การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A COMBINATION WAVE GENERATOR

โดย

นายณัฐดนัย โตนชัยภูมิ

นายณัฐพล มฤคทัต

นายณัฐวัตร สร้อยสุวรรณ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A COMBINATION WAVE GENERATOR

โดย

นายณัฐดนัย โตนชัยภูมิ
นายณัฐพล มฤคทัต
นายณัฐวัตร สร้อยสุวรรณ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A COMBINATION WAVE GENERATOR

NATDANAI TONECHAIYABHUM
NATTAPON MARUKATAT
NATTAWAT SOISUWAN

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม
DESIGN AND CONSTRUCTION OF A COMBINATION WAVE GENERATOR

โดย

นาย ณัฐดนัย โตนชัยภูมิ
นาย ณัฐพล มฤคทัต
นาย ณัฐวัตร สร้อยสุวรรณ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท
รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

ผู้จัดทำ

1. นาย ณัฐดนัย โตนชัยภูมิ
2. นาย ณัฐพล มฤคทัต
3. นาย ณัฐวัตร สร้อยสุวรรณ์

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

นายณัฐดนัย	โตนชัยภูมิ	
นายณัฐพล	มฤคทัต	
นายณัฐวัตร	สร้อยสุวรรณ์	
ผศ.ดร.พีรวุฒิ	ยุทธโกวิท	อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมพิกัด 10 kV 5 kA ซึ่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (1.2/50 μs) ขณะเปิดวงจร และจ่ายกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า (8/20 μs) ขณะลัดวงจร เครื่องกำเนิดนี้สามารถควบคุมมุมทับซ้อนของแรงดันอิมพัลส์บนแรงดันกระแสสลับได้ที่ มุม 0 ถึง 360 องศาได้ และใช้ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน (MOV) ในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5 โดยเนื้อหาของปริญญานิพนธ์นี้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมขณะเปิดวงจร ขณะลัดวงจร เพื่อยืนยันความสามารถในการจ่ายแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมที่พิกัดของเครื่องกำเนิด ส่วนที่สองเป็นการทดสอบวงจรกรอง ขณะต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำความถี่พลังงาน (50Hz) เพื่อยืนยันความสามารถของวงจรกรองความถี่สูงที่ได้สร้างขึ้นเพื่อป้องกันไม่ให้แรงดันอิมพัลส์เข้าสู่ระบบไฟฟ้า อีกทั้งยังป้องกันไม่ให้ไฟฟ้ากระแสสลับจากระบบไฟฟ้าเข้าสู่เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม ส่วนที่สามเป็นการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่ต่อเข้าไปในระบบ โดยมาตรฐาน IEC 61000-4-5 ได้กำหนดการทดสอบในหัวข้อการป้องกันแรงดันเกินระหว่างแหล่งจ่ายกับอุปกรณ์ป้องกันซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ 1) กรณีการทดสอบอิมพัลส์ระหว่างสายไฟฟ้ากับสายดิน และสายนิวทรอลกับสายดิน (Common mode) 2) กรณีการทดสอบระหว่างสายไฟฟ้ากับสายนิวทรอล (Normal mode) ซึ่งขั้วขาออก (Output) ของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมจะไม่ถูกต่อลงดิน จากการทดสอบทั้งหมดนี้สามารถสรุปได้ว่าเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมและวงจรกรองที่พัฒนาขึ้น สามารถทำการทดสอบกับดักแรงดันเกินได้ตามมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design and Construction of A Combination Wave Generator

Natdanai	Tonechaiyabhum	
Nattapon	Marukatat	
Nattawat	Soisuwan	
Asst.Prof.Dr.Peerawut	Yutthagowit	Advisor
Assoc.Prof.Siriwat	Potivejkul	Advisor

2014

ABSTRACT

This project presents a design and construction of a 10 kV, 5 kA combination wave generator which supplies lightning impulse voltage (1.2/50 µs) in open circuit condition and lightning impulse current (8/20 µs) in short circuit condition. The generator can be controlled to generate an impulse superimposing on a phase angle between 0 and 360 degree for testing metal oxide varistor (MOV) according to IEC 61000-4-5 Standard. The scope of this thesis is divided into three parts. The first part introduces the testing combination wave generator in open circuit condition and short circuit condition to confirm capability of the generator at its rating. The second part refers to the testing filter circuit which is connected to AC power-frequency voltage to confirm the ability of coupling and decoupling circuits. Surges voltages are prevented from the AC system, and AC power-frequency voltage is prevented from the surge generation circuit. In the third part, the testing surge protection devices (SPDs) connected to the system was carried out according to IEC 61000-4-5 standard. The standard defines the impulse tests, i.e. 1) the SPD connection between line and ground and that between neutral and ground (Common modes) and 2) the SPD connection between line and neutral called normal mode which the generator is connected between line and neutral (The generator is not connected to ground). It can be concluded that the developed combination wave generator and the filter circuit can be used for SPD tests according to the standard requirement.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท และ รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้ข้อคิดดีๆ และคำปรึกษาต่างๆ รวมถึงให้ความช่วยเหลือผู้จัดทำในทุกๆ ด้าน และได้กรุณาช่วยตรวจสอบแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ผู้จัดทำขอขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณปุณยวีร์ ฉายศิริ คุณบัญญัติ ลีลาจริยกุล คุณนวคุณ ไตรรัตนาภิรักษ์ และ คุณพลวัฒน์ ศุภมาศ ที่ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการทดสอบ การใช้อุปกรณ์ อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการทดสอบมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน ที่ช่วยดูแลและแก้ปัญหาการทดสอบต่างๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงด้วยดีมาโดยตลอด

นอกจากนั้นผู้จัดทำขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกใช้เครื่องมือตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงงาน

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงงานครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VIII
สารบัญตาราง	XIV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน	2
1.4 แผนการดำเนินโครงงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีการสร้างแรงดันอิมพัลส์	4
2.1.1 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	7
2.1.2 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น	9
2.1.3 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	11
2.1.4 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์	15
2.1.5 การวัดแรงดันอิมพัลส์	21
2.2 ทฤษฎีการสร้างกระแสอิมพัลส์	24
2.2.1 ลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน	24
2.2.1.1 องค์ประกอบของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์	25
2.2.1.2 ค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน	25
2.2.1.3 ค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ขนาด 8/20 µs ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5	25
2.2.2 วงจรและหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์	26
2.2.2.1 ตัวเก็บประจุ (C_s)	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.2.2 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L)	29
2.2.2.3 ตัวต้านทานปรับรูปคลื่น	30
2.2.2.4 เทคนิคการพันตัวต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำ	30
2.2.3 การวัดกระแสอิมพัลส์	31
2.2.3.1 มาตรฐานของระบบการวัดกระแสอิมพัลส์	31
2.2.3.2 หลักการของโรกอฟสกีคอยล์	31
2.2.3.3 หลักการทำงานของโรกอฟสกีคอยล์แบบพาสซีฟ ชนิด Self Integrator	33
2.3 ทฤษฎีวงจรกรองความถี่	36
2.3.1 วงจรคัปปลิ้งและดีคัปปลิ้ง	36
2.3.2 วิธีการทดสอบอุปกรณ์ทดสอบ	36
2.4 ทฤษฎีชุดวงจรจุดฉนวน	38
2.4.1 วงจรทวีแรงดัน	38
2.4.2 วงจรตัวเก็บประจุ – ตัวเหนี่ยวนำ	38
2.4.3 การตรวจจับผ่านศูนย์	39
บทที่ 3 การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม	41
3.1 การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม	41
3.1.1 การจำลองเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมขณะเปิดวงจร	41
3.1.2 การจำลองเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมขณะลัดวงจร	43
3.2 การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน (Trigatron)	46
3.2.1 การออกแบบวงจรทวีแรงดัน	46
3.2.2 การออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันสูง	47
3.2.3 การออกแบบวงจรสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์	51
3.3 การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องควบคุมสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน (Trigatron)	53
3.3.1 การออกแบบสร้างชุดตรวจจับผ่านศูนย์	53
3.4 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรคัปปลิ้งและดีคัปปลิ้ง	55
3.4.1 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรคัปปลิ้ง	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.2 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรดีคัปปลิ้ง 57

3.4.3 การออกแบบตัวเก็บประจุ 58

3.4.4 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ 60

3.5 อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน 63

บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล 66

4.1 การทดสอบชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 67

4.2 การทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 69

4.2.1 การทดสอบสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/50 μs ค่ายอด 10 kV 69

4.2.2 การทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20 μs ค่ายอด 5 kA 71

4.3 การทดสอบวงจรกรองความถี่ขณะต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำความถี่พลังงาน 73

4.3.1 การทดสอบวงจรกรองความถี่ โดยไม่ต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าและอุปกรณ์ทดสอบ 73

4.3.2 การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 78

4.4 การทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่ต่อเข้าไปในระบบโดยรวมตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5 83

4.4.1 การทดสอบแยกระบบ โดยไม่ต่อแหล่งจ่ายระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ 83

4.4.1.1 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V (Arrester 480 V) ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล กรณี Line – Ground 83

4.4.1.2 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V (Arrester 480 V) ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล กรณี Neutral – Ground 86

4.4.1.3 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V (Arrester 275 V) ด้วยการต่อวงจรแบบนอร์มัล กรณี Line – Neutral 88

4.4.1.4 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V (Arrester 275 V) ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล กรณี Line – Ground 90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.1.5 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V (Arrester 275 V) ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล กรณี Neutral – Ground 92

4.4.2 ทดสอบระบบโดยรวม แบบต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 380 V หรือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V 94

4.4.2.1 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V (Arrester 480 V) ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล กรณี Line – Ground 94

4.4.2.2 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V (Arrester 275 V) ด้วยการต่อวงจรแบบนอร์มัล กรณี Line – Neutral 97

บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ 99

5.1 สรุปผลการทดสอบ 99

5.2 อุปสรรคและวิธีการแก้ไขในโครงงาน 100

5.3 ข้อเสนอแนะ 101

เอกสารอ้างอิง 102

ภาคผนวก 103

ภาคผนวก ก ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 104

ภาคผนวก ข รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงงาน 111

ภาคผนวก ค บทความทางวิชาการ 121

ประวัติผู้เขียน 126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า	5
2.2	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ชิ่ง	6
2.3	วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	7
2.4	เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายขั้น	10
2.5	อิเล็กโทรดสปาร์กแกป	13
2.6	สปาร์กแกปมีไกสวิตช์	14
2.7	ช่วงการกระตุ้นสปาร์กได้ของไกสวิตช์ในเทอมของระยะแกป	14
2.8	ลาปลาสทรานฟอร์มของวงจรอิมพัลส์พื้นฐาน	15
2.9	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม	18
2.10	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์	20
2.11	เส้นกราฟใช้หาแรงดันดิสชาร์จเบรกดาวน์ 50%	23
2.12	ลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน	24
2.13	วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์	26
2.14	การวัดกระแสด้วยโรกอฟสกีคอยล์	32
2.15	โรกอฟสกีคอยล์ชนิด Self integrator	33
2.16	ผลตอบสนองทางความถี่ของโรกอฟสกีคอยล์ชนิด Self integrator	34
2.17	วงจรทดสอบในกรณีคอมมัล	37
2.18	วงจรทดสอบในกรณีนอร์มัล	37
2.19	วงจรวงจรตัวเก็บประจุ – ตัวเหนี่ยวนำ	39
2.20	จุดผ่านศูนย์ของแรงดันกระแสสลับ	39
3.1	วงจรสมมูลจำลองวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (ขณะเปิดวงจร)	42
3.2	ผลการจำลองวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	42
3.3	วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (ขณะเปิดวงจร)	43
3.4	วงจรสมมูลจำลองวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ (ขณะลัดวงจร)	44
3.5	ผลการจำลองวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์	44
3.6	วงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ (ขณะลัดวงจร)	45
3.7	การจำลองวงจรทวีแรงดัน	46
3.8	ผลการจำลองวงจรทวีแรงดัน	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.9 วงจรกำเนิดแรงดันสูง 48
3.10 วงจรสมมูลที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรกำเนิดแรงดันสูง 50
3.11 ผลของการจำลองวงจรกำเนิดแรงดันสูงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 51
3.12 แสดงตำแหน่งขั้วทั้งสามของ SCR 52
3.13 วงจรภายใน IC เบอร์ TLP250 52
3.14 วงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับควบคุมการกำเนิดแรงดันสูง 52
3.15 เครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 53
3.16 วงจรของชุดตรวจจับผ่านศูนย์ 53
3.17 รูปคลื่นที่ได้จากชุดตรวจจับผ่านศูนย์ 54
3.18 ภายในกล่องเครื่องควบคุมสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 54
3.19 ภายนอกกล่องเครื่องควบคุมสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 55
3.20 วงจรจำลองการทำงานเพื่อหาค่ายอดแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 18 μF 56
3.21 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 18 μF 56
3.22 วงจรจำลองการทำงานเพื่อหาค่ายอดแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 9 μF 56
3.23 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 9 μF 57
3.24 ตัวเก็บประจุชนิดไมลาขนาด 1 μF พิกัด 400 V_{DC} 57
3.25 วงจรจำลองการทำงานเพื่อหาขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสม 58
3.26 แรงดันเกินคงเหลือที่เข้าสู่แหล่งจ่าย 59
3.27 กล่องวงจรกรอง 60
3.28 ขดลวดทองแดงเคลือบฉนวนเบอร์ 21 AWG 60
3.29 การจำลองที่ใช้ในการสร้างตัวเหนี่ยวนำแบบหนึ่งชั้น 61
3.30 การจำลองที่ใช้ในการคำนวณสร้างตัวเหนี่ยวนำแบบหลายชั้น 61
3.31 ตัวเหนี่ยวนำที่ประกอบสร้าง 62
3.32 ตัวเหนี่ยวนำสามชั้นซ้อนแกนร่วม 63
3.33 อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่ใช้ในระบบแรงดันต่ำ 480 V 64
3.34 อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่ใช้ในระบบแรงดันต่ำ 275 V 64
3.35 วงจรสมมูลของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่ใช้ในระบบแรงดันต่ำ 275 V 65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1	ชุดเครื่องสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม	68
4.2	รูปคลื่นที่วัดได้จากชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน	68
4.3	วงจรทดสอบการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพพัลส์	69
4.4	วงจรสมมูลของการทดสอบในการสร้างแรงดันอิมพัลส์	69
4.5	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกที่ได้จากการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม	70
4.6	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบที่ได้จากการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม	70
4.7	วงจรการทดสอบการสร้างรุปคลื่นกระแสอิมพัลส์	71
4.8	วงจรสมมูลของการทดสอบในการสร้างกระแสอิมพัลส์	72
4.9	รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ขั้วบวกที่ได้จากการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม	72
4.10	รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ขั้วลบที่ได้จากการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม	73
4.11	วงจรการทดสอบวงจรคัปปลิ้ง และดีคัปปลิ้ง	74
4.12	วงจรสมมูลของการทดสอบวงจรคัปปลิ้ง และดีคัปปลิ้ง ในกรณี Line – Ground	74
4.13	รูปคลื่นแรงดันเกินขั้วบวกที่ผ่านเข้าสู่แหล่งจ่าย Line – Ground	75
4.14	รูปคลื่นแรงดันเกินขั้วลบที่ผ่านเข้าสู่แหล่งจ่าย Line – Ground	75
4.15	รูปคลื่นแรงดันเกินขั้วบวกที่ผ่านเข้าสู่แหล่งจ่าย Neutral – Ground	76
4.16	รูปคลื่นแรงดันเกินขั้วลบที่ผ่านเข้าสู่แหล่งจ่าย Neutral – Ground	76
4.17	รูปคลื่นแรงดันเกินขั้วบวกที่ผ่านเข้าสู่แหล่งจ่าย Line - Neutral	77
4.18	รูปคลื่นแรงดันเกินขั้วลบที่ผ่านเข้าสู่แหล่งจ่าย Line - Neutral	77
4.19	วงจรการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมในกรณีสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	78
4.20	วงจรสมมูลของการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	79
4.21	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 0 องศา	80
4.22	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 90 องศา	81
4.23	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 180 องศา	82
4.24	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 270 องศา	83
4.25	วงจรการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัลในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line - Ground	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.26	วงจรสมมูลของการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัลในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground	84
4.27	รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ต่อวงจรแบบคอมมัล เมื่ออัดประจุด้วยแรงดันขั้วบวก โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Ground	85
4.28	รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ต่อวงจรแบบคอมมัล เมื่ออัดประจุด้วยแรงดันขั้วลบ โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Ground	85
4.29	วงจรการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล ในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Neutral – Ground	86
4.30	วงจรสมมูลของการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัลในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Neutral – Ground	86
4.31	รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ต่อวงจรแบบคอมมัล เมื่ออัดประจุด้วยแรงดันขั้วบวก โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Neutral – Ground	87
4.32	รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ต่อวงจรแบบคอมมัล เมื่ออัดประจุด้วยแรงดันขั้วลบ โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Neutral – Ground	87
4.33	วงจรการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบนอร์มัล	88
4.34	วงจรสมมูลของการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบนอร์มัล	88
4.35	รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ต่อวงจรแบบนอร์มัล เมื่ออัดประจุด้วยแรงดันขั้วบวก โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Neutral	89
4.36	รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ต่อวงจรแบบนอร์มัล เมื่ออัดประจุด้วยแรงดันขั้วลบ โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Neutral	89
4.37	วงจรการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล ในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground	90
4.38	วงจรสมมูลของการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัลในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground	90
4.39	รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ต่อวงจรแบบคอมมัล เมื่ออัดประจุด้วยแรงดันขั้วบวก โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Ground	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.40 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ต่อวงจรแบบคอมมัล เมื่ออัดประจุด้วยแรงดันขั้วลบ โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Ground 91

4.41 วงจรการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล ในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Neutral – Ground 92

4.42 วงจรสมมูลของการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัลในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Neutral – Ground 92

4.43 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ต่อวงจรแบบคอมมัล เมื่ออัดประจุด้วยแรงดันขั้วบวก โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Neutral – Ground 93

4.44 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ต่อวงจรแบบคอมมัล เมื่ออัดประจุด้วยแรงดันขั้วลบ โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Neutral – Ground 93

4.45 วงจรสร้างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 94

4.46 วงจรการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล ในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground ซึ่งต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 380 V 95

4.47 วงจรสมมูลของการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัลในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground ซึ่งต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 380 V 95

4.48 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ต่อวงจรแบบคอมมัล ซึ่งต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 380 V เมื่อชาร์จแรงดันขั้วบวก โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Ground 96

4.49 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ต่อวงจรแบบคอมมัล ซึ่งต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 380 V เมื่อชาร์จแรงดันขั้วลบ โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Ground 96

4.50 วงจรการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบนอร์มัล ซึ่งต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V 97

4.51 วงจรสมมูลของการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบนอร์มัล ซึ่งต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V 97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.52	รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ต่อวงจรแบบนอร์มัล ซึ่งต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เมื่อชาร์จแรงดันขั้วบวก โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Neutral	98
4.53	รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ต่อวงจรแบบนอร์มัล ซึ่งต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เมื่อชาร์จแรงดันขั้วบวก โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Neutral	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 วิธีการดำเนินงาน 3

2.1 ค่าองค์ประกอบของ B_1,B_0 และ K สำหรับวงจร A และ วงจร B 17

2.2 ค่าองค์ประกอบเวลา T_1, T_2 และประสิทธิภาพของวงจร A และ วงจร B 21

2.3 ชนิดของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน IEC 62475 25

3.1 คุณลักษณะทางเวลา T_1, T_2 ของรูปคลื่นแรงดันและกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5 41

3.2 คุณสมบัติที่ต้องการของชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน 49

