคลื่น ในกรณีที่วัสดุมีค่าความจุต่ำ และค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) ก็มีค่าต่ำ ทำให้ช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1) มีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด จึงจำเป็นต้องต่อตัวเก็บประจุโหลดขนานเข้ากับวัสดุ โดยในทางปฏิบัติควรมีค่าตัวเก็บประจุหลายๆ ค่า เพื่อที่จะได้ปรับปรุงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้ในช่วงกว้างตามการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ทดสอบดังกล่าวข้างต้น

2.5.3 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

การดิสชาร์จเป็นสภาวะทรานเชี้ยน มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสอย่างรวดเร็ว ซึ่งก็คือการเปลี่ยนอย่างรวดเร็วของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จะทำให้มีผลกระทบต่อการฉนวนขององค์ประกอบเครื่องกำเนิด ในด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าหรือความเครียดสนามไฟฟ้าจะทำให้อายุการใช้งานขององค์ประกอบเครื่องกำเนิดสั้นลง ถ้าหากมีการดิสชาร์จที่ต่อเนื่องและถี่เกินไปโดยไม่มีการเว้นช่วงพัก ซึ่งหมายถึงการชาร์จหรืออัดประจุเร็วด้วยเช่นกัน เพราะฉะนั้นต้องไม่ให้ เครื่องกำเนิดดิสชาร์จถี่จนเกินไป ซึ่งการจำกัดอัตราการอัดประจุทำได้โดยการนำความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L) ไปต่ออนุกรมระหว่างตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) ให้มีค่ามากเพียงพอ เพื่อให้กระแสอัดประจุมีค่าต่ำก็คือ ไม่เกินค่าพิกัดกระแสของตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง I_0 ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มแรงดันอัดประจุ du/dt ไม่ควรเร็วเกินไป เพราะฉะนั้นสมการค่ากระแสอัดประจุจึงเขียนได้ว่า

$$i = C\frac{du}{dt} \tag{2.6}$$

ฉะนั้นค่า R_L อาจหาได้จาก $R_L \geq \frac{u}{i}$

และจะต้องมีความคงทนต่อแรงดันอัดประจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ได้ เพราะความต้านทาน R_L จะต้องรับแรงดันที่เท่ากับแรงดันอัดประจุที่กำหนดเมื่อตัวเก็บประจุอัดประจุเต็มแล้ว นอกจากนี้จะต้องเลือกค่าโอห์มและแรงดันแล้วยังต้องคำนึงถึงค่ากำลังไฟฟ้าของการอัดประจุด้วย หรือก็คือค่าความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L) ต้องทนต่อกระแสอัดประจุสูงสุดได้

2.5.4 ความต้านทานปรับรูปคลื่น

ความต้านทานปรับรูปคลื่นในที่นี้ก็คือ R_d กับ R_e ซึ่ง R_d จะมีผลต่อช่วงเวลาหน้าคลื่น T_1 ส่วน R_e จะมีผลต่อช่วงเวลาหลังคลื่น T_2

คุณสมบัติของความต้านทานปรับรูปคลื่น R_d กับ R_e ก็คือจะต้องทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้รับพลังงานดิสชาร์จทรานเชี้ยนที่เกิดในเวลาสั้นๆได้ โดยที่ไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเกินไป โดยทั่วไปมักจะไปใช้ความต้านทานที่ทำด้วยลวดความต้านทาน

การที่เราจะศึกษาวิธีการพันความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำนั้น เราควรทราบนิยามและคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำโดย ความเหนี่ยวนำ นิยามคือ “อัตราส่วนของค่าการเชื่อมโยงฟลักซ์ (flux linkage) ผลรวมต่อกระแส I ที่คล้องเกี่ยวกับฟลักซ์ในตัวเหนี่ยวนำ” ซึ่งเมื่อเขียนสูตรก็คือ

$$L = \frac{\phi}{I} \tag{2.7}$$

ค่าการเชื่อมโยงฟลักซ์ จะมีค่าแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของตัวเหนี่ยวนำในกรณีขดลวดซึ่งมีจำนวนรอบของวงเส้นลวดเป็น N และมีฟลักซ์แม่เหล็ก Ø ผ่านวงของขดลวดค่าการเชื่อมโยงฟลักซ์เป็น

$$\phi = N \cdot \lambda \tag{2.8}$$

สนามแม่เหล็กของตัวเหนี่ยวนำในขณะที่มีกระแส I ไหลผ่านมีค่าเป็น

$$W = \frac{1}{2} L \cdot I^2 \tag{2.9}$$

จากสมการข้างบนนี้ให้สูตรสำหรับคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ L ได้คือ

$$L = \frac{2W}{I^2} \tag{2.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าความเหนี่ยวนำที่เป็นขดลวดดังรูปที่ 2.7 นี้ เราสามารถหาความเหนี่ยวนำได้ง่ายคือ

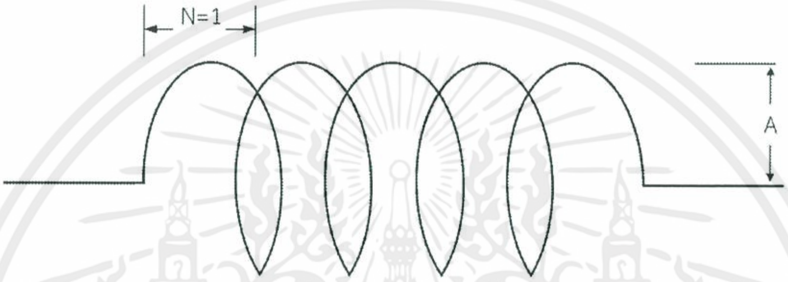
$$L = \frac{\mu N^2 \pi A^2}{\lambda} \quad (2.11)$$

μ = Permeability ของขดลวดความต้านทาน (H/m)

λ = ความยาวของขดลวด (m)

A = รัศมีของพื้นที่หน้าตัดทรงกระบอกขดลวด (m)

N = จำนวนรอบของขดลวด



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการพันความเหนี่ยวนำ

จะเห็นว่าเมื่อเราให้รูปทรงทางเรขาคณิตของขดลวดเป็นทรงปริซึมสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังรูปที่ 2.7 โดยมีค่าความยาวของอะคริลิค และรัศมีเท่ากันแล้ว ค่าความเหนี่ยวนำจะขึ้นกับจำนวนรอบเท่านั้น ดังนั้นอาศัยหลักการนี้เราจะสร้างค่าความเหนี่ยวนำที่มีทิศทางสนามแม่เหล็กตรงกันข้ามมาเสริมขดลวดเป็นชั้นที่สอง ถ้าขนาดความหนาของขดลวดชั้นที่สองน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวแล้ว เมื่อให้จำนวนรอบของการพันขดลวดชั้นที่สองเท่ากับชั้นแรก จะทำให้ความเหนี่ยวนำรวมมีค่าเป็นศูนย์

2.5.5 การหาขนาดของเส้นลวดและเอ็นฉนวน

การหาขนาดของเส้นลวดจะต้องทราบค่าความต้านทานของเส้นลวดที่จะนำมาใช้งานก่อน โดยดูจากตารางคุณสมบัติของเส้นลวดจากทางร้านที่จำหน่ายจึงจะสามารถหาขนาดของเส้นลวดได้ โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- พันลวดรอบแกนจำนวน 2 ชั้น ดังนั้นความต้านทานแต่ละชั้นเท่ากับ 2R

เมื่อ R คือ ความต้านทานที่ต้องการ

- เส้นลวด 1 เส้น ใช้เส้นเอ็น 2 เส้น พันขนานกันไปโดยขดลวดและเส้นเอ็นจำนวน N รอบ

ระยะพันทั้งหมดจะต้องไม่ให้เกินความยาวของแกนฉนวน

- ระยะพันลวดและเอ็นทั้งหมด เท่ากับ $N(\varnothing_1 + 2\varnothing_2)$

เมื่อ $\varnothing_1$ = เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดที่ใช้ (mm)

$\varnothing_2$ = เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นเอ็น (mm)

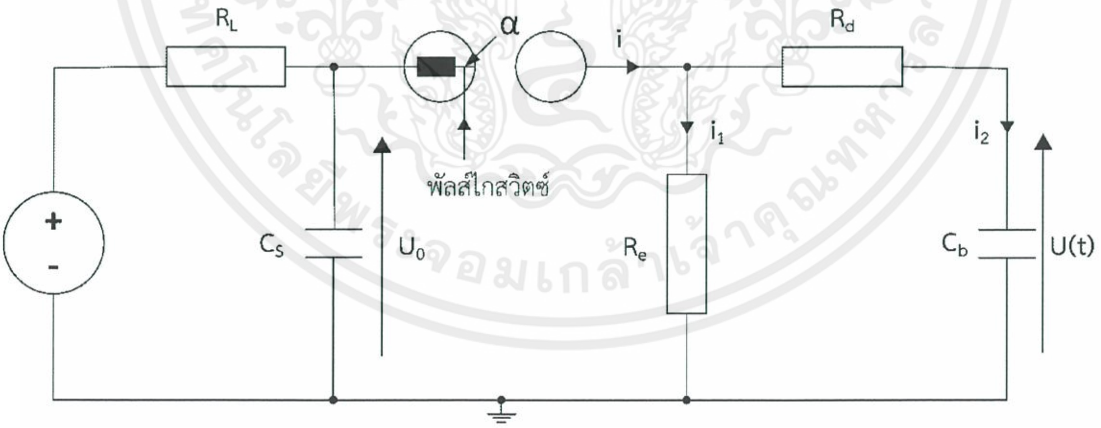
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.6 สปาร์กแกปและไกสวิตช์

แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นเพื่อนำไปทดสอบหรือศึกษาวิจัยจะต้องสร้างให้มีขนาดเท่าเดิมกี่ครั้งก็ได้ โดยตามมาตรฐาน IEC 60060-1 กำหนดไว้ว่าให้ค่าคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ±3% การควบคุมแรงดันอิมพัลส์ให้เท่าเดิมทำได้โดยการใช้ไกสวิตช์บังคับให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เริ่มต้นดิสชาร์จแรงดันอัดประจุที่กำหนด พัลส์ไกสวิตช์จะทำหน้าที่ให้เกิดสปาร์กที่แกปช่วย (Auxiliary gap) ซึ่งจะเป็นแกปแคบๆประมาณ 2-3 มิลลิเมตร อยู่ที่ด้านหนึ่งของสปาร์กแกปคู่แรกของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ แกปช่วยนี้จะได้รับสัญญาณพัลส์ก่อนทำให้เกิดการสปาร์กขึ้นในแกปนี้ก่อน ผลของการเกิดสปาร์กที่แกปช่วยนั้นทำให้เกิดไอออไนเซชั่น มีอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นในสปาร์กแกปคู่แรก และเกิดการดิสชาร์จที่สปาร์กแกปคู่นั้น ทำให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ตัวแรกต่ออนุกรมกับตัวเก็บปประจุอิมพัลส์ตัวที่สอง สปาร์กแกปจึงได้รับแรงดันเป็นสองเท่าของแรงดันอัดประจุและทำให้เกิดการสปาร์กเป็นลำดับถัดมา ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเกิดไปเรื่อยๆตามลำดับ จนเกิดดิสชาร์จที่สปาร์กแกปลูกสุดท้ายหรือแกปบนสุด เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ก็จะดิสชาร์จพลังงานออกไปสู่โหลด ทำให้ได้แรงดันอิมพัลส์ตามที่ต้องการ

ดังนั้นการใช้ไกสวิตช์ช่วยเริ่มต้นจุดสปาร์ก จึงทำให้สามารถกำหนด หรือคาดหมายการเริ่มต้นดิสชาร์จของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้ และค่าแรงดันที่สร้างก็ยังมีค่าเท่าเดิม หรือสามารถเลือกขนาดได้ตามต้องการ และยังสามารถช่วยได้ออสซิลโลสโคปเริ่มต้นบันทึกภาพรูปคลื่นอิมพัลส์ U(t) ได้อีกด้วย

โดยสัญญาณพัลส์ที่ใช้ทำให้เกิดสปาร์กในแกปช่วยนั้น โดยทั่วไปจะใช้หลอดไธราตรอน (Thyratron) ประกอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์สร้างพัลส์ แล้วจึงใช้หม้อแปลงเพิ่มขนาดขึ้นไปเป็นประมาณ 10 กิโลโวลต์ ป้อนแรงดันพัลส์นี้ให้กับแกปช่วยโดยคับปลิงผ่านตัวเก็บประจุแรงสูง



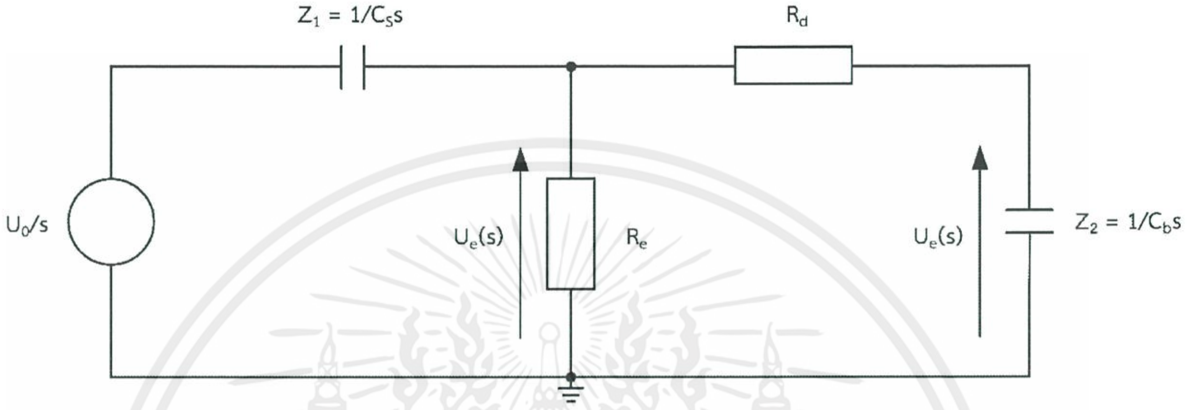
รูปที่ 2.8 สปาร์กแกปมีไกสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์

2.6.1 แรงดันอิมพัลส์ในเทอมเวลา

จากวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์วงจรชนิด B เมื่ออัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s ด้วยแรงดันอัดประจุ U_0 และเกิดการสปาร์กที่สปาร์กแกป S จะทำให้ Cs ต่อกับวงจรปรับรูปคลื่น การวิเคราะห์จะใช้ Laplace transform เขียนวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลาปลาซทรานส์ฟอร์มของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์พื้นฐาน

จากวงจรในรูปที่ 2.9 ค่าแรงดันที่คร่อม R_e จะเขียนได้ว่า

$$U_e(s) = \frac{U_0}{s} \times \frac{Z_2}{(Z_1 + Z_2)} \tag{2.12}$$

เมื่อ

$$Z_1 = \frac{1}{C_s s} \tag{2.13}$$

$$Z_2 = \frac{R_e\left(R_d + \frac{1}{C_b s}\right)}{R_e + R_d + \frac{1}{C_b s}} \tag{2.14}$$

ฉะนั้น

$$U_e(s) = \frac{U_0(R_d R_e C_s C_b s + R_e C_s)}{R_d C_b s + R_e C_s s + R_d R_e C_s C_b s^2} \tag{2.15}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันที่จ่ายออกที่โหลดคิดจาก $U_e(s)$ ตามอัตราส่วนอิมพีแดนซ์จะได้

$$U(s) = \frac{U_e(s)\frac{1}{C_b s}}{R_d + \frac{1}{C_b s}} = \frac{U_e(s)}{R_d C_b s + 1} \tag{2.16}$$

$$U_e(s) = \frac{U_0 R_e C_s}{R_d R_e C_s C_b s^2 + (R_d C_b + R_e C_b + R_e C_s)s + 1} \tag{2.17}$$

$$U_e(s) = \frac{U_0}{R_d C_b} \times \frac{1}{s^2 + \frac{(R_d C_b + R_e C_b + R_e C_s)s}{R_d R_e C_s C_b} + \frac{1}{R_d R_e C_s C_b}} \tag{2.18}$$