4.1 ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากการทดสอบ 71

4.2 ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ได้จากการทดสอบ 73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในระบบไฟฟ้านั้นโดยทั่วไปมีโอกาสเกิดแรงดันเกินขึ้นได้ ซึ่งอาจเกิดจากฟ้าผ่าทั้งทางตรงและทางอ้อม และการตัดต่อวงจรของสวิตช์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยจะแบ่งตามชนิดของแรงดันเกินได้ 2 ชนิด คือ แรงดันเกินฟ้าผ่า และแรงดันเกินสวิตช์ชิ่ง ดังนั้นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งานในระบบไฟฟ้าอาจมีโอกาสที่จะได้รับแรงดันเกิน และอาจเกิดความเสียหายได้ จึงควรมีการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินและกระแสซึ่งเกิดจากแรงดันเกินก่อนนำไปใช้งาน เพื่อให้มั่นใจว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าของเรานั้นสามารถทนแรงดันเกินได้ในระดับหนึ่ง

การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าจะแบ่งการทดสอบออกเป็นหลายชนิด เช่น การทดสอบด้วยคลื่นแกว่ง การทดสอบระดับความคงทนได้ต่อแรงดัน และทดสอบด้วยรูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแส ในการทดสอบด้วยรูปคลื่นแรงดัน และรูปคลื่นกระแสนั้นยังแบ่งเป็น การทดสอบด้วยคลื่นแกว่ง การทดสอบด้วยรูปคลื่นผสม เป็นต้น ซึ่งขึ้นกับแต่ละมาตรฐานกำหนดด้วย

เทคโนโลยีในการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันสูงที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีประสบการณ์และศักยภาพเพียงพอที่จะสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมพิกัด 10 kV 5 kA ได้ อีกทั้งเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมนี้ มีการศึกษาวิจัยการออกแบบสร้างขึ้นเองภายในประเทศน้อยมาก จึงมีความจำเป็น ที่จะต้องทำการศึกษาวิจัยออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมพิกัด 10 kV 5 kA ขึ้นมาเพื่อใช้ในงานวิจัยและใช้ในการทดสอบของห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และเพื่อพัฒนาความรู้และศักยภาพทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงของประเทศอีกด้วย

สำหรับโครงงานนี้จะทำการออกแบบ และสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5 พิกัดสูงสุด 10 kV 5 kA

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อทำการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมพิกัด 10 kV 5 kA สำหรับใช้ในงานวิจัยและทดสอบของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง
2. เพื่อส่งเสริมให้เกิดการวิจัยเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
3. เพื่อรองรับงานวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินด้านแรงต่ำ
4. เพื่อรองรับการบริการด้านการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินด้านแรงต่ำในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

1. ศึกษาคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมพิกัด 10 kV 5 kA
2. ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมพิกัด 10 kV 5 kA
3. ทำการทดสอบคุณภาพของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมพิกัด 10 kV 5 kA

1.4 แผนการดำเนินโครงงาน

1. ศึกษาคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมพิกัด 10 kV 5 kA
2. ศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ
3. ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมพิกัด 10 kV 5 kA
4. ทำการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมพิกัด 10 kV 5 kA
5. ทำการวิเคราะห์ปรับปรุงคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมพิกัด 10 kV 5 kA
6. ทำปริญญานิพนธ์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2557								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษาคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมพิกัด 10 kV 5 kA	◄──► ◄- -►	◄──► ◄- -►	◄──► ◄- -►	◄──► ◄- -►					
2. ศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ	◄──► ◄- -►	◄──► ◄- -►	◄──► ◄- -►	◄──► ◄- -►	◄──► ◄- -►	◄──► ◄- -►			
3. ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมพิกัด 10 kV 5 kA		◄──► ◄- -►	◄──► ◄- -►	◄──► ◄- -►	◄──► ◄- -►	◄──► ◄- -►			
4. ทำการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมพิกัด 10 kV 5 kA				◄──► ◄- -►	◄──► ◄- -►	◄──► ◄- -►			
5. ทำการวิเคราะห์ปรับปรุงคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมพิกัด 10 kV 5 kA						◄──► ◄- -►	◄──► ◄- -►	◄──► ◄- -►	
6. ทำปริญญานิพนธ์							◄- -►	◄──► ◄- -►	◄──► ◄- -►

ทำจริง ◄──►

วางแผน ◄- - - -►

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน

1. สามารถออกแบบสร้างต้นแบบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมพิกัด 10 kV 5 kA ได้ตามข้อกำหนดที่ตั้งไว้

2. สามารถนำเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมพิกัด 10 kV 5 kA มาใช้ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงเพื่อรองรับงานเกี่ยวกับการวิจัยและการบริการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการสร้างแรงดันอิมพัลส์ [1]

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันเกินทรานเซียนต์ ซึ่งเกิดจากเหตุภายนอก ที่เกี่ยวกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า และที่เกิดขึ้นจากสาเหตุภายในระบบส่งจ่ายเอง อันเนื่องมาจากการทำงานของสวิตช์ หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ชิ่ง สำหรับการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขึ้นในห้องทดสอบนั้น มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาวิจัย หรือทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ก่อนที่จะถูกนำไปติดตั้ง เพื่อยืนยันความสามารถของความคงทนต่อแรงดันเกินเหล่านี้ที่เกิดขึ้น ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันหรือความเครียดสนามไฟฟ้าอิมพัลส์ ไม่ขึ้นกับแรงดันสูงเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับการแปรของแรงดันไปตามเวลาอีกด้วย ฉะนั้นเพื่อความสะดวกต่อการเปรียบเทียบผลการทดสอบ จึงกำหนดรูปคลื่นอิมพัลส์ให้เป็นมาตรฐานขึ้น โดยยึดถือเอารูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติเป็นเกณฑ์ รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อาจกำหนดด้วย

1. ขนาดของแรงดัน โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน
2. ขั้วของแรงดันอาจจะเป็นบวก หรือลบก็ได้ เมื่อเทียบกับดิน
3. เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 คือ ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ถึงค่ายอด
4. เวลาช่วงหลังคลื่น T_2 คือ ช่วงเวลาตั้งแต่แรงดันดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด
5. แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าจะเรียกว่า รูปคลื่น 1.2/50 μs
6. แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตช์ชิ่งจะเรียกว่า รูปคลื่น 250/2500 μs

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อาจแบ่งเป็น

- รูปคลื่นเต็ม (Full wave) หมายถึง รูปคลื่นที่ขนาดเพิ่มขึ้นถึงค่ายอด แล้วค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.1 ก)
- รูปคลื่นตัด (Chopped wave) เกิดจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มนี้เมื่อป้อนเข้าไปที่วัสดุทดสอบแล้ว หากฉนวนของวัสดุทดสอบทนไม่ได้ จะเกิดการสปาร์กผ่าน เกิดวาบไฟตามผิว หรือเกิดเบรกดาวน์เจาะทะลุ ทำให้เกิดการลัดวงจร ณ จุดนั้น การเกิดคลื่นตัดนี้ อาจจะเกิดขึ้นที่ส่วนหลังคลื่นดังรูปที่ 2.1 ข) หรือส่วนหน้าคลื่นดังรูปที่ 2.1 ค) ก็ได้
- รูปคลื่นตัดมีส่วนกำหนดสำคัญ คือ เวลาช่วงคลื่นตัด (Chopped time) T_C