ซึ่งอาจเขียนในรูปแบบง่ายๆได้คือ

$$U_e(s) = \frac{U_0}{K} \times \frac{1}{s^2 + as + b}$$

$$U_e(s) = \frac{U_0}{K} \times \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)}\left[\frac{1}{(s - \alpha_1)} - \frac{1}{(s - \alpha_2)}\right] \tag{2.19}$$

เมื่อ

$$a = \frac{R_d C_b + R_e C_s + R_e C_b}{R_d R_e C_s C_b} \tag{2.20}$$

$$b = \frac{1}{R_d R_e C_s C_b} \tag{2.21}$$

$$K = R_d C_b \tag{2.22}$$

α_1, α_2 เป็นค่ารากที่สองค่าสมการ $s^2 + as + b = 0$

นั่นคือ

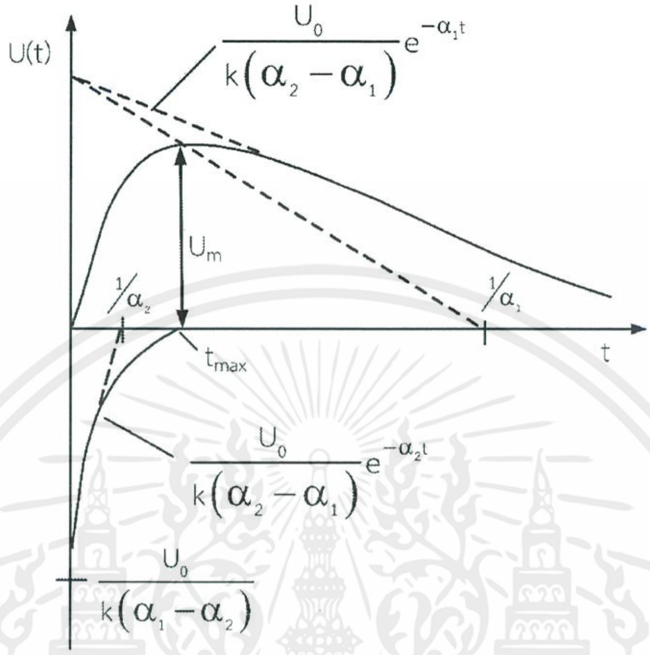
$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{a \pm \sqrt{a^2 - 4b}}{2} \tag{2.23}$$

จึงเขียนค่าแรงดันอิมพัลส์ในเทอมของเวลาได้ว่า

$$U(t) = \frac{U_0}{K} \times \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)}[\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)] \tag{2.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการของแรงดันที่ได้จากวงจรอิมพัลส์จะเห็นได้ว่า แรงดันที่อยู่ในเทอมของเวลา ประกอบด้วยเทอมของเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม ซึ่งมีค่าคงตัวเวลา *(time constant)* เท่ากับ $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเอ็กซ์โพเนนเชียลสองเทอม

ตามนิยามของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่กำหนดด้วยช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1) และหลังคลื่น (T_2) ตามลำดับ จะมีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลาเป็น $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ตามลำดับเช่นเดียวกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ T_1/T_2 อันเป็นตัวแสดงของลักษณะรูปคลื่น ซึ่งค่า T_1 และ T_2 สามารถหาได้ดังนี้

$$T_1 = \frac{K_2}{\alpha_2} \quad \text{และ} \quad T_2 = \frac{K_1}{\alpha_1}$$

กรณีของรูปคลื่น 1.2/50 μs จะมีค่าคงตัวดังนี้

$$K_1 = 0.73 \qquad K_2 = 2.96$$

$$\frac{1}{\alpha_1} = 68.5 \qquad \frac{1}{\alpha_2} = 0.405$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 การคำนวณค่าองค์ประกอบวงจร

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จะถูกกำหนดด้วยช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1) และช่วงเวลาหลังคลื่น (T_2) การคำนวณค่าองค์ประกอบจะขึ้นอยู่กับ C_b และ C_s ซึ่งอาจหาได้จากค่าคงตัวเวลา α_1, α_2 คือ

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{a \pm \sqrt{a^2 - 4b}}{2} \quad (2.25)$$

$$\alpha_1 \times \alpha_2 = b \quad (2.26)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = a \quad (2.27)$$

จากความสัมพันธ์ α_1, α_2 กับ a และ b จะคำวณค่าองค์ประกอบ R_d , R_e ของวงจรชนิด B ได้ดังนี้

$$R_e = \frac{1}{2(C_s + C_b)}\left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right)^2 - \frac{4(C_s + C_B)}{\alpha_1 \alpha_2 C_s}}\right] \quad (2.28)$$

$$R_d = \frac{1}{2C_b}\left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right)\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right)^2 \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 C_s}}\right] \quad (2.29)$$

ในกรณีที่ทราบค่าองค์ประกอบต่างๆ ของวงจรอิมพัลส์ ถ้าจำเป็นต้องการทราบค่าเวลาช่วงหน้าคลื่น และช่วงเวลาหลังคลื่น อาจคำนวณค่าโดยประมาณได้จากค่า k_1 และ k_2 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 การคำนวณหาค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและเวลาช่วงหลังคลื่นโดยประมาณ

	วงจร A	**วงจร B**
T_1	$k_2 \frac{R_d R_e}{R_d + R_e} \cdot \frac{C_b C_s}{C_b + C_s}$	$k_2 R_d \frac{C_b C_s}{C_b + C_s}$
T_2	$k_1 (R_d + R_e)(C_b + C_s)$	$k_1 R_e (C_b + C_s)$
η	$\frac{R_e C_s}{(R_d + R_e)(C_b + C_s)}$	$\frac{C_s}{(C_b + C_s)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 ประสิทธิภาพของวงจรหรือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ประสิทธิภาพของวงจรหรือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เป็นแฟกเตอร์ที่บอกถึง คุณภาพ และความสามารถของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ที่จะสร้างแรงดันค่ายอดออกมาได้มากน้อยเป็นสัดส่วนเท่าใดของแรงดันอัดประจุ ซึ่งโดยปกติประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะมี ค่าน้อยกว่า 1 เสมอ ทั้งวงจร A และ วงจร B

$$\eta = \frac{U_m}{U_0} < 1 \tag{2.30}$$

เมื่อ U_m คือ ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ u(t)

U_o คือ แรงดันอัดประจุให้กับ C_s

ในกรณีแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (1.2/50 μs) ประสิทธิภาพของวงจรหรือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะขึ้นอยู่กับ C_b ต่อ C_s

2.7 การวัดแรงดันอิมพัลส์

การวัดแรงดันอิมพัลส์กรณีคลื่นเต็ม กรณีคลื่นตัดส่วนหน้าคลื่น ($T_C < T_1$) หรือกรณีคลื่นตัดส่วนหลังคลื่น ($T_C > T_1$) เป็นการวัดค่ายอด หรือวัดค่าสูงสุดของคลื่นตัดที่เหลือ โดยวิธีการวัดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูงมีด้วยกัน 2 วิธี

1) วัดด้วยแกปทรงกลม
2) วัดด้วยระบบโวลเตจดิไวเดอร์

2.7.1 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลม

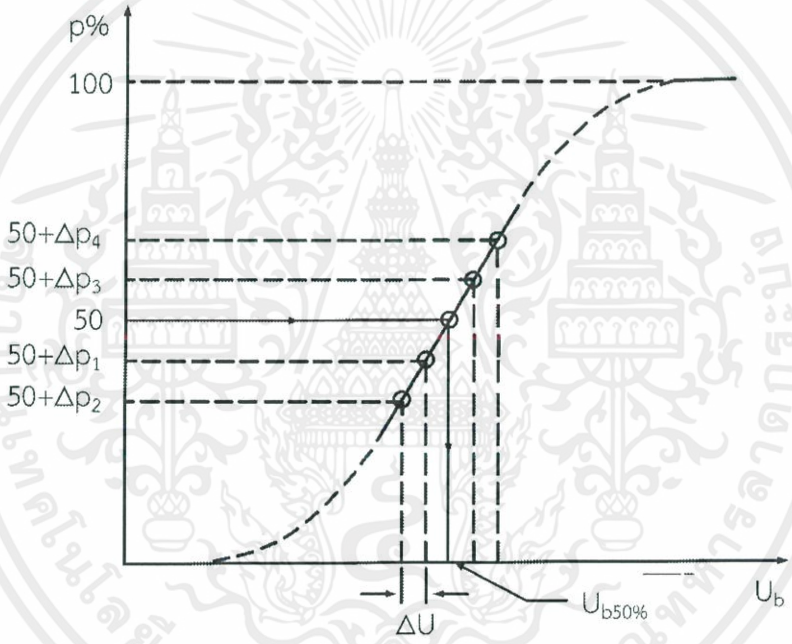
หลักการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลมนั้น ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ของแกปทรงกลม ได้แก่ ระยะแกปของทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม และสภาวะอากาศรอบๆ ทรงกลม การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ในช่องแกปที่เป็นอากาศ ใช้เวลาเพียงไม่กี่ไมโครวินาทีฉะนั้นในกรณีของแรงดันกระแสสลับ ช่วงเวลาของแรงดันที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีผลนัยสำคัญต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ U_b การเกิดเบรกดาวน์จะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าหนึ่ง คือ E_b แต่ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์ ช่วงเวลาของแรงดันจะมีความสำคัญต่อการเกิดเบรกดาวน์ หรือค่าแรงดันเบรกดาวน์ ผลของเวลาดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยเรื่องเวลาล่าช้า (time lag) ของการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซด้วยแรงดันอิมพัลส์

การวัดแรงดันอิมพัลส์นั้นไม่สามารถใช้วิธีค่อยๆ เพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นจนกระทั่งเกิดเบรกดาวน์ได้ หากแต่ต้องใช้การอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุแรงสูงของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ให้ได้แรงดันอัดประจุตามที่ต้องการก่อน แล้วจึงปล่อยดิสชาร์จออกไปที่แกปทรงกลม ซึ่งอาจจะเกิดเบรกดาวน์หรือไม่เกิดก็ได้ ถึงแม้ว่าแรงดันสูงมากพอ ทั้งนี้อาจจะขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็น (probability) และขนาดแรงดัน ถ้าแรงดันอัดประจุต่ำเกินไป ก็จะไม่เกิดเบรกดาวน์ที่แกปทรงกลม แต่ถ้าแรงดันอัดประจุเพิ่มสูงขึ้นมากพอ ก็จะทำให้มีโอกาสเกิดเบรกดาวน์มากขึ้น และถ้าแรงดันอัดประจุสูงมากเกินไปก็จะเกิดเบรกดาวน์ทุกครั้งที่ดิสชาร์จออกไป ด้วยเหตุนี้เองการวัดแรงดันอิมพัลส์จึงกำหนดเป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์ 50% คือ $U_{b50\%}$ ซึ่งหมายถึงค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ค่าปานกลาง เรียกอีกชื่อหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่า ค่าอิมพัลส์วิกฤติ (Critical impulse) ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่ทำให้จำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวน์ที่แกปของทรงกลม เป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ดิสชาร์จออกไป ฉะนั้น การหาค่า $U_{b50\%}$ จึงหาได้โดยวิธีการที่ดิสชาร์จออกไปเป็นจำนวนหลายๆครั้ง จนกระทั่งจำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวน์เป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ดีสชาร์จออกไป สำหรับการวัดค่าแรงดัน $U_{b50\%}$ โดยทั่วไปสามารถวัดได้ 2 วิธี คือ วิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ (multiple level voltage method) และวิธีปรับขึ้นลง (up and down method)

1) วิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ เป็นวิธีหาค่า $U_{b50\%}$ ด้วยเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดเบรกดาวน์กับค่าแรงดัน ป้อนแรงดันอย่างน้อย 10 ครั้งที่แรงดันแต่ละค่า หรือแต่ละระดับต่างกัน ΔU ประมาณ 3% ของค่าแรงดันดิสชาร์จ เบรกดาวน์ 50% ที่คาดหมาย ทดลองที่แรงดันหลายระดับที่สูงกว่า และที่ต่ำกว่าค่าที่ ทำให้เกิดเบรกดาวน์ 50% จากเส้นกราฟนี้จะหาค่าแรงดันดิสชาร์จ 50% ได้ตามรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 เส้นกราฟใช้หาแรงดันดิสชาร์จเบรกดาวน์ 50%

o	เป็นจุดที่ได้จากการทดลอง
$U_{b50\%}$	แรงดันดิสชาร์จเบรกดาวน์ 50%
ΔU	ความแตกต่างของแรงดันที่ป้อนระหว่างระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) วิธีปรับขึ้นลง เป็นวิธีหาค่าแรงดันดิสชาร์จเบรกดาวน์ 50% โดยการเริ่มต้นเลือกแรงดันค่าหนึ่ง U_k ที่คาดว่าจะเป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์ 50% ป้อนเข้าไปที่แกปทรงกลม ถ้าหากไม่เกิดเบรก-ดาวน์ที่แกปทรงกลมให้เพิ่มแรงดันขึ้น ΔU ซึ่งมีค่าประมาณ 3% ของแรงดันที่ดิสชาร์จ 50% จึงป้อนแรงดันใหม่ด้วยค่า $U_k + \Delta U$ แต่ถ้าเกิดเบรกดาวน์ที่แกปทรงกลมที่แรงดัน U_k ให้ลดแรงดัน เหลือเพียง $U_k - \Delta U$ ฉะนั้นค่าแรงดันที่ป้อนต่อไป จะขึ้นอยู่กับผลที่เกิดขึ้นหลังจากการป้อนแรงดันครั้งที่ผ่านมา ปฏิบัติเช่นนี้จนกระทั่งมีจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันมากพอ จะหาค่าแรงดันดีสชาร์จ เบรกดาวน์ 50% ได้จากสมการ

$$U_{50\%} = \frac{\sum n_v U_v}{\sum n} \tag{2.31}$$

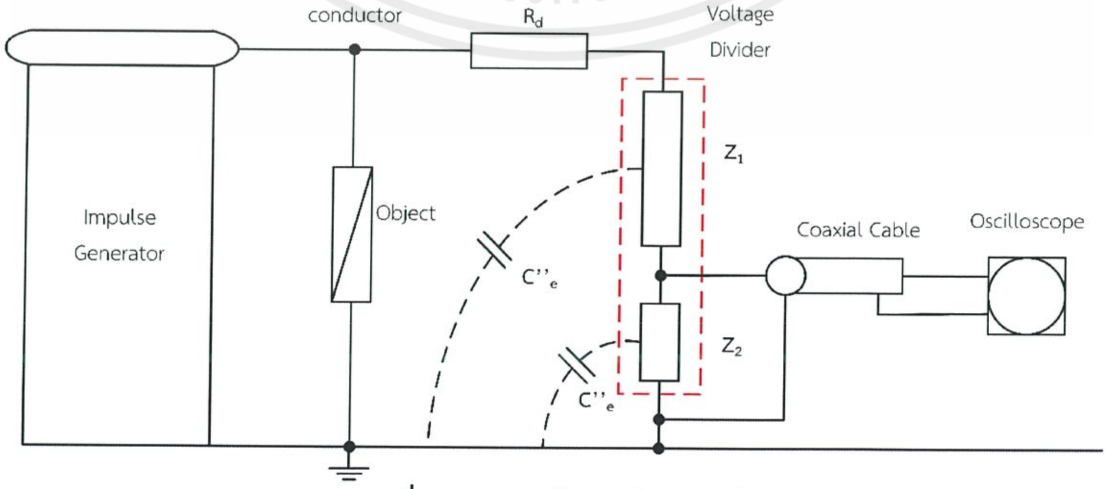
โดยที่ n_v คือ จำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันที่ระดับแรงดัน U_v และ $\sum n$ คือ ผลรวมจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดัน ควรจะมากกว่า 20

ค่าแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ 50% วัดที่สภาพอากาศของห้องที่มิใช่สภาวะมาตรฐาน เมื่อจะเทียบกับค่ามาตรฐานในตาราง ต้องแก้ด้วยตัวประกอบแปลงผันความหนานแน่นของอากาศ k_d

2.7.2 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดิไวเดอร์

การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลมนั้นทราบแต่ค่ายอดเท่านั้นแต่ไม่ทราบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตามเวลา คือรูปคลื่นแรงดันซึ่งจำเป็นต้องทำการวัดและสามารถทำได้โดยใช้ออสซิลโลสโคป (OCS) หรือเครื่องบันทึกแรงดันอิมพัลส์ประกอบเข้ากับ โวลเตจดิไวเดอร์ ถ้าแรงดันที่วัดมีค่าไม่สูงมากนักคือต่ำกว่า 100 kV เทคนิคการวัดจะไม่ยุ่งยากอะไร เมื่อแรงดันเพิ่มสูงมากขึ้นเทคนิคและปัญหาการวัดก็มีมากขึ้นตามขนาดแรงดันที่วัด ในปัจจุบันนี้มีการสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าหลายล้านโวลต์ เมื่อสร้างขึ้นมาก็ต้องหาวิธีการวัดให้ได้

การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดิไวเดอร์โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 4 ส่วน คือ สายตัวนำแรงสูงโวลเตจดิไวเดอร์ซึ่งภายในประกอบด้วยอิมพิแดนซ์ภาคแรงสูง (Z_1) และอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ (Z_2) สูงประมาณ 2.5 m/MV เคเบิลวัดแบบแกนร่วม (Z_C) และออสซิลโลสโคป (OCS) ดังในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรในรูปที่ 2.12 องค์ประกอบในระบบวัดแรงดันจะมีหน้าที่ต่างๆ ดังนี้

1) สายความต้านทานหน่วง R_d ทำหน้าที่หน่วงการแกว่งในภาวะทรานเซียนต์ ที่เกิดจากค่าเหนี่ยวนำของสายตัวนำกับค่าเก็บประจุของโวลเตจดิไวเดอร์ ตัวความต้านทานหน่วงที่ใช้เป็นแบบไร้ความเหนี่ยวนำ โดยอาจต่อที่ต้นสายตัวนำหรือที่อิเล็กโตรดแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ ในกรณีที่สายตัวนำมีความยาวมาก การต่อความต้านทานหน่วงที่ต้นสายตัวนำ โดยให้มีค่าประมาณเท่ากับค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำ จะช่วยหน่วงการแกว่งที่เกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่เท่ากันของสายตัวนำกับวงจรกำเนิดแรงดันและโวลเตจดิไวเดอร์

2) สายตัวนำระหว่างวัสดุทดสอบกับโวลเตจดิไวเดอร์ โดยทั่วไปโวลเตจดิไวเดอร์จะต้องอยู่ห่างจากอุปกรณ์ทดสอบ ความยาวของสายตัวนำจะต้องมีความยาวอย่างน้อยเท่ากับความสูงโวลเตจของดิไวเดอร์ ขนาดของสายตัวนำจะต้องมีขนาดโตพอที่จะไม่ทำให้เกิดโคโรน่า ซึ่งเป็นคลื่นรบกวนต่อการวัดระบบแรงดันในวงจรทดสอบ โดยทั่วไปสายตัวนำมักกอยู่ในแนวระดับ ซึ่งทำให้คลื่นเดินทาง จะมีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วแสง c จากสูตร $Z_L = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}}$ และ $\tau_L = \sqrt{L_L C_L} = \frac{\lambda}{c}$

โดย L_L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ

C_L คือ ค่าเก็บประจุ

λ คือ ความยาวของสายตัวนำ

ดังนั้น จะได้ $Z_L = \frac{\lambda}{cC_L}$ ค่าเก็บประจุของสายตัวนำสามารถคำนวณได้ โดยสมมติว่าสายตัวนำเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง d วางอยู่สูง H เหนือระนาบดิน สมการหาค่าเก็บประจุของสายตัวนำคือ

$$C_L = \frac{2\pi\varepsilon_0 \lambda}{B} \tag{2.32}$$

โดยที่

$$B = \ln\left(\frac{4H}{d}\right) - \ln\frac{1}{2}\left(1 + \sqrt{1 + 2\left(\frac{H}{A}\right)^2}\right)$$

เนื่องจาก $C = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$ เมื่อ μ_0 คือค่า permeability ของสุญญากาศ ε_0 คือค่า permittivity ของสุญญากาศจะได้ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำเป็น

$$(Z_L)_{hor} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \approx 60B(l,d,H) \tag{2.33}$$

3) โวลเตจดิไวเดอร์ VD ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันสูงลงมา ให้มีขนาดอยู่ในย่านที่มีอุปกรณ์วัดในภาคแรงต่ำสามารถวัดได้

4) เคเบิลวัด Z_c ทำหน้าที่ส่งสัญญาณจากภาคแรงต่ำของดิไวเดอร์มายังอุปกรณ์วัด เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน และลดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปเป็นแบบแกนร่วม (Coaxial cable) ที่มีการลดทอนของสัญญาณต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) อุปกรณ์วัดและบันทึกรูปคลื่นอาจเป็นโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอดหรือออสซิลโลสโคป (OSC) หรือเครื่องบันทึกอิมพัลส์ อุปกรณ์เหล่านี้จะอยู่ในห้องที่มีชิลด์เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก

6) ระบบสายดิน ทำหน้าที่เชื่อมจุดต่อลงดินของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบทดสอบ ให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน ปกติสายดินจะเป็นชนิดที่มีความเหนี่ยวนำต่ำเพื่อให้แรงดันตกในสายดินมีค่าน้อยที่สุดโดยทั่วไปจะใช้แผ่นโลหะบาง เช่น ทองแดงแผ่นบาง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการประกอบสร้าง

ในบทนี้เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ในโครงงานนี้เป็นการพัฒนาเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ให้สามารถควบคุมช่วงเวลาหน้าคลื่น และช่วงเวลาหลังคลื่นได้ง่ายยิ่งขึ้น โดยให้กำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่มีรูปคลื่นตามมาตรฐาน IEC 60060-1 กำหนด ซึ่งมีเงื่อนไขการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.1 เงื่อนไขการออกแบบ

3.1.1 แรงดันอัดประจุรวมและความจุไฟฟ้ารวม

ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ 2 μF พิกัดแรงดัน 75 kV ต่ออนุกรม 2 ตัวต่อชั้นจะได้ความจุไฟฟ้าต่อชั้น C_S = 1 μF และแรงดันอัดประจุต่อชั้น U_0 = 150 kV โดยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีจำนวน 2 ชั้น ดังนั้นได้แรงดันอัดประจุรวมเป็น

$$U_0 = 2 \times 150\text{kV} = 300\text{kV}$$

ได้ความจุไฟฟ้ารวมเป็น

$$C_s = \frac{1\mu\text{F}}{2} = 0.5\mu\text{F}$$

3.1.2 พลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} C_s U_0^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 0.5 \times 10^{-6} \times 300^2 \times 10^6 \\ &= 22.5\text{kJ} \end{aligned}$$

3.1.3 ค่าความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ R_L

ค่าความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ โดยจะพิจารณาจากพิกัดกำลังของหม้อแปลงและคำนวณหากระแสสูงสุดที่จะให้หม้อแปลงจ่ายซึ่งเท่ากับ

$$R_L = \frac{kV/_S}{i_C}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ค่าความต้านทานหน้าคลื่น (R_d) และค่าความต้านทานหลังคลื่น (R_e)

1) ค่าความต้านทานหน้าคลื่น R_d

เนื่องด้วยเวลาหน้าคลื่นตามมาตรฐานคือ T_1 = 1.2 μs ± 30% ดังนั้นค่าความต้านทาน หน้าคลื่น ตามขอบเขตช่วงเวลาหน้าคลื่น T_1 = 0.84 - 1.56 μs สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$R_d = \frac{T_1\left(C_b + C_s\right)}{k_2 C_b C_s} \tag{3.1}$$

2) ค่าความต้านทานหลังคลื่น R_e

เนื่องด้วยเวลาหลังคลื่นตามมาตรฐานคือ T_2 = 50 μs ± 20% ดังนั้นค่าความต้านทานหน้าคลื่น ตามขอบเขตช่วงเวลาหน้าคลื่น T_2 = 40 μs ถึง 60 μs สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$R_e = \frac{T_2}{k_1\left(C_b + C_s\right)} \tag{3.2}$$

จากสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2 เมื่อ k_1=0.73 และ k_2=2.96 สามารถคำนวณหาค่า R_d และค่า R_e ได้ค่าดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ค่าความต้านทานหน้าคลื่น (R_d)

C_b (nF)	C_s (μF)	T_1 (μs)	k_2	R_d (Ω)
1	0.5	0.84	2.96	284.3513
1	0.5	1.56	2.96	528.0810
2.5	0.5	0.84	2.96	114.0810
2.5	0.5	1.56	2.96	211.8648
5	0.5	0.84	2.96	57.3243
5	0.5	1.56	2.96	106.4594

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ค่าความต้านทานหลังคลื่น (R_e)

C_b (nF)	C_s (μF)	T_2 (μs)	k_1	R_e (Ω)
1	0.5	40	0.73	109.3703
1	0.5	60	0.73	164.0554
2.5	0.5	40	0.73	109.0438
2.5	0.5	60	0.73	163.5657
5	0.5	40	0.73	108.5040
5	0.5	60	0.73	162.7560

จากค่าความต้านทานหน้าคลื่น(R_d) และค่าความต้านทานหลังคลื่น(R_e) ที่ได้ตามตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 สามารถพิจารณาเลือกตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานที่เหมาะสมได้ โดยใช้ตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานเท่ากับ 150 Ohm

ตารางที่ 3.3 ช่วงเวลาหน้าคลื่น(T_1)

C_b (nF)	C_s (μF)	R_d (Ω)	k_2	T_1 (μs)
1	0.5	300	2.96	0.8862
2.5	0.5	150	2.96	1.1044
5	0.5	75	2.96	1.0990

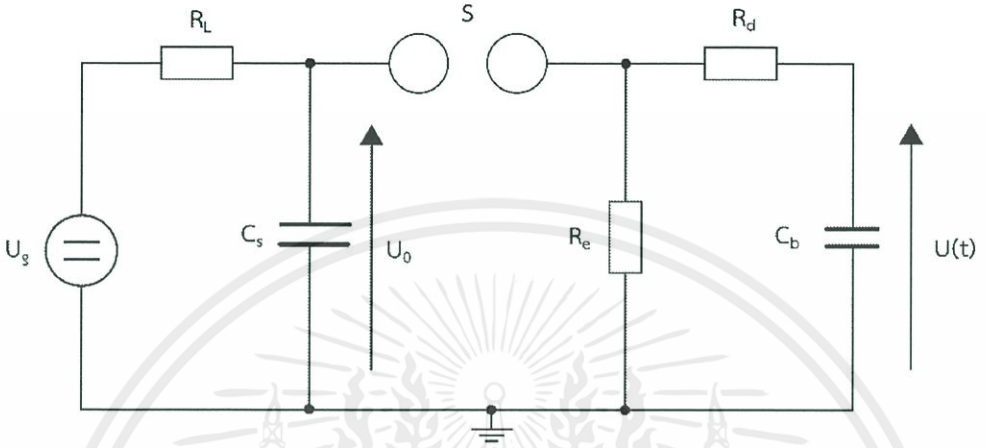
ตารางที่ 3.4 ช่วงเวลาหน้าคลื่น(T_2)

C_b (nF)	C_s (μF)	R_e (Ω)	k_1	T_2 (μs)
1	0.5	150	0.73	54.8595
2.5	0.5	150	0.73	55.0237
5	0.5	150	0.73	55.2975

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ใช้โปรแกรม ATPDraw ทำการจำลองวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบ B โดยทำการจำลองเมื่อโหลดมีค่า 1nF , 2.5 nF และ 5 nF และใช้ค่าความต้านทานหน้าคลื่น 300 Ω, 150 Ω และ 75 Ω ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบเวลาหน้าคลื่นและเวลาหลังคลื่น



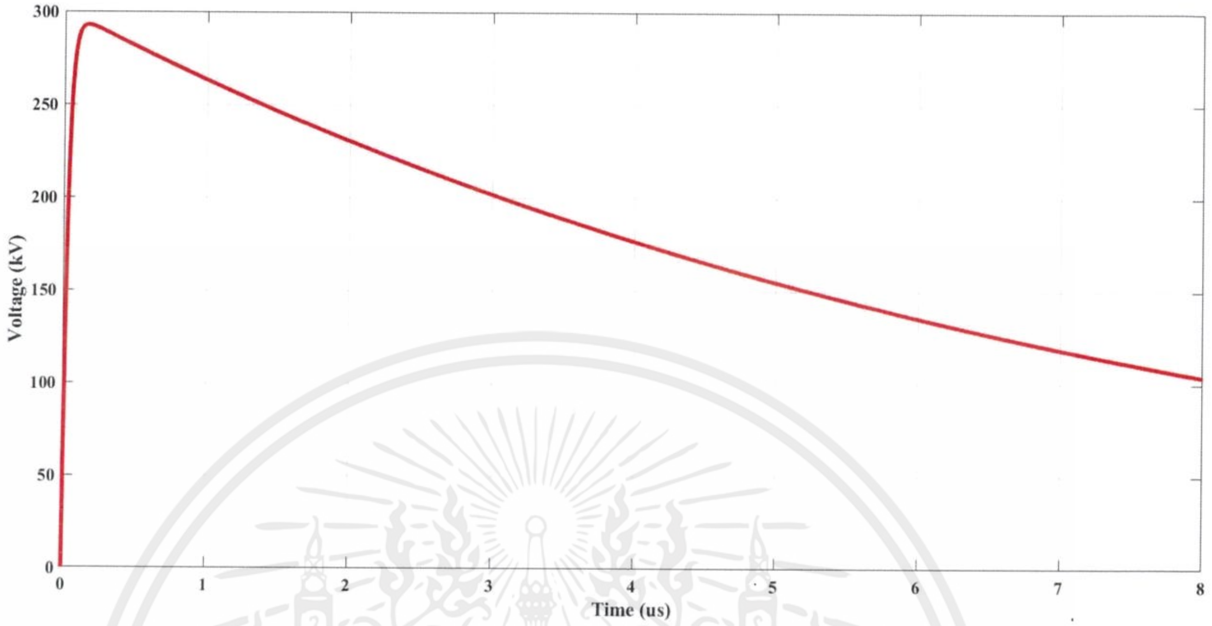
รูปที่ 3.1 วงจรการจำลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบ B

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้จำลองวงจรแบบ B

อุปกรณ์	ขนาด	จำนวนตัว
C_s	0.5 nF	1
C_b	1 nF 2.5 nF 5 nF	1 1 1
R_d	300 Ω, 150 Ω, 75 Ω	1 1 1
R_e	150 Ω	1

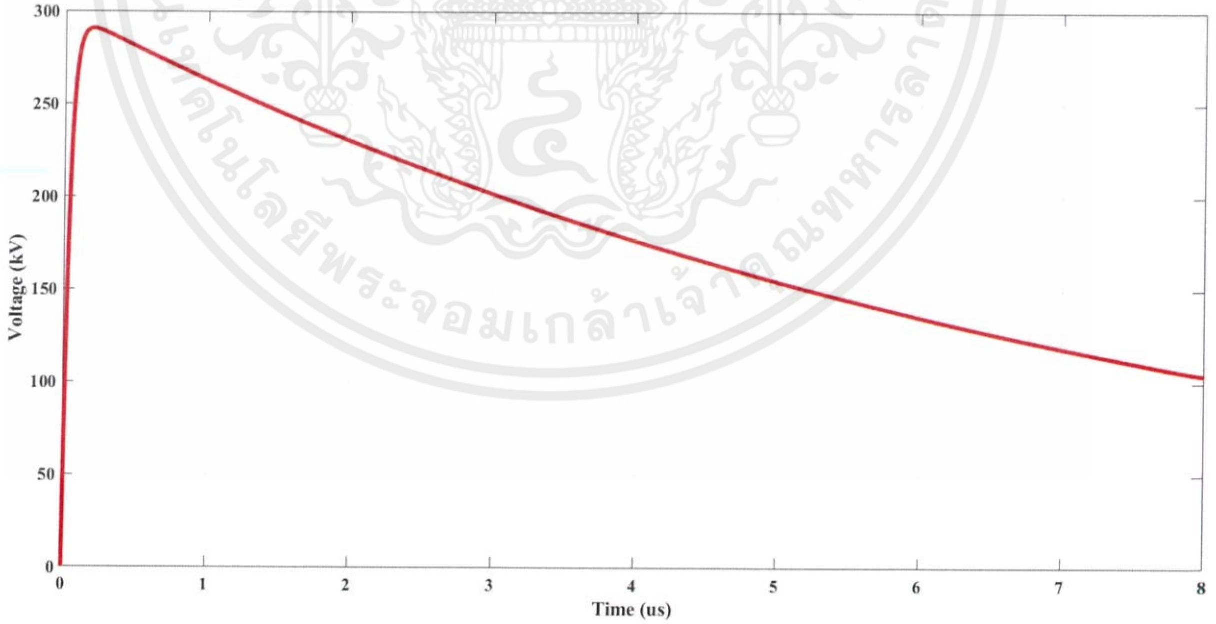
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลอง



รูปที่ 3.2 ผลการจำลองเมื่อ C_b = 1 nF และ R_d= 300 Ω

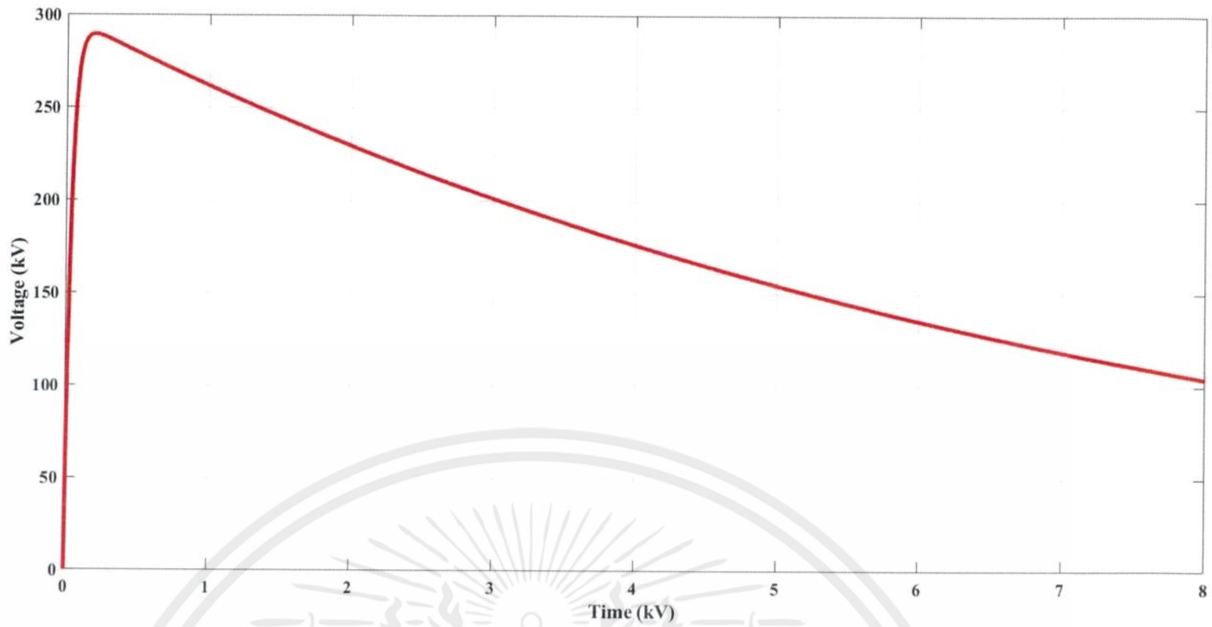
ค่ายอด 292.85 kV, T_1=0.9 μs และ T_2 = 54.02 μs



รูปที่ 3.3 ผลการจำลองเมื่อ C_b = 2.5 nF และ R_d= 150 Ω

ค่ายอด 290.72 kV, T_1 = 1.1167 μs และ T_2 = 54.63 μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ผลการจำลองเมื่อ C_b = 5 nF และ R_d= 75 Ω

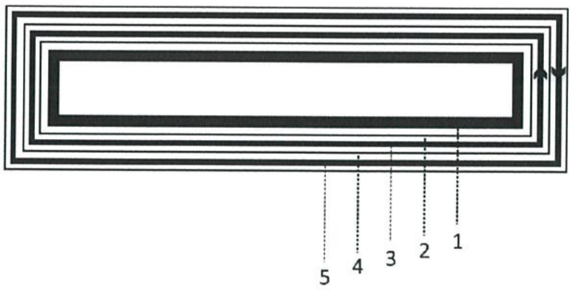
ค่ายอด 289.34 kV, T_1 = 1.1167 μs และ T_2 = 54.84 μs

3.3 การออกแบบและประกอบสร้างตัวต้านทานหน้าคลื่นและหลังคลื่น

ในการออกแบบความต้านทาน จะต้องเป็นความต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำ เนื่องจาก ค่าความต้านทานหน้าคลื่นและหลังคลื่น เป็นตัวปรับช่วงเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ ตามลำดับ ดังนั้นในการออกแบบตัวต้านทานทั้งสองตัวนี้จะต้องทำให้มีค่าความเหนี่ยวนำน้อยที่สุดหรือไม่ให้มีเลย เพื่อไม่ให้เกิดการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยในการออกแบบวิธีการพันนั้นเลือกใช้วิธีการพันแบบสวนทิศทางกันเพื่อให้ฟลักซ์แม่เหล็กหักล้างกันเป็นศูนย์ ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดค่าความเหนี่ยวนำขึ้น โดยวิธีการออกแบบการพันจะเป็นดังต่อไปนี้

การพันโดยใช้นิเกิล - โครเมียม (NiCr) เป็นขดลวดความต้านทาน และใช้แผ่นอะคริลิคเป็นแกนกลาง เอ็นเป็นฉนวนกั้นระหว่างขดลวดต้านทานโดยก่อนจะพันใส่อะคริลิคนั้น จะหุ้มอะคริลิค ด้วยไมล่าก่อนเพื่อกันให้ไม่ให้ขอบของอะคริลิคบาดเอ็นขาด โดยการพันนั้นจะพันเป็นสองชั้นโดยจะมีแผ่นไมล่าหุ้มในแต่ละชั้น โดยแต่ละชั้นต่อกันแบบขนานและพันสวนทิศทางกันเพื่อให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นหักล้างกันเป็นศูนย์ หลังจากพันเสร็จแล้วก็พันไมล่าหุ้มไว้อีกรอบเพื่อเป็นการระบายความร้อนและป้องกันฝุ่น หรือสิ่งสกปรกที่จะเข้ามายังเอ็นและขดลวด ซึ่งอาจทำให้เกิดการลัดวงจรในระหว่างรอบจะได้ซึ่งรูปในการพันดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

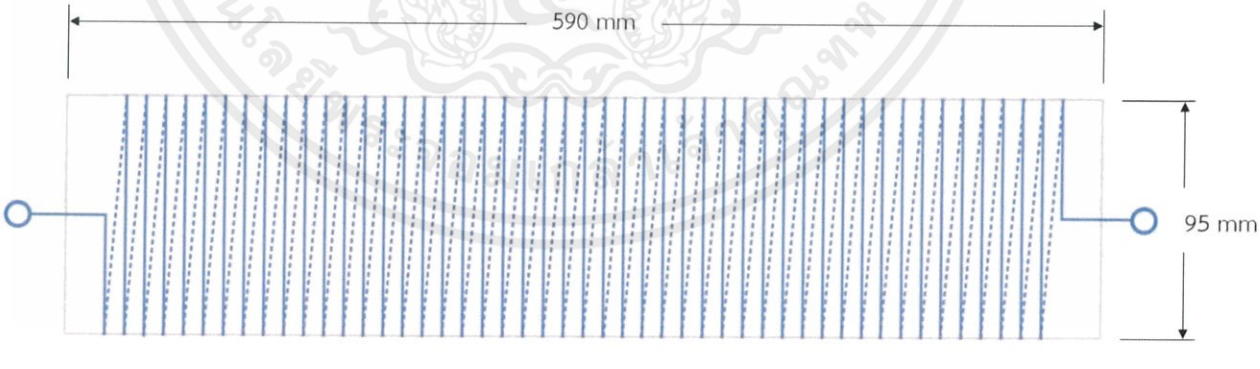


1. แกนอะคริลิค
2. แผ่นไมล่า
3. ขดลวดและเอ็นชั้นที่ 1
4. แผ่นไมล่า
5. ขดลวดและเอ็นชั้นที่ 2

รูปที่ 3.5 การพันขดลวดความต้านทานในลักษณะพันสวนทิศทางกัน

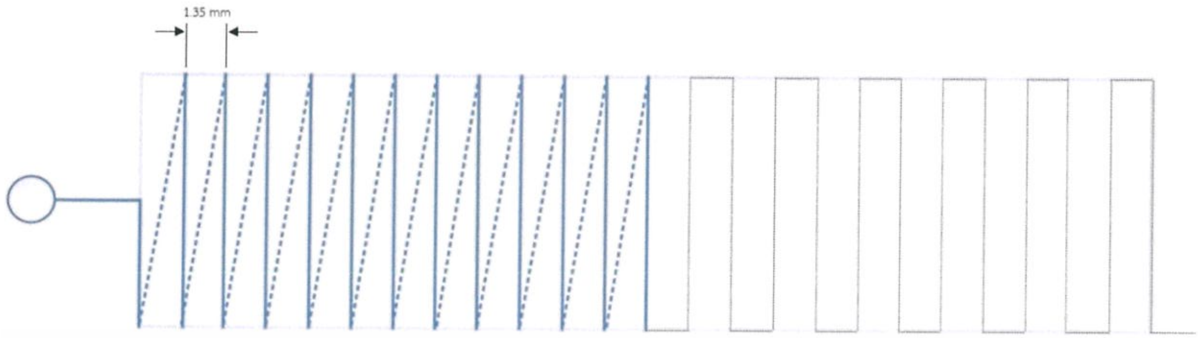
ตารางที่ 3.6 ส่วนประกอบของตัวต้านทานหน้าคลื่นและหลังคลื่นที่ออกแบบ

ส่วนประกอบ	**ชั้นแรก**	**ชิ้นสอง**
ลวดนิโครม	AWG 26 6.81 Ω / m.	AWG 26 6.81 Ω / m.
แกนพัน	95 x 590 x 10 mm.	95 x 590 x 10 mm.
ความต้านทาน	299.5 Ω	302.6 Ω
ความยาวลวดต่อหนึ่งรอบ	210 mm.	214 mm.
ความยาวลวดทั้งหมด	43.978 m.	44.433 m.

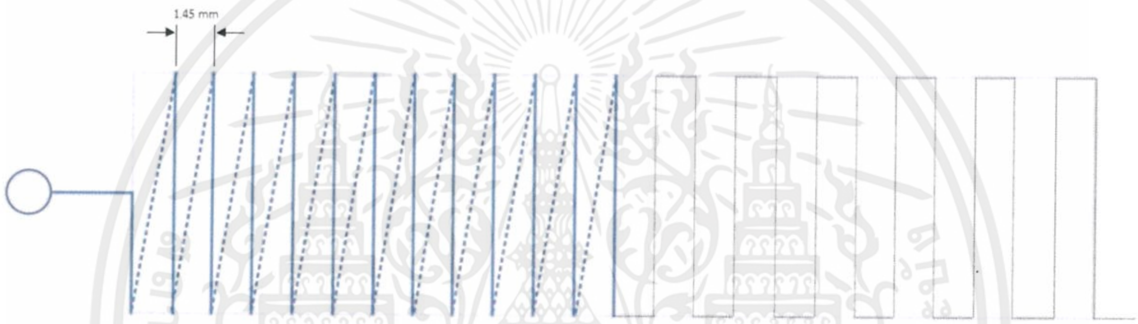


รูปที่ 3.6 การพันตัวต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ระยะห่างการพันลวดนิโครมชั้นแรก



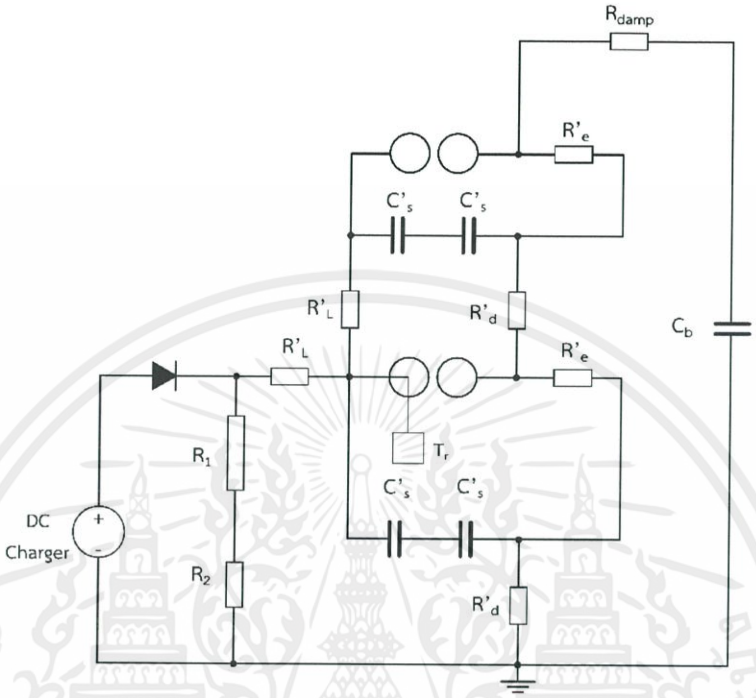
รูปที่ 3.8 ระยะห่างการพันลวดนิโครมชั้นสอง

รูปที่ 3.9 ตัวต้านทานหน้าคลื่นและหลังคลื่น

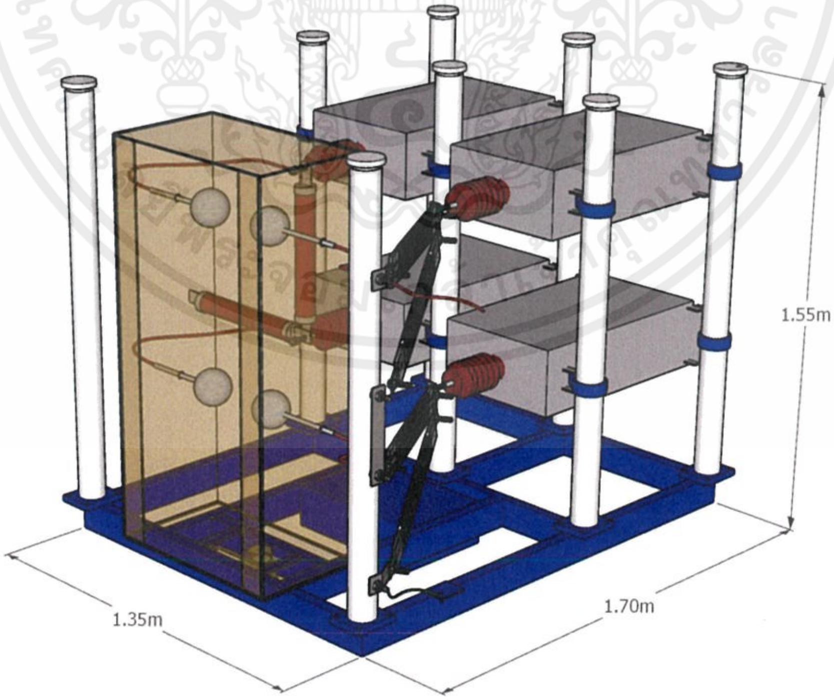
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ถูกออกแบบและประกอบสร้างขึ้นตามหลักการของการสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตามที่มาตรฐานกำหนด โดยเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบ B



รูปที่ 3.11 รูปจำลองสามมิติของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