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตามมาตรฐานกำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 เวลาหลังคลื่น T_2 และค่ายอด U_m ไว้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

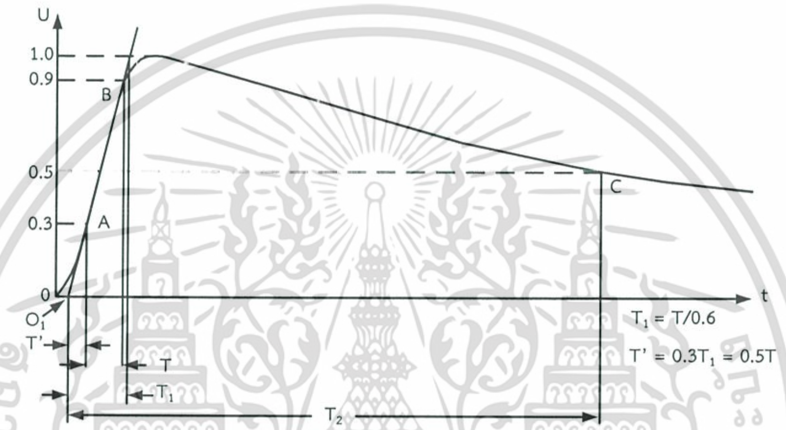
เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2\ \mu s \pm 30\ \%$

เวลาช่วงหลังคลื่น $T_2 = 50\ \mu s \pm 20\ \%$

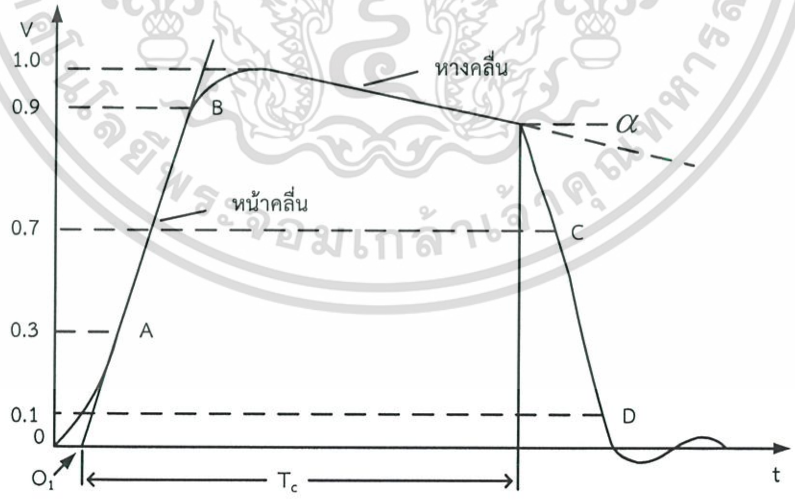
ค่ายอดแรงดัน $U_m \pm 3\ \%$

ส่วนแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตช์ชิ่ง 250/2500 μs ดังรูปที่ 2.2 จะกำหนดให้มีความคลาดเคลื่อนได้คือ เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_{cr} = 250\ \mu s \pm 20\ \%$

เวลาช่วงหลังคลื่น $T_2 = 2500\ \mu s \pm 60\ \%$



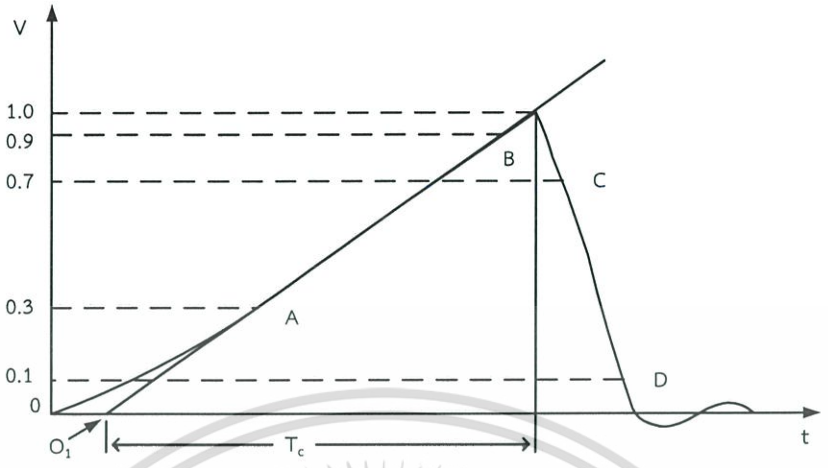
ก) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม



ข) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หลังคลื่น

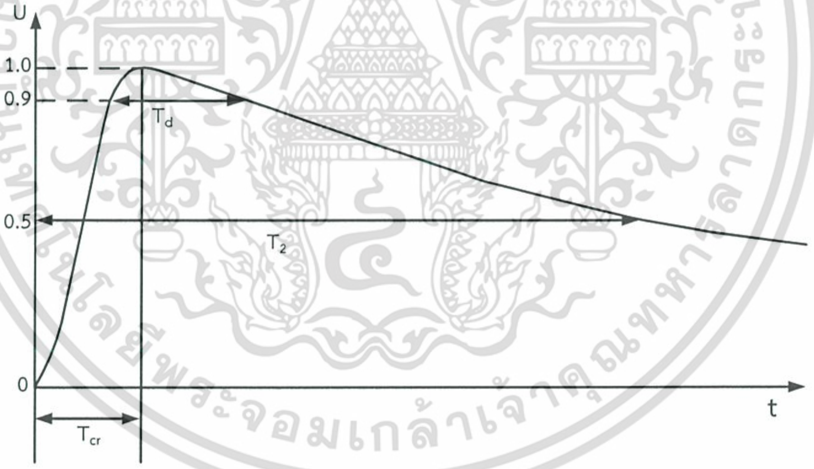
รูปที่ 2.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น

รูปที่ 2.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (ต่อ)