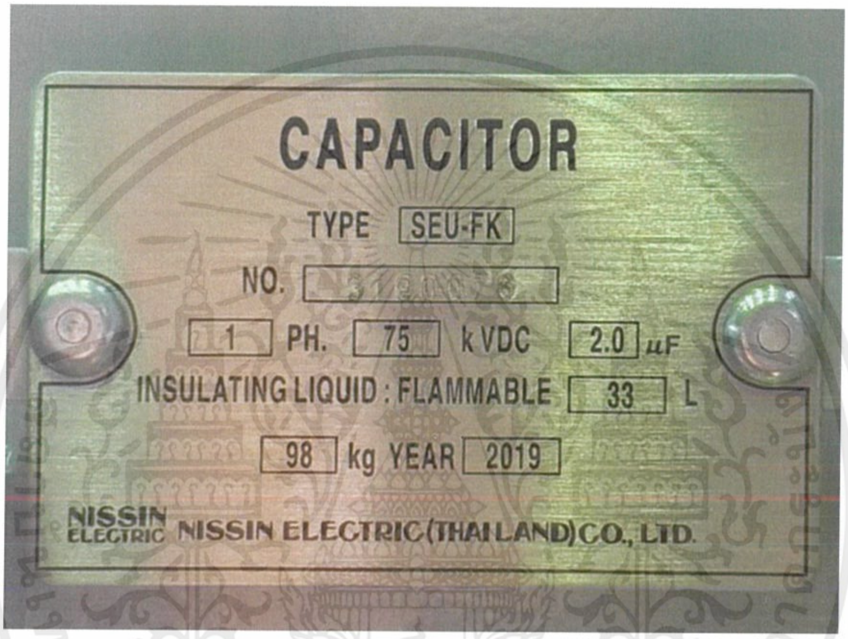
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

การประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 300 kV นั้น ประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

3.5.1 ตัวเก็บประจุอิมพัลส์

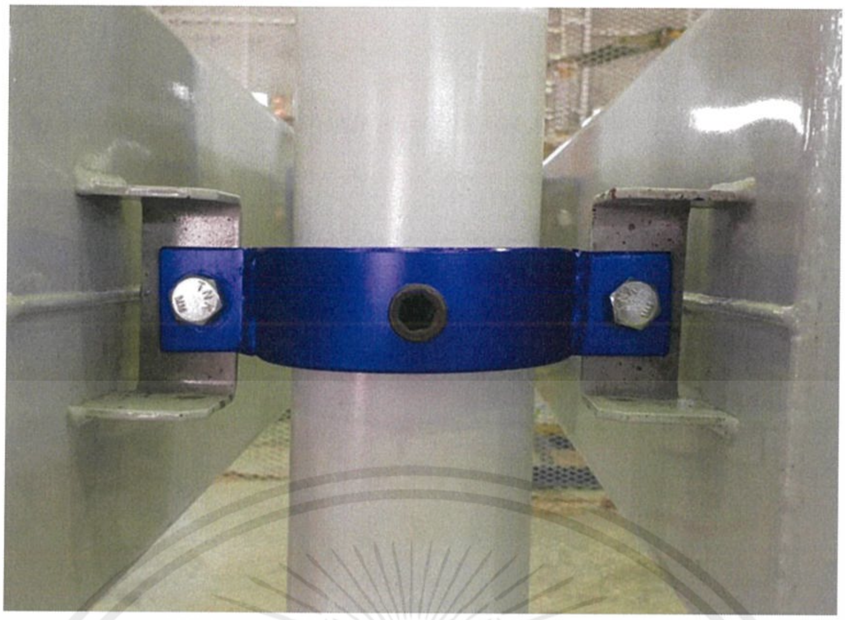
เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะประกอบด้วยตัวเก็บประจุอิมพัลส์ขนาด 2 μF พิกัด 75 kV จำนวน 4 ตัว โดยแบ่งเป็น 2 ชั้น ๆ ละ 2 ตัว ซึ่งต่ออนุกรมกันด้วยตัวถังของตัวเก็บประจุ



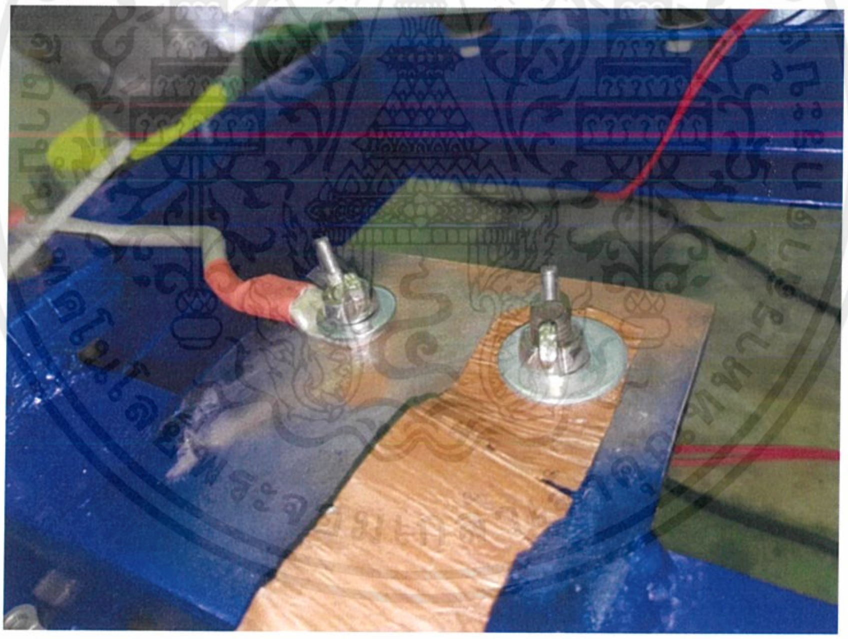
รูปที่ 3.12 เนมเพลทของตัวเก็บประจุอิมพัลส์

รูปที่ 3.13 ตัวเก็บประจุอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 การต่ออนุกรมกันของตัวเก็บประจุอิมพัลส์

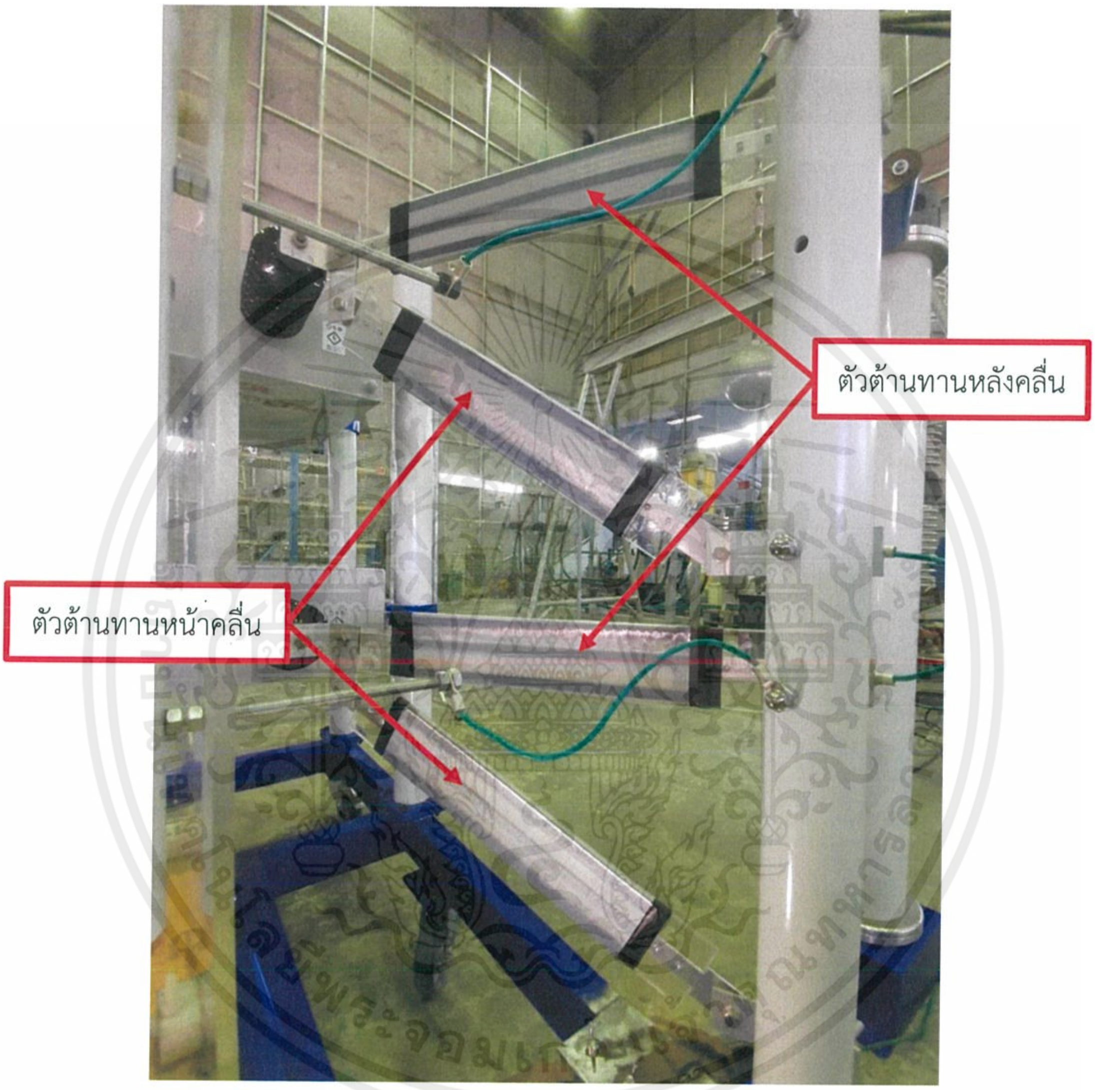


รูปที่ 3.15 จุดต่อกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 ตัวต้านทานหน้าคลื่นและตัวต้นทานหลังคลื่น

ตัวต้านทานหน้าคลื่นและตัวต้านทานหลังคลื่นติดตั้งตามวงจรของมาร์กซ์ เพื่อควบคุมค่าเวลาหน้าคลื่นและค่าเวลาหลังคลื่นตามที่มาตรฐานกำหนด ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การติดตั้งตัวต้านทานหน้าคลื่นและหลังคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

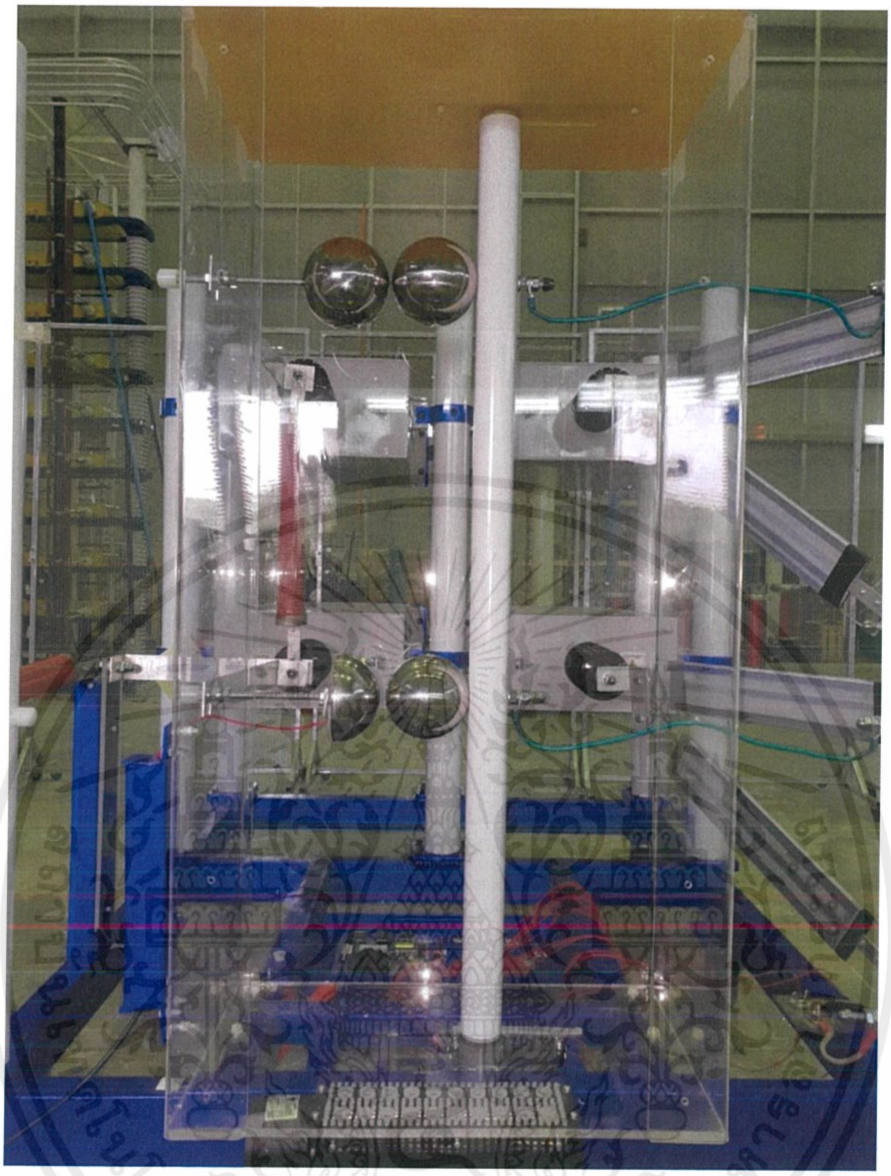
3.5.3 แกปทรงกลมของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

แกปทรงกลมใช้เป็นตัวนำทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร และใช้มอเตอร์ DC ในการปรับระยะแกปทรงกลม

รูปที่ 3.17 แกปทรงกลมชั้นที่ 1

รูปที่ 3.18 แกปทรงกลมชั้นที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



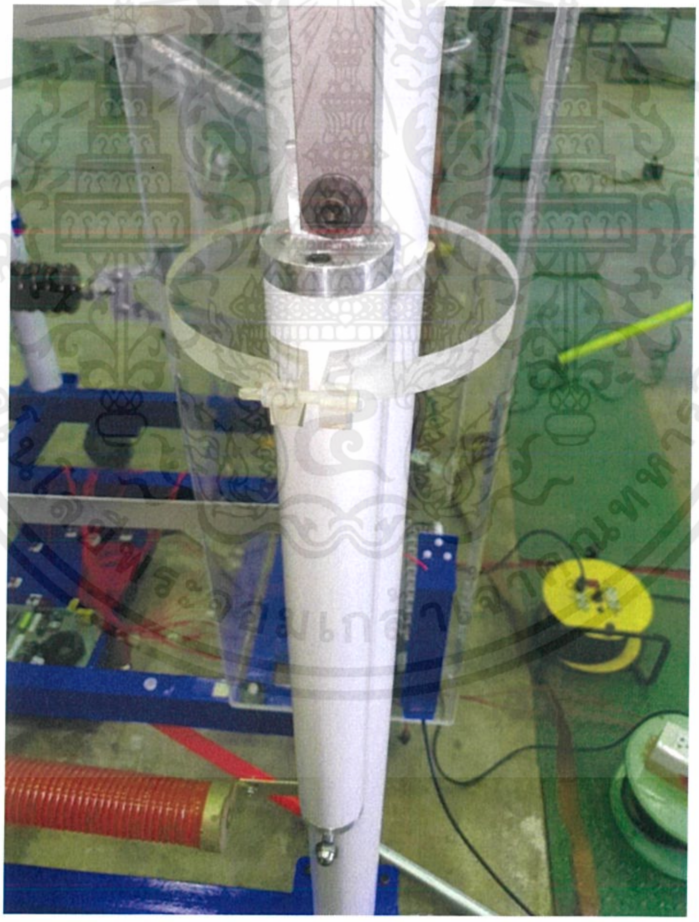
รูปที่ 3.19 การติดตั้งแกปทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 ไดโอดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

การสร้างแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกหรือขั้วลบนั้น สามารถทำได้โดยเลือกทิศทางของไดโอด โดยไดโอดแต่ละตัว สามารถทนแรงดันได้ 80 kV ดังนั้นจึงทำการเลือกใช้ไดโอดจำนวน 4 ตัว เพื่อป้องกันกระแสไหลย้อนกลับมายังชุดอัดประจุ

รูปที่ 3.20 ไดโอด



รูปที่ 3.21 การติดตั้งไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

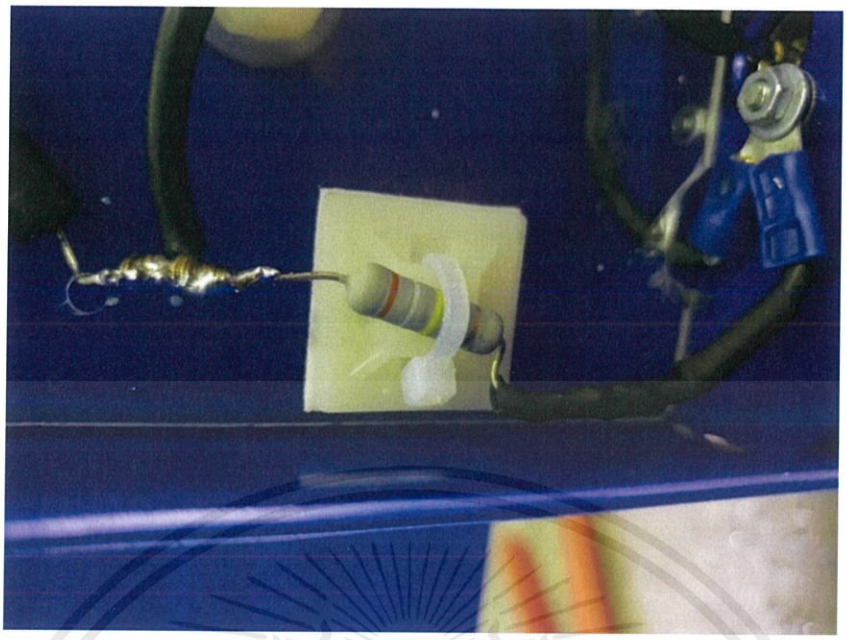
3.5.5 ตัวต้านทานดิไวเดอร์

การอ่านค่าแรงดันอัดประจุ ขณะป้อนแรงดันที่ระดับทดสอบนั้น จำเป็นต้องติดตั้งโวลเตจดิไวเดอร์เพื่อลดทอนพิกัดแรงดันให้เหมาะสมกับเครื่องมือวัด โดยในภาคแรงสูงนั้นใช้ตัวต้านทานขนาด 50 MΩ ต่ออนุกรมกัน จำนวน 8 ตัว สำหรับในภาคแรงต่ำใช้ตัวต้านทานขนาด 390 kΩ เพื่อให้ได้อัตราการลดทอนเท่ากับ 1000:1

รูปที่ 3.22 ตัวต้านทานดิไวเดอร์

รูปที่ 3.23 ตัวต้านทานภาคแรงสูง ขนาด 50 MΩ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 ตัวต้านทานภาคแรงต่ำ ขนาด 390 kΩ

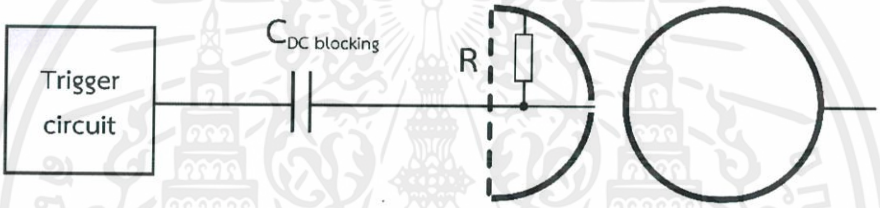
รูปที่ 3.25 จุดเชื่อมต่อสาย Coaxial

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

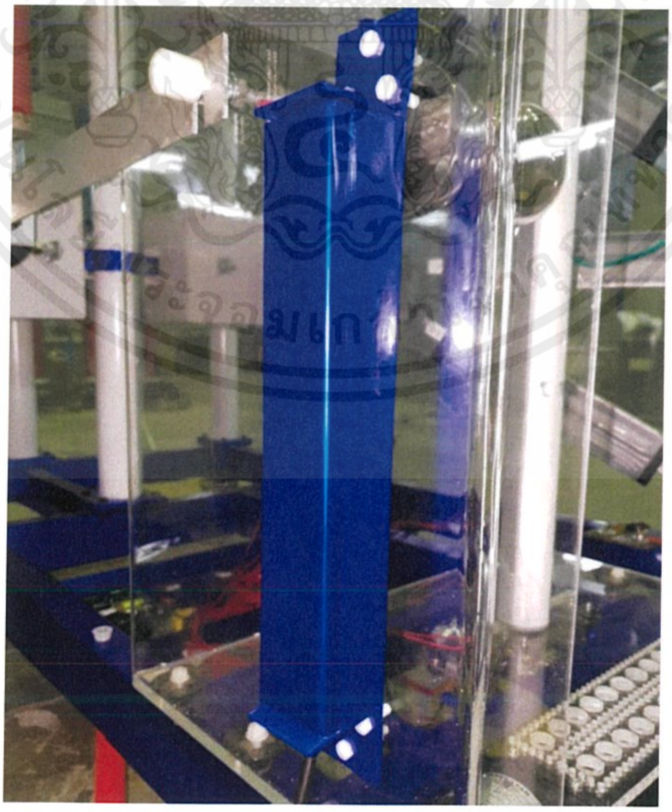
3.5.6 ตัวเก็บประจุช่วยจุดชนวน

เมื่อป้อนแรงดันอัดประจุให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์แต่ละชั้น จำเป็นต้องทำการติดตั้งตัวเก็บประจุช่วยจุดชนวน เพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าไหลมาที่ชุดจุดชนวน ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุ ขนาด 200 pF, 40 kV จำนวน 6 ตัว ต่ออนุกรมกัน

รูปที่ 3.26 ตัวเก็บประจุช่วยจุดชนวน



รูปที่ 3.27 ตำแหน่งของ DC blocking capacitor



รูปที่ 3.28 การติดตั้ง DC blocking capacitor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและการวิเคราะห์ผล

เป้าหมายหลักของการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ คือ การสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μs ที่สามารถรองรับพิกัดโหลด 1 nF, 2.5 nF และ 5 nF โดยมีค่าแรงดันอัดประจุ 300 kV เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ประกอบสร้างขึ้นนี้ประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุอิมพัลส์(C_s) ตัวเก็บประจุโหลด(C_b) ตัวต้านทานหน้าคลื่น(R_d) ตัวต้านทานหลังคลื่น(R_e) และสปาร์กแกป ดังนั้น เพื่อตรวจสอบดูว่าผลการออกแบบและประกอบสร้างของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้ผลตามเป้าหมายที่กำหนดไว้หรือไม่จึงต้องมีการทดสอบ โดยผลการทดสอบต้องเป็นไปตามมาตรฐาน เพื่อการวิเคราะห์และประเมินผลจึงมีการออกแบบการทดสอบดังนี้

1) การทดสอบค่าองค์ประกอบของตัวต้านทานหน้าคลื่นและหลังคลื่น

2) การทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐานที่พิกัดโหลด 1 nF

4.1 การทดสอบค่าองค์ประกอบตัวต้านทานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

สำหรับการทดสอบตัวต้านทานที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมานั้น ทำการทดสอบโดยใช้มิเตอร์รุ่น KEYSIGHT U1733C วัดค่าเพื่อตรวจสอบค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำ โดยตัวต้านทานที่นำมาทดสอบประกอบด้วย ตัวต้านทานหน้าคลื่น ตัวต้านทานหลังคลื่น ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.1

(ก) (ข)

รูปที่ 4.1 การทดสอบค่าองค์ประกอบตัวต้านทาน

(ก) ค่าความต้านทาน

(ข) ค่าความเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่าองค์ประกอบตัวต้านทานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ประเภท	ตัวที่	ค่าความต้านทาน (Ω)	ค่าความเหนี่ยวนำ (μH)
ตัวต้านทานหน้าคลื่น (R_d)	1	150.0	1.918
	2	153.1	1.947
ตัวต้านทานหลังคลื่น (R_e)	1	149.8	1.813
	2	151.2	1.935
	3	150.9	1.927
	4	149.6	1.812

4.2 การทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน

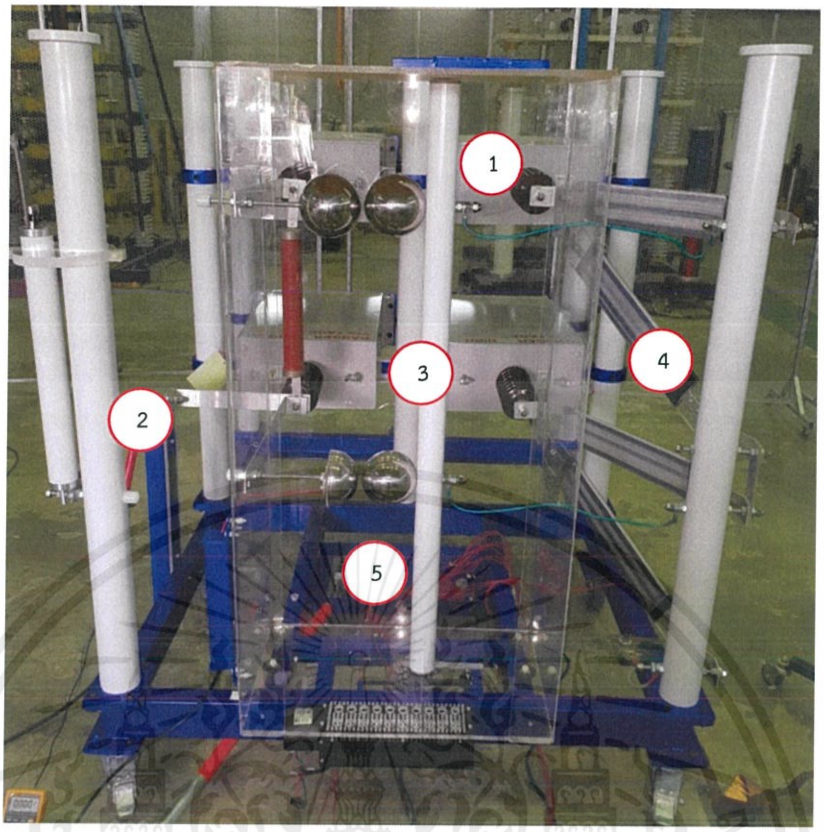
แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นมานั้นต้องเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด โดยช่วงเวลาช่วงหน้าคลื่น และเวลาช่วงหลังคลื่น ต้องเป็นไปตามเกณฑ์ดังนี้

เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 = 1.2 μs ± 30% อยู่ในช่วง $0.84 \leq T_1 \leq 1.56$ μs

เวลาช่วงหลังคลื่น T_2 = 50 μs ± 20% อยู่ในช่วง $40 \leq T_2 \leq 60$ μs

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบและประกอบสร้างขึ้นตามหลักการของวงจรมาร์กซ์ มีโครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 ชั้นดังรูปที่ 4.2 แต่ละชั้นประกอบด้วยตัวเก็บประจุอิมพัลส์ 2 ตัวมีขนาดตัวตัวละ 2 μF, 75 kV ต่ออนุกรมกันจะได้ความจุไฟฟ้าต่อชั้น C'_s เท่ากับ 1 μF แรงดันอัดประจุสูงสุดต่อชั้น 150 kV เมื่อตัวเก็บประจุทั้งหมดดิสชาร์จผ่านสปาร์กแกปจะต่ออนุกรมกันทั้งหมดจะได้ความจุไฟฟ้ารวม C_s เท่ากับ 0.5 μF โดยค่าองค์ประกอบความต้านทานจะแปรตามค่าความจุของวัตถุทดสอบดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 300 kV

1) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์
2) ตัวต้านทานลิมิตกระแส
3) แกปทรงกลม
4) ตัวต้านทานหน้าคลื่นและตัวต้านทานหลังคลื่น
5) ชุดจุดชนวน

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานเปลี่ยนตามพิกัดโหลด

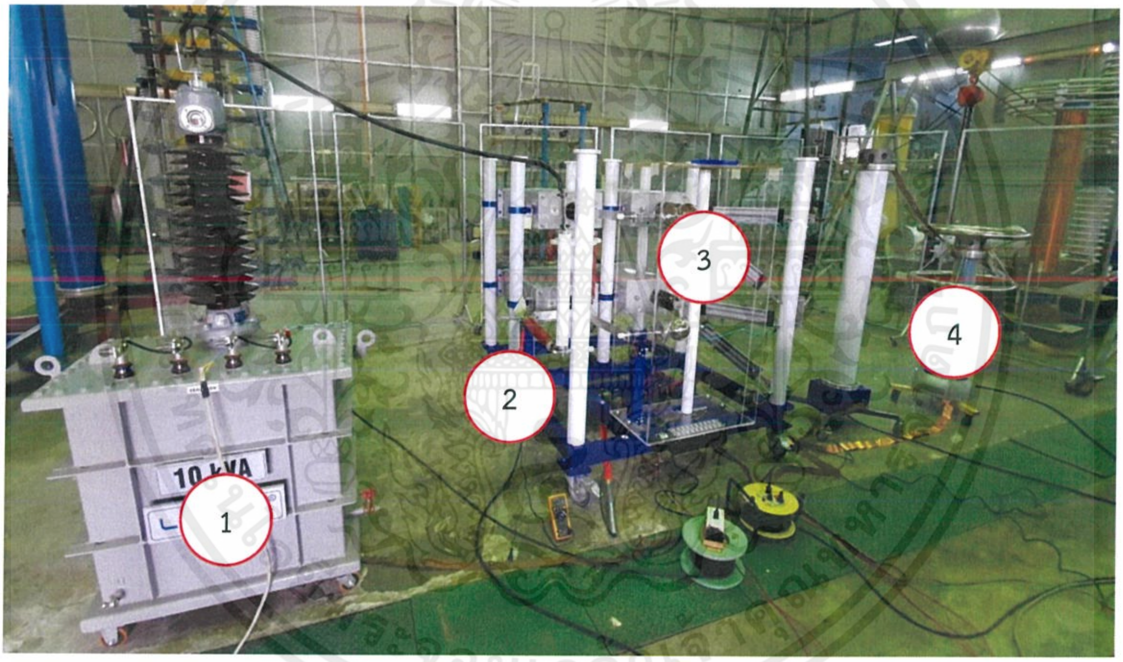
วัสดุทดสอบ (C_b)	ความต้านทานหน้าคลื่น (R_d)	ความต้านทานหลังคลื่น (R_e)
1 nF	300 Ω	150 Ω
2.5 nF	150 Ω	150 Ω
5 nF	75 Ω	150 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อทำการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นว่าได้ผลตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ จึงทดลองป้อนแรงดันอัดประจุให้กับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ประกอบเสร็จแล้ว เริ่มต้นป้อนแรงดันอัดประจุชั้นละ 150 kV โดยใช้โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ 1 nF เป็นโหลด ซึ่งมีความจุไฟฟ้าภาคแรงสูง 1 nF และอัตราลดทอน 1:1000 ปรากฏว่า แรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบที่สร้างขึ้นมีรูปคลื่นได้ตามมาตรฐานกำหนดทุกประการ คือ ที่พิกัดโหลด 1 nF ค่าช่วงเวลาหน้าคลื่นและค่าช่วงเวลาหลังคลื่น เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด ซึ่งผลการทดสอบมีดังนี้

4.2.1 การสร้างแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก

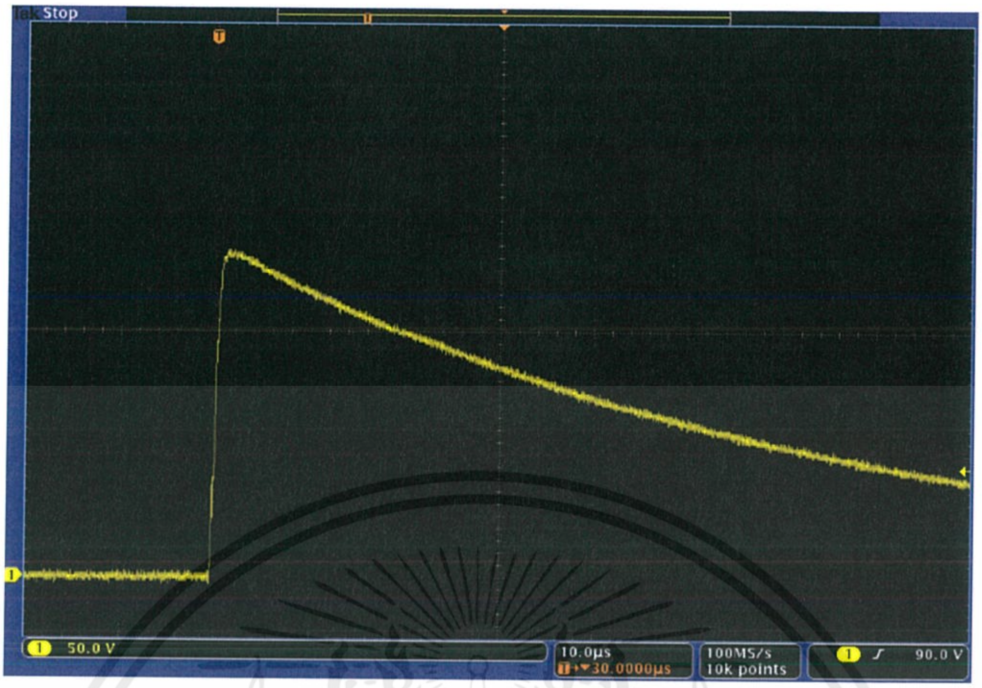
การสร้างแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก เพื่อเป็นการยืนยันผลของการออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งพิจารณาจากช่วงเวลาหน้าคลื่นและช่วงเวลาหลังคลื่นอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ โดยทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.3 และผลการทดสอบดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 วงจรทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก