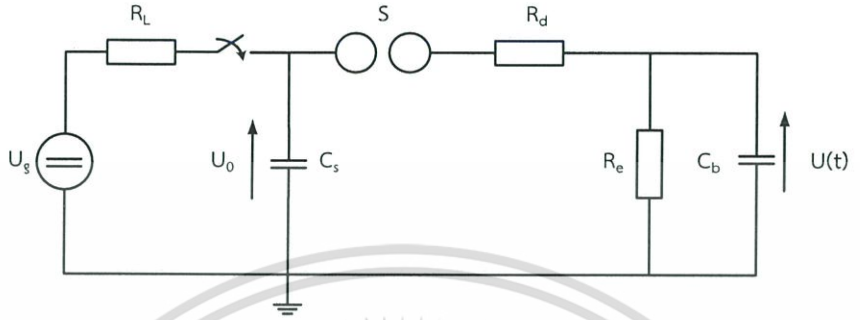


รูปที่ 2.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ชิ่ง

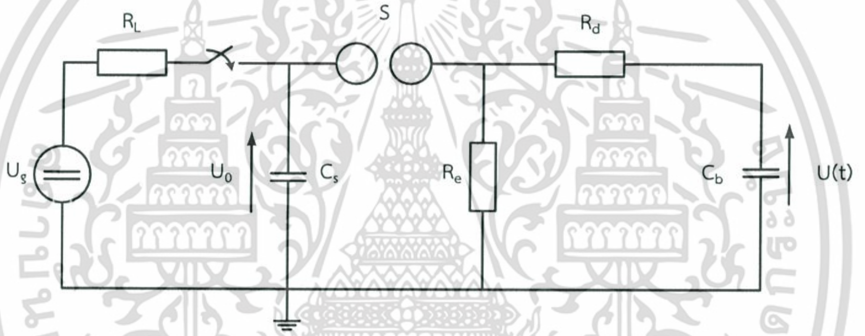
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ามี 2 แบบ ดังในรูปที่ 2.3



ก) วงจร A



ข) วงจร B

รูปที่ 2.3 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ความหมายในรูปวงจร A และวงจร B

U_g คือ แรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่าย

U_0 คือ แรงดันอัดประจุกระแสตรง

C_s คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน

C_b คือ ตัวเก็บประจุโหลด (รวมทั้งความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์เครื่องมือวัดและอื่นๆ)

R_L คือ ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

R_d คือ ความต้านทานหน่วง

R_e คือ ความต้านทานปล่อยประจุ

U(t) คือ แรงดันอิมพัลส์ที่ได้แปรไปตามเวลา

S คือ สปาร์กแกป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าที่ของส่วนประกอบในวงจร คือ แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง U_g เป็นตัวป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ที่เป็นตัวเก็บพลังงาน มีค่าแรงดันที่กำหนด U_0 การอัดประจุนี้จะผ่านความต้านทาน R_L ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมเวลาและกระแสในการอัดประจุ ระยะห่างของสปาร์กแกป S จะเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันที่เริ่มทำงานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เพื่อให้สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่ายอดตามต้องการสปาร์กแกปจึงต้องทำงานร่วมกับไกสวิตช์ (Trigger) ที่มีลักษณะเป็นแกปช่วย (Auxiliary gap) เพื่อให้ตัวเก็บประจุ C_s ทำการปล่อยประจุให้กับโหลด การเกิดสปาร์กในช่องสปาร์กแกปจะดำเนินไปด้วยความรวดเร็ว ในขณะเกิดสปาร์กที่สปาร์กแกป S แรงดันอัดประจุ U_0 จะตกคร่อม R_d และ C_b ประจุจะถ่ายเทไปยังวัสดุทดสอบ ซึ่งแทนด้วย C_b สำหรับเวลาในการปล่อยประจุจาก C_s ไปยัง C_b จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับ R_d และ C_b ซึ่งนับเป็นเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 เมื่อถ่ายเทประจุให้ C_b จนกระทั่งแรงดันตกคร่อม C_s เท่ากับแรงดันที่ตกคร่อม C_b จะไม่มีการถ่ายเทประจุระหว่าง C_s กับ C_b จากนั้น C_s และ C_b จะทำการปล่อยประจุผ่าน R_e จึงกล่าวได้ว่า R_e ทำหน้าที่ควบคุมเวลาช่วงหลังคลื่น T_2

ค่ายอดแรงดันที่จ่ายออกจากปลายแรงสูง U จะน้อยกว่าแรงดันอัดประจุ U_0 เพราะมีการถ่ายเทประจุระหว่าง C_s และ C_b ฉะนั้นอัตราส่วนของ U ต่อ U_0 จะน้อยกว่า 1 เสมอ และเรียกอัตราส่วนนี้เป็นประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ประสิทธิภาพของวงจรสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$\eta = U/U_0 \leq (C_s/(C_s+C_b)) \tag{2.1}$$

ฉะนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าสูง และให้ได้รูปคลื่นตามมาตรฐานกำหนดควรเลือกให้ C_s มีค่าสูงกว่าโหลด C_b มากๆ โดยทั่วไปจะให้ $C_s \geq 10\ C_b$

ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปจะกำหนดด้วย

- แรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิด U_n (kV)
- แรงดันอัดประจุรวมทั้งหมด U_0 (kV)
- ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด C_s (μF)
- พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด W_e (kJ)
- อัตราการดิสชาร์จจำนวนครั้งต่อนาที
- รูปคลื่นแรงดันแบบฟ้าผ่า หรือแบบสวิตช์ชิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับความจุไฟฟ้า C_s และแรงดันอัดประจุ U_0 ซึ่งค่าพลังงานคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

$$W = \frac{1}{2} C_s U_0^2 \times 10^{-3} \qquad \text{kJ} \tag{2.2}$$

เมื่อ W คือ พลังงานอัดประจุเป็น kJ

C_s คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเป็น μF

U_0 คือ แรงดันอัดประจุเป็น kV

2.1.2 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น [2]

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่มีพิกัดเกิน 200 kV โดยปกติจะใช้วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น อันเนื่องมาจากข้อจำกัด ด้านฉนวน ด้านเศรษฐศาสตร์ โดยจะใช้วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์พื้นฐานมาต่อซ้อนกันหลายขั้นตามหลักการ วงจรของมารกซ์ (Marx’s circuit) ดังในรูปที่ 2.4

ในวงจรรูปที่ 2.4 ตัวเก็บประจุ C_s ทุกตัวจะได้รับการอัดประจุในลักษณะที่ต่อกันแบบขนานด้วยแรงดัน U_0 เมื่อส่งสัญญาณพัลส์ผ่านไกสวิตช์จะทำให้สปาร์กที่แกปขั้นแรกทำงานก่อนและสปาร์กแกปขั้นต่อๆไปก็จะเกิดสปาร์กตามลำดับ เป็นผลให้ตัวเก็บประจุ C_s ทั้งหมดเสมือนต่อกันแบบอนุกรม และได้แรงดันสูงเป็นทวีคูณตามจำนวนขั้นของวงจร ถ้าเครื่องกำเนิดมี n ขั้นก็จะได้แรงดันสูงจ่ายออกเป็น

ค่าแรงดันรวมที่ได้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$U_0 = n\,U_0' \tag{2.3}$$

ค่าความจุไฟฟ้ารวมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$C_s = C_s' / n \tag{2.4}$$