1) ชุดอัดประจุ
2) Voltage Divider - อินพุต
3) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
4) Voltage Divider - เอาท์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก

V_{peak} (kV)	T_1 (µs)	T_2 (µs)
276	0.878	54.876

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

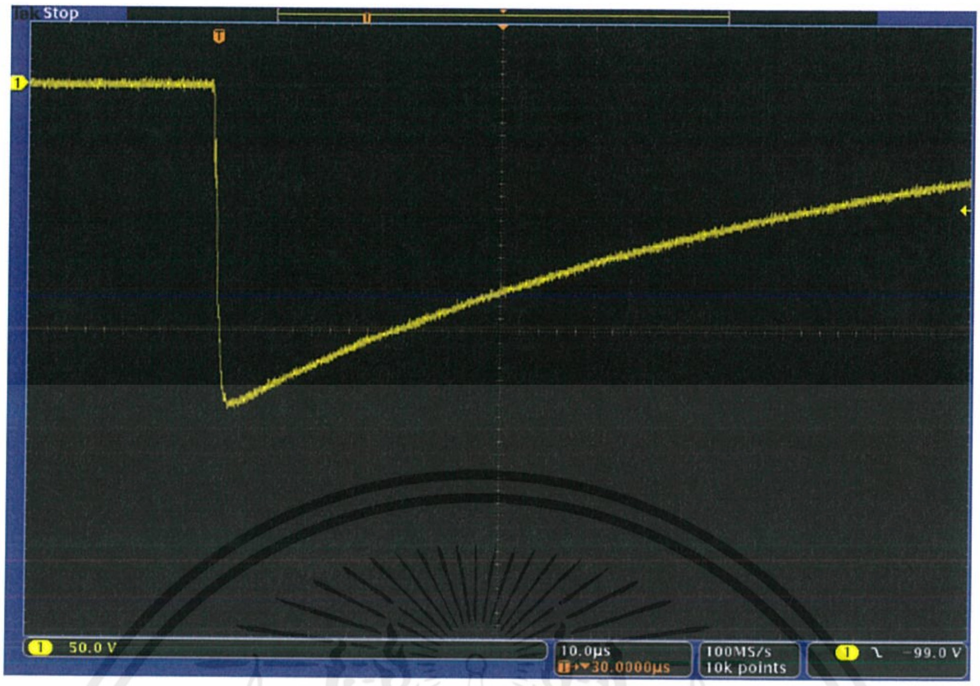
4.2.2 การสร้างแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ

การสร้างแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ เพื่อเป็นการยืนยันผลของการออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งพิจารณาจากช่วงเวลาหน้าคลื่นและช่วงเวลาหลังคลื่นอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ โดยทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.5 และผลการทดสอบดังรูปที่ 4.6

รูปที่ 4.5 วงจรทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ

1) ชุดอัดประจุ
2) Voltage Divider - อินพุต
3) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
4) Voltage Divider - เอาท์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ

V_{peak} (kV)	T_1 (μs)	T_2 (μs)
-274	0.862	54.846

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการดำเนินงานในโครงงาน

จากการออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เพื่อเพิ่มขอบเขตความสามารถในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งสามารถรองรับวัสดุทดสอบที่มีค่าความจุไฟฟ้าได้สูงสุดถึง 4 nF (ไม่รวมกับค่าความจุไฟฟ้าของโวลเตจดิไวเดอร์ขนาด 1 nF) จึงออกแบบการทดสอบที่พิกัดโหลด 1 nF พบว่าช่วงเวลาหน้าคลื่นและช่วงเวลาหลังคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกเท่ากับ 0.878/54.876 μs ประสิทธิภาพ 92 % และช่วงเวลาหน้าคลื่นและช่วงเวลาหลังคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบเท่ากับ 0.862/54.846 μs ประสิทธิภาพ 91 % ดังนั้นจากผลการทดสอบพบว่าเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบและประกอบสร้างขึ้น สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่น 1.2/50 μs ตามมาตรฐานสากล IEC 60060-1

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ทำการออกแบบ สามารถใช้ทดสอบความคงทนต่อแรงดัน อิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (BIL) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในระบบจำหน่ายที่ระดับแรงดัน 22 kV, 24 kV และ 33 kV ได้ อาทิเช่น หม้อแปลงจำหน่าย สายไฟแรงสูง เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มีใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทย และยังมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการเรียนการสอนและการวิจัยด้านไฟฟ้าแรงสูง

5.2 อุปสรรคและวิธีการแก้ไขในโครงงาน

อุปสรรคของโครงงานการออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์พิกัด 300 kV มีดังนี้

1) ตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำที่ทำการออกแบบและประกอบสร้างขึ้นนั้น ได้ค่าความต้านทานตามที่ต้องการคือ 150 Ω แต่เมื่อวัดค่าความเหนี่ยวนำกลับไม่ได้ตามที่ต้องการ ทางกลุ่มโครงงานจึงได้มีการแก้ไขและปรับปรุงวิธีการพัน

2) ในตอนแรกที่ได้ทำการประกอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นแล้วนั้น พบว่าความสูงของแกปทรงกลมชั้นแรกจากกราวด์มีระยะที่น้อยเกินไป อาจส่งผลให้การทดสอบผิดพลาดเนื่องจากเกิดกระแสลัดวงจรลงที่กราวด์ จึงจำเป็นต้องทำการออกแบบและประกอบสร้างขึ้นใหม่ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดความล่าช้าในการทำโครงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] IEC Publication 60060-1, “ High Voltage Test Techniques Part 1 : General Definitions and Test Requirement ”, 2015.

[2] IEC Publication 70071-1, “ Insulation co-ordination Part 1 : Definitions, principles and rules ”, 2006.

[3] สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง**, ภาควิศวกรรมไฟฟ้า, วิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

[4] กิตติ ชูหอม, “การปรับปรุงและพัฒนาเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1200kV 22.5kJ”, **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553.

[5] คมกริช เสนานุช, “เครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม 6kV, 3kA”, **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.

[6] ชเยศ กองจันทร์ดี, “การปรับปรุงและพัฒนาชุดจุดชนวนและชุดควบคุมแรงดันอิมพัลส์สำหรับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์”, **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

Poster

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL ENGINEERING PROJECT DAY 2019

Department of Electrical Engineering (Electrical Engineering)

PW 6110

MEIDEN
MEIDENSHA CORORATION
Endowed courses in KMITL

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 300 kV IMPULSE VOLTAGE GENERATOR

Peerawut Yutthagowith, Kuekul Mongkolsong [1], Jakkrapop Nopparat [2], Chatree Nipanutiyon [3] and Nattaphong Kanjanasorn [4]

Abstract

This thesis presents about design and construction of lightning impulse voltage generator that generates 1.2/50 µs waveform according to the international standard IEC 60060-1. The generator is constructed by Marx's circuit with 2 stages. Each stage has a rating of 150 kV, 11.25 kJ, therefore the generator has the total rating of 300 kV, 22.5 kJ. The generator can support the testing of high voltage equipment in distribution systems at voltage levels 22 kV, 24 kV and 33 kV, such as distribution transformers, high voltage cables. The resistors, used in the generator, do not have inductance and have an appropriate value for doing experiment on the test object with capacitance upto 4 nF. To ensure the design and efficiency of the generator is operated by using simulation program. In conclusion, after the test of the lightning impulse voltage generator, the lightning impulse waveform is according to the international standard.

Introduction

High voltage impulse generator is widely used to test the dielectric strength of high voltage equipment such as insulators, transformers, high voltage cables etc., as per relevant national and international standards.

Although, high voltage laboratory in electrical engineering department at faculty of engineering, KMITL have an impulse voltage generator rated 1200kV, 22.5kJ that causes limitations in the testing of high voltage equipment. From this problem, high voltage laboratory has to construct a voltage impulse generator according to standard IEC 60060-1 for more accuracy and reliability of the insulation test of high voltage equipment.

Methodology

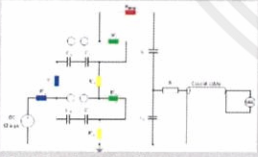


Fig. 1 Impulse voltage Circuit

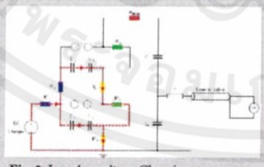


Fig. 2 Impulse voltage Charging

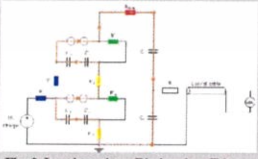


Fig. 3 Impulse voltage Discharging (T_1)

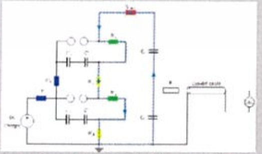


Fig. 4 Impulse voltage Discharging (T_2)

1. DC voltage charging into impulse capacitor.
2. Impulse capacitor discharge to load capacitor, that is controlled by trigger and sphere gap.
3. Measuring impulse voltage waveform by capacitor Divider (ratio 1:1000)

1. Source
2. Voltage divider - input
3. Impulse voltage generator
4. Voltage divider - output

Fig. 5 Experiment Circuit

Results

Impulse voltage waveform obtained the experiments are shown in the picture below.

Part I : Positive polarity

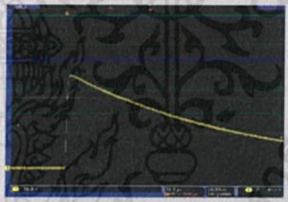


Fig. 6 Positive polarity impulse voltage waveform

Time	Vmax (kV)	T_1 (µs)	T_2 (µs)
1	276	0.87	54.86
2	276	0.85	54.83
3	276	0.89	54.90
4	276	0.91	54.94
5	276	0.87	54.85

Table. 1 Results of positive polarity impulse voltage

Part II : Negative polarity

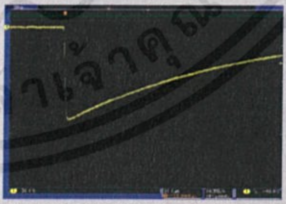


Fig. 7 Negative polarity impulse voltage waveform

Time	Vmax (kV)	T_1 (µs)	T_2 (µs)
1	-274	0.83	54.81
2	-274	0.87	54.85
3	-274	0.90	54.92
4	-274	0.85	54.82
5	-274	0.86	54.83

Table. 2 Results of negative polarity impulse voltage

Conclusion

From the test result, we can conclude that impulse voltage generator can generate positive and negative impulse voltage waveform according to the international standard IEC 60060-1, which can do the experiment on the test object with capacitance upto 4 nF that is the testing of high voltage equipment in distribution systems at voltage levels 22 kV, 24 kV and 33 kV ;such as distribution transformers, high voltage cables etc.,

ENGINEERS LADKRABANG

E-mail: pearawut@yahoo.com, 58010126@kmitl.ac.th[1], 58010163@kmitl.ac.th[2], 58010283@kmitl.ac.th[3], 58010401@kmitl.ac.th[4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 300 kV
DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 300 kV IMPULSE VOLTAGE GENERATOR

นายเกื้อกุล มงคลทรง[1] นายจักรภพ นพรัตน์[2] นายชาตรี นิพนุติยันต์[3] นายณัฐพงศ์ กาญจนศร[4]

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520โทรศัพท์ 02-329-8000 E-mail: kua.kul@hotmail.com

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า รูปคลื่น 1.2/50 μs ตามมาตรฐานสากล IEC 60060-1 โดยเครื่องกำเนิดฯ ที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้นนั้นจะเป็นเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบ 2 ชั้นตามวิธีวงจรของมาร์กซ์ (Marx's circuit) ซึ่งมีพิกัดชั้นละ 150 kV, 11.25 kJ รวมเป็นพิกัด 300 kV, 22.5 kJ สามารถรองรับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในระบบจำหน่ายที่ระดับแรงดัน 22 kV, 24 kV และ 33 kV ได้ อาทิเช่น หม้อแปลงจำหน่าย สายไฟแรงสูง เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มีใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยตัวเครื่องกำเนิดฯ ที่ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างขึ้นนั้น จะทำการออกแบบตัวต้านทานหน้าคลื่น และตัวต้านทานหลังคลื่นให้ไร้ความเหนี่ยวนำด้วยวิธีการพันลวดแบบสวนทางกัน และมีค่าความต้านทานที่เหมาะสมเพื่อให้เครื่องกำเนิดฯ สามารถรองรับวัสดุทดสอบที่มีค่าความจุไฟฟ้าได้สูงสุดถึง 4 nF และเพื่อเป็นการยืนยันผลการออกแบบและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดฯ จึงนำค่าความต้านทานที่คำนวณได้นั้นไปจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเมื่อได้ทำ การออกแบบเสร็จสิ้นแล้วจึงได้ดำเนินการประกอบสร้างขึ้นจนเป็นที่เรียบร้อยดี จากนั้นจึงได้ทำการทดสอบก็พบว่ารูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่สร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นั้นมีช่วงเวลาหน้าคลื่น ช่วงเวลาหลังคลื่น และค่ายอดของแรงดันอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า, วงจรของมาร์กซ์

Abstract

This thesis presents about design and construction of lightning impulse voltage generator that generates 1.2/50 μs waveform according to the international standard IEC 60060-1. The generator is constructed by Marx's circuit with 2 stages. Each stage has a rating of 150 kV, 11.25 kJ. So the generator has the total rating of 300 kV, 22.5 kJ. The generator can support the testing of high voltage equipment in distribution systems at voltage levels 22 kV, 24 kV and 33 kV ;such as distribution transformers, high voltage cables etc., which these devices have been widely used in Thailand. For the resistors set in the generator, that is a non-inductance resistor and the resistor has an appropriate value for support the test object with capacitance up to 4 nF. To ensure the design and efficiency of the generator is operated by using simulation program. In conclusion, after the test of the lightning impulse voltage generator, the lightning impulse waveform is according to the international standard.