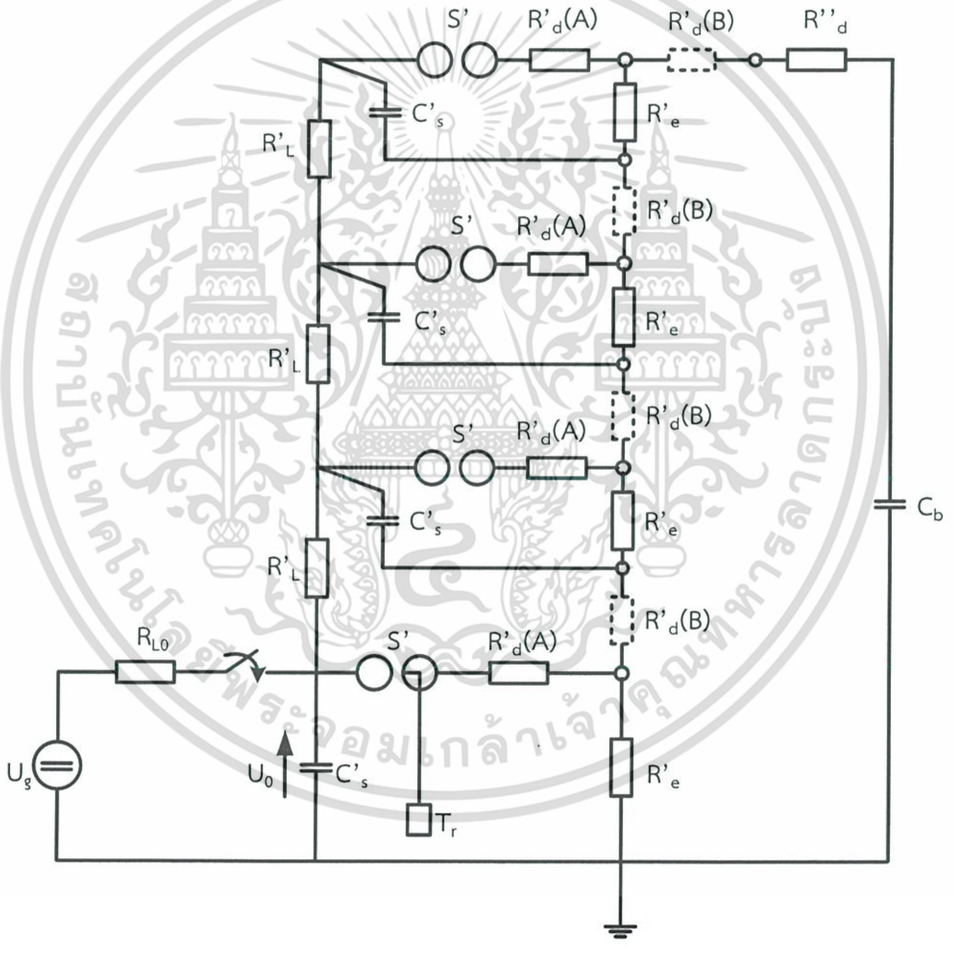
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต้านทานหน้าคลื่นรวมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$R_d = n R_d' \tag{2.5}$$

ค่าความต้านทานหลังคลื่นรวมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6

$$R_e = n R_e' \tag{2.6}$$



รูปที่ 2.4 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายขั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะประกอบด้วย องค์ประกอบดังนี้

1. ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s)
2. ตัวเก็บประจุโหลด (C_b)
3. ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L)
4. ความต้านทานปรับช่วงเวลาหน้าคลื่น (R_d)
5. ความต้านทานปรับช่วงเวลาหลังคลื่น (R_e)
6. สปาร์กแกปและไกสวิตซ์

1. ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ทำหน้าที่เก็บพลังงานไว้ในรูปสนามไฟฟ้า โดยการอัดประจุด้วยแรงดันสูงกระแสตรง แล้วคายพลังงานออกไปอย่างรวดเร็ว ตัวเก็บประจุอิมพัลส์จึงต้องเป็นประเภทที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้รูปคลื่นแรงดันที่สร้างขึ้นไม่เกิดการแกว่ง (Oscillation)

ค่าความจุไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน (1.2/50 μs) ได้ โดยปกติค่าตัวเก็บประจุ (C_s) จะต้องมีค่ามากกว่าค่าตัวเก็บประจุโหลด (C_b) อย่างน้อย 10 เท่า นั่นคือ

$$C_s \geq 10\,C_b \tag{2.7}$$

2. ตัวเก็บประจุโหลด (C_b) ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุโหลด (C_b) หมายถึง ผลรวมของความจุไฟฟ้าของวัสดุ และอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า ปลอกฉนวนนำสายหม้อแปลงวัดแรงดันและกระแส โวลเตจดิไวเดอร์ รวมกับตัวเก็บประจุที่ต่อเพิ่มเติมเข้าไปเพื่อปรับรูปคลื่นให้ได้ตามมาตรฐาน ซึ่งตัวเก็บประจุโหลด (C_b) มีส่วนสำคัญในการปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับช่วงเวลาหน้าคลื่น แต่จะมีผลน้อยต่อช่วงเวลาหลังคลื่น คุณสมบัติของตัวเก็บประจุโหลดจะต้องมีค่าพิกัดแรงดันมากกว่าค่าแรงดันทดสอบของวัสดุหรืออุปกรณ์ทดสอบ และควรมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s)

3. ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปจะมีการกำหนดความถี่ของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ไว้ เช่น 3 ครั้งต่อนาทีเพราะการใช้เครื่องกำเนิดให้ทำการคายประจุ และอัดประจุด้วยอัตราเร็วมากเกินไปจะทำให้เกิดผลเสียต่อองค์ประกอบต่างๆ เช่น วงจรเรียงกระแส (ไดโอดแรงสูง และตัวเก็บประจุกรองกระแส) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ และความต้านทานปรับรูปคลื่น เป็นต้น เพราะว่าในการคายประจุจะเป็นแบบสภาวะทรานเซียนต์ ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันและกระแสอย่างรวดเร็ว นั่นก็คือการเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของสนามไฟฟ้า ซึ่งมีผลกระทบต่อการฉนวนของอุปกรณ์ในวงจรของเครื่องกำเนิดในด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า หรือความเครียดสนามไฟฟ้าอันจะทำให้อายุการใช้งานขององค์ประกอบสั้นลงหากใช้งานอย่างต่อเนื่อง ฉะนั้นจึงต้องไม่ให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ทำการอัดประจุหรือคายประจุมากเกินไป ซึ่งการจำกัดอัตราการอัดประจุอาจทำได้โดยใช้ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L) ซึ่งจะต่ออนุกรมคั่นอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) เพื่อให้กระแสอัดประจุมีค่าไม่เกินค่าพิกัดกระแสของแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง (i) ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มแรงดันอัดประจุ du/dt จะต้องไม่ควรเร็วเกินไป ดังนั้นค่ากระแสอัดประจุจึงเขียนได้ตามสมการที่ 2.8

$$i = C\,du/dt \tag{2.8}$$

นอกจากนี้ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L) ต้องมีความคงทนต่อแรงดันอัดประจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ได้ เพราะความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L) จะต้องรับแรงดันเท่ากับพิกัดของแรงดันอัดประจุเมื่อตัวเก็บประจุอัดประจุเต็ม นอกจากการพิจารณาเลือกค่าความต้านทานและความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์แล้วยังต้องคำนึงถึงค่ากำลังไฟฟ้าของความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ ที่มีค่าสูงพอ เมื่อต้องรับกระแสอัดประจุตลอดเวลาที่อัดประจุได้