Keywords: lightning impulse voltage generator, Marx's circuit

1. บทนำ

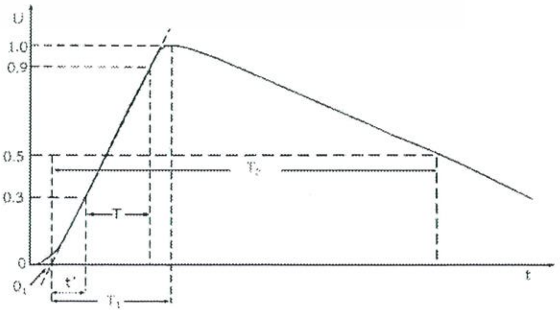
ปัจจุบันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ถูกใช้ในการทดสอบฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ตัวอย่างเช่น ฉนวน, หม้อแปลงไฟฟ้า, สายไฟแรงสูง ฯลฯ เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานสากลที่เกี่ยวข้อง แม้ว่าห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์พิกัด 1200 kV, 22.5 kJ แต่เครื่องกำเนิดฯ ไม่สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่พิกัดอื่นได้ จากปัญหานี้ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงจำเป็นต้องสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60060-1 เพื่อความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานจะมีเกณฑ์กำหนดดังต่อไปนี้

- ช่วงเวลาหน้าคลื่น T_1 = 1.2 μs ± 30% อยู่ในช่วง 0.84 - 1.56 μs
- ช่วงเวลาหลังคลื่น T_2 = 50 μs ± 20% อยู่ในช่วง 40 – 60 μs
- ค่ายอดแรงดัน U_m ยอมให้ผิดพลาดได้เมื่อเกิน 3%

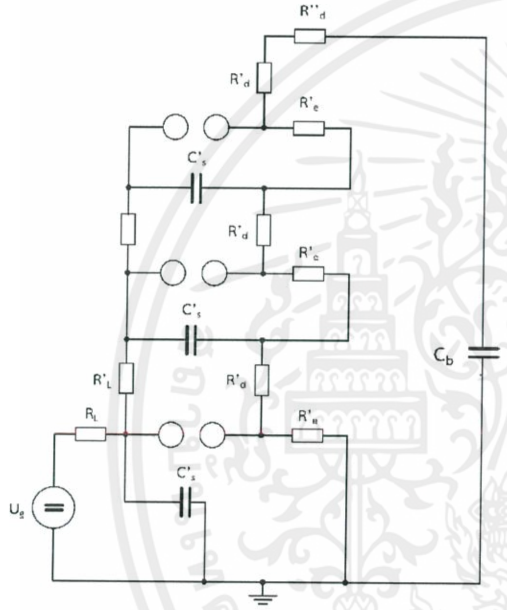


รูปที่ 1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้นประกอบด้วยวงจรอิมพัลส์พื้นฐานหลายๆ ขั้นมาซ้อนต่อกันตามหลักของวงจรมาร์กซ์ คือ ใช้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์หลายๆตัวมาต่อขนานกันเพื่ออัดประจุ เมื่อได้แรงดันอัดประจุตามที่ต้องการแล้วให้ตัวเก็บประจุเหล่านั้นปล่อยประจุผ่านสปาร์คแกปตัวเก็บประจุที่อัดประจุไว้จะต่อกันแบบอนุกรม จึงได้แรงดันเพิ่มมากขึ้นในแต่ละขั้น วงจรของมาร์กซ์จะจัดให้สปาร์คแกปสามารถปรับระยะได้ และปรับให้สปาร์คแกปล่างมีระยะน้อยที่สุดเพื่อให้เริ่มสปาร์กแกปก่อน และค่อยๆเกิดการสปาร์กแกปในชั้นถัดๆ ขึ้นมาตามลำดับ

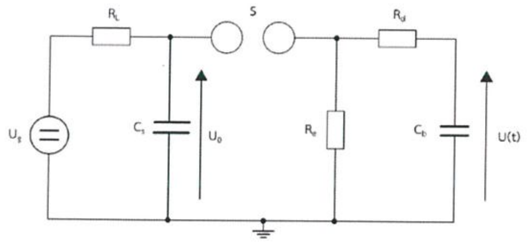


รูปที่ 2 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น

3. การออกแบบและการประกอบสร้าง

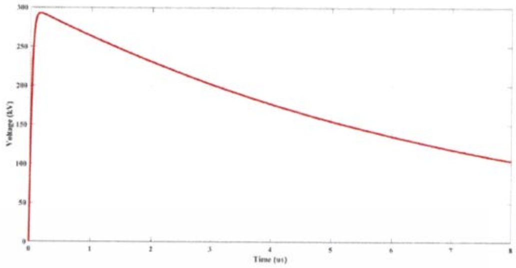
3.1 การจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบ B โดยทำการจำลองเมื่อโหลดมีค่า 1nF , 2.5 nF และ 5 nF และใช้ค่าความต้านทานหน้าคลื่น 300 Ω, 150 Ω และ 75 Ω ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบเวลาหน้าคลื่นและเวลาหลังคลื่น



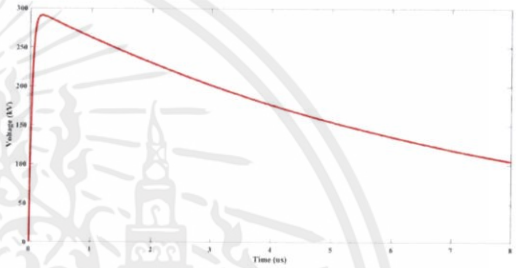
รูปที่ 3 วงจรการจำลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบ B

ผลการทดลอง



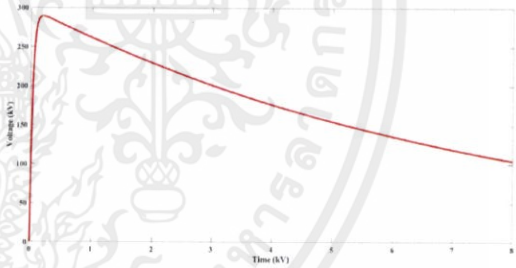
รูปที่ 4 ผลการจำลองเมื่อ C_b = 1 nF และ R_d = 300 Ω

V_{peak} = 292.85 kV, T_1 = 0.9 μs และ T_2 = 54.02 μs



รูปที่ 5 ผลการจำลองเมื่อ C_b = 2.5 nF และ R_d = 150 Ω

V_{peak} = 290.72 kV, T_1 = 1.1167 μs และ T_2 = 54.63 μs

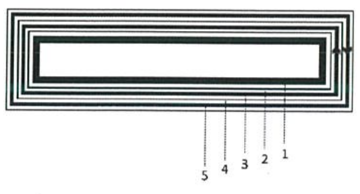


รูปที่ 6 ผลการจำลองเมื่อ C_b = 5 nF และ R_d = 75 Ω

V_{peak} = 289.34 kV, T_1 = 1.1167 μs และ T_2 = 54.84 μs

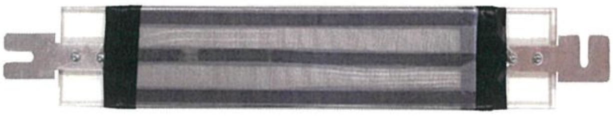
3.2 การออกแบบและประกอบสร้างตัวต้านทานหน้าคลื่นและหลังคลื่น

ในการออกแบบตัวต้านทานหน้าคลื่นและตัวต้านทานหลังคลื่นจะต้องทำให้มีค่าความเหนี่ยวนำน้อยที่สุดหรือไม่ให้มีเลย เพื่อไม่ให้เกิดการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยในการออกแบบวิธีการพันนั้นเลือกใช้วิธีการพันแบบสวนทิศทางกันเพื่อให้ฟลักซ์แม่เหล็กหักล้างกันเป็นศูนย์ ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดค่าความเหนี่ยวนำขึ้น



รูปที่ 7 การพันขดลวดความต้านทานในลักษณะพันสวนทิศทางกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

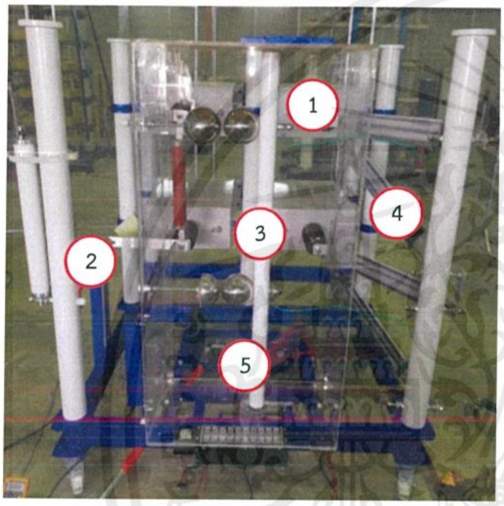


รูปที่ 8 ตัวต้านทานหน้าคลื่นและหลังคลื่น

3.3 การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

องค์ประกอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

- ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ จำนวน 4 ตัว - ขนาด 2 μF พิกัด 75 kV
- ตัวต้านทานหน้าคลื่น จำนวน 2 ตัว - ขนาด 150 Ω
- ตัวต้านทานหลังคลื่น จำนวน 4 ตัว - ขนาด 150 Ω

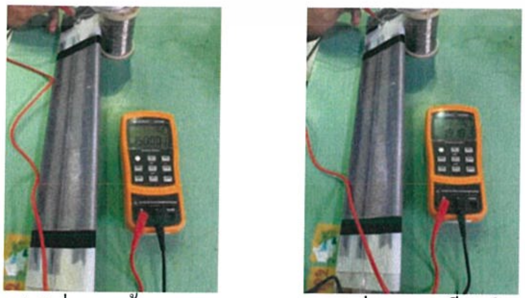


รูปที่ 9 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
1) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ 2) ตัวต้านทานลิมิตกระแส 3) แกปทรงกลม
4) ตัวต้านทานหน้าคลื่นและตัวต้านทานหลังคลื่น 5) ชุดจุดชนวน

4. การทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 การทดสอบค่าองค์ประกอบตัวต้านทานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

สำหรับการทดสอบตัวต้านทานที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมานั้น ทำการทดสอบโดยใช้ RLC มิเตอร์วัดค่าเพื่อตรวจสอบค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำ ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 10



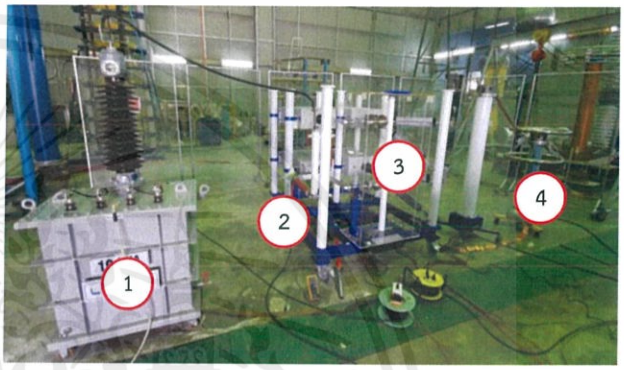
(ก) ค่าความต้านทาน (ข) ค่าความเหนี่ยวนำ

รูปที่ 10 การทดสอบค่าองค์ประกอบตัวต้านทาน

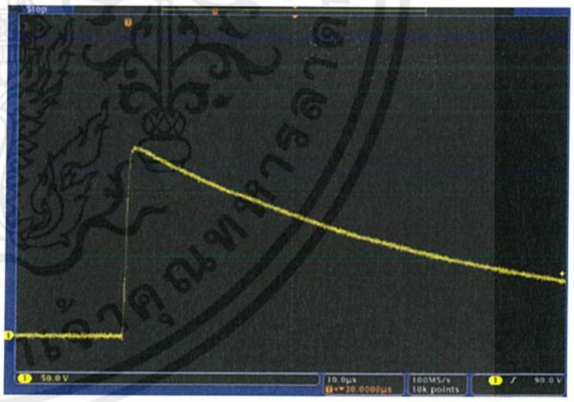
4.2 การทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน

เพื่อทำการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นว่าได้ผลตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ จึงทดลองป้อนแรงดันอัดประจุให้กับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ประกอบเสร็จแล้ว โดยเริ่มต้นป้อนแรงดันอัดประจุชั้นละ 150 kV และใช้โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ 1 nF เป็นโหลด ซึ่งมีความจุไฟฟ้าภาคแรงสูง 1 nF และอัตราลดทอน 1:1000 ซึ่งผลการทดสอบมีดังนี้

4.2.1 การสร้างแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก



รูปที่ 11 วงจรทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก
1) ชุดอัดประจุ 2) Voltage Divider - input
3) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 4) Voltage Divider - output

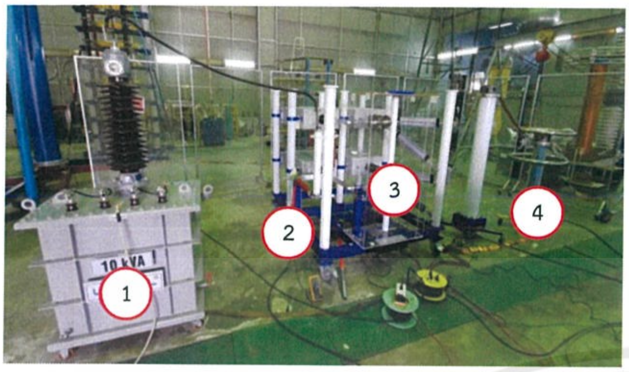


รูปที่ 12 การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก

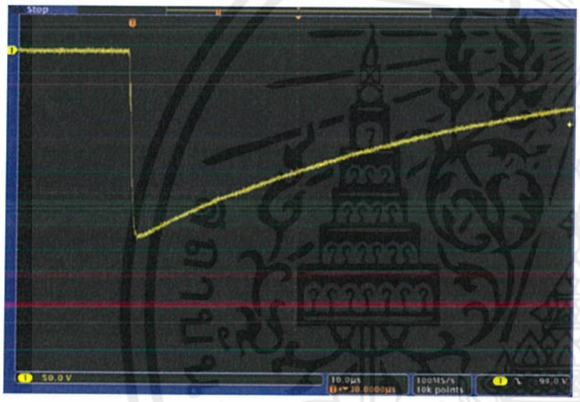
V_{peak} = 276 kV, T_1/T_2 = 0.878/54.876 μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การสร้างแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ



รูปที่ 13 วงจรทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ
1) ชุดอัดประจุ 2) Voltage Divider - input
3) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 4) Voltage Divider - output



รูปที่ 14 การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ
V_{peak} = -274 kV, T_1/T_2 = 0.862/54.846 μs

5. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เพื่อเพิ่มขอบเขตความสามารถในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งสามารถรองรับวัสดุทดสอบที่มีค่าความจุไฟฟ้าได้สูงสุดถึง 4 nF จึงออกแบบการทดสอบที่พิกัดโหลด 1 nF พบว่าช่วงเวลาหน้าคลื่นและช่วงเวลาหลังคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกเท่ากับ 0.878/54.876 μs ประสิทธิภาพ 92 % และช่วงเวลาหน้าคลื่นและช่วงเวลาหลังคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบเท่ากับ 0.862/54.846 μs ประสิทธิภาพ 91 % ดังนั้นจากผลการทดสอบพบว่าเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบและประกอบสร้างขึ้น สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่น 1.2/50 μs ตามมาตรฐานสากล IEC 60060-1 นอกจากนี้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ทำการออกแบบ สามารถใช้ทดสอบความคงทนต่อแรงดัน อิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (BIL) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในระบบจำหน่ายที่ระดับแรงดัน 22 kV, 24 kV และ 33 kV ได้ อาทิเช่น หม้อแปลงจำหน่าย สายไฟแรงสูง เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มีใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทย และยังมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการเรียนการสอนและการวิจัยด้านไฟฟ้าแรงสูง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา ขอขอบคุณคุณปุณยวีร์ ฉายสิริ และ คุณณัฐพล มฤคทัต ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ แก้ไขปัญหา และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานมาด้วยดีโดยตลอด

เอกสารอ้างอิง

[1] ดร. สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง, ภาควิศวกรรมไฟฟ้า, วิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

[2] กิตติ ชูหอม, "การปรับปรุงและพัฒนาเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1200kV 22.5kJ", ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553.

[3] คมกริช เสนานุช, "เครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสม 6kV, 3kA", ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.

[4] ชยศ กองจันทร์ดี, "การปรับปรุงและพัฒนาชุดจุดชนวนและชุดควบคุมแรงดันอิมพัลส์สำหรับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์", ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายเกื้อกุล มงคลทรง
เกิดเมื่อ วันที่ 14 พฤศจิกายน พ.ศ. 2539
ที่อยู่ 246/348 ซอยพึ่งมี 50 ถนนสุขุมวิท 93 ตำบลบางจาก อำเภอพระโขนง จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10260
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวชิรธรรมสาธิต และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
Email : kua.kul@hotmail.com

นายจักรภพ นพรัตน์
เกิดเมื่อ วันที่ 7 มีนาคม พ.ศ. 2539
ที่อยู่ 32/4 ถนนทัณฑ์บำรุง ตำบลคูหาสวรรค์ อำเภอเมืองพัทลุง จังหวัดพัทลุง 93000
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย นครศรีธรรมราช และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
Email : poomjakkrapop@hotmail.com

นายชาตรี นิพนุติยันต์
เกิดเมื่อ วันที่ 6 เมษายน พ.ศ. 2540
ที่อยู่ 210/20 ซอยลาดพร้าว 126 ถนนลาดพร้าว ตำบลพลับพลา อำเภอวังทองหลาง จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10310
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
Email : chatree.141262@gmail.com

นายณัฐพงศ์ กาญจนศร
เกิดเมื่อ วันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2540
ที่อยู่ 199/3 หมู่ 6 ตำบลเนินพระ อำเภอเมือง จังหวัดระยอง 21150
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนระยองวิทยาคม และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
Email : nattaphong24@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้