4. ความต้านทานปรับรูปคลื่น ความต้านทานปรับรูปคลื่นในที่นี้หมายถึงความต้านทานปรับช่วงเวลาหน้าคลื่น (R_d) และความต้านทานปรับช่วงเวลาหลังคลื่น (R_e) ที่แสดงดังไว้ในรูปที่ 2.3 ซึ่งความต้านทานปรับช่วงเวลาหน้าคลื่น (R_d) จะมีผลต่อเวลาหน้าคลื่น T_1 กล่าวคือ T_1 จะแปรตามค่าความต้านทานปรับช่วงเวลาหน้าคลื่น (R_d) และเช่นเดียวกันความต้านทานปรับช่วงเวลาหลังคลื่น (R_e) มีผลต่อเวลาหลังคลื่น T_2 กล่าวคือ T_2 จะแปรตามค่าความต้านทานปรับช่วงเวลาหลังคลื่น (R_e)

คุณสมบัติของความต้านทานปรับช่วงเวลาหน้าคลื่น (R_d) และความต้านทานปรับช่วงเวลาหลังคลื่น (R_e) จะต้องสามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับพลังงานจากการดิสชาร์จในสภาวะทรานเซียนต์ได้โดยไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนเกินไปตลอดช่วงเวลาทำงาน โดยทั่วไปมักจะใช้ความต้านทานที่ทำด้วยเส้นลวดความต้านทาน โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอาจคำนวณได้จากสมการของพลังงานที่ผ่านความต้านทานดังสมการที่ 2.9

$$W = mc\Delta T \tag{2.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ W คือ พลังงานที่ป้อนผ่านความต้านทาน (kJ)

m คือ มวลของเส้นลวดที่ประกอบเป็นความต้านทาน (kg)

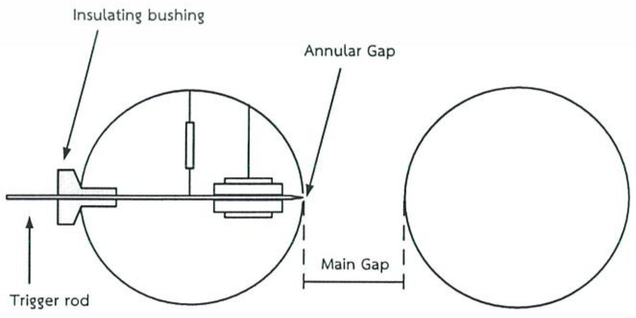
c คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg.K)

ΔT คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (˚C)

สิ่งสำคัญประการหนึ่งของการสร้างความต้านทานปรับช่วงเวลาหน้าคลื่น (R_d) และความต้านทานปรับช่วงเวลาหลังคลื่น (R_e) ก็คือจะต้องเป็นความต้านทานปลอดความเหนี่ยวนำหรือมีแต่น้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อมิให้เกิดการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

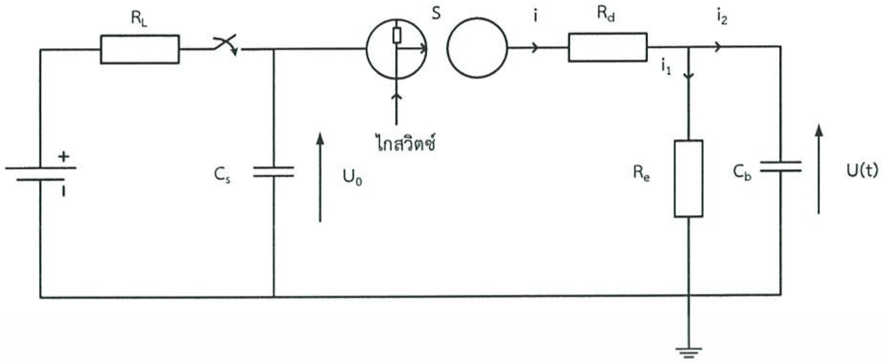
5. สปาร์กแกปและไกสวิตช์ แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบหรือการศึกษาวิจัยจะต้องสามารถสร้างให้มีขนาดเท่าเดิมกี่ครั้งก็ได้ ซึ่งตามมาตรฐาน IEC 60060-1 [3] ได้กำหนดให้มีค่าคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ± 3% การควบคุมให้ขนาดแรงดันเท่าเดิมดังกล่าวนี้ทำได้โดยการใช้พัลส์ไกสวิตช์บังคับให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เริ่มต้นปล่อยประจุที่แรงดันอัดประจุที่กำหนด พัลส์ไกสวิตช์จะเป็นตัวทำให้เกิดการสปาร์กที่แกปช่วย (auxiliary gap) ซึ่งเป็นแกปแคบๆ ขนาดประมาณ 1-2 มิลลิเมตร อยู่ที่ด้านหนึ่งของสปาร์กแกปคู่แรกของเครื่องกำเนิดดังรูปที่ 2.5 และ 2.6 แกปช่วยนี้จะเป็นสัญญาณพัลส์ทำให้เกิดสปาร์กขึ้นในแกปช่วยก่อน ผลของการเกิดสปาร์กในแกปช่วยนี้ทำให้เกิดการไอออไนเซชันของอากาศและเกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้นระหว่างสปาร์กแกปคู่แรก และเกิดการปล่อยประจุที่สปาร์กแกปคู่นั้น เป็นผลให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ตัวแรกต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ตัวที่สอง และเกิดสปาร์กที่แกปถัดไปเป็นลำดับจนถึงแกปคู่สุดท้ายหรือคู่บนสุดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และเป็นการเริ่มต้นคายพลังงานให้กับตัวเก็บประจุโหลด ซึ่งจะได้แรงดันอิมพัลส์ตามที่ต้องการ ฉะนั้นการใช้ไกสวิตช์ช่วยเริ่มต้นจุดสปาร์กจึงทำให้สามารถกำหนดแรงดันคายประจุ ได้อย่างแม่นยำ

สัญญาณพัลส์ที่ใช้สำหรับทำให้เกิดสปาร์กในแกปช่วยนั้น โดยทั่วไปจะใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ความเร็วสูงร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์สร้างพัลส์ โดยแรงดันของพัลส์นี้มีค่าประมาณ 5-10 kV และจะต้องทำให้เกิดสปาร์กแกปภายในเวลา 10-100 ns



รูปที่ 2.5 อิเล็กโทรดสปาร์กแกป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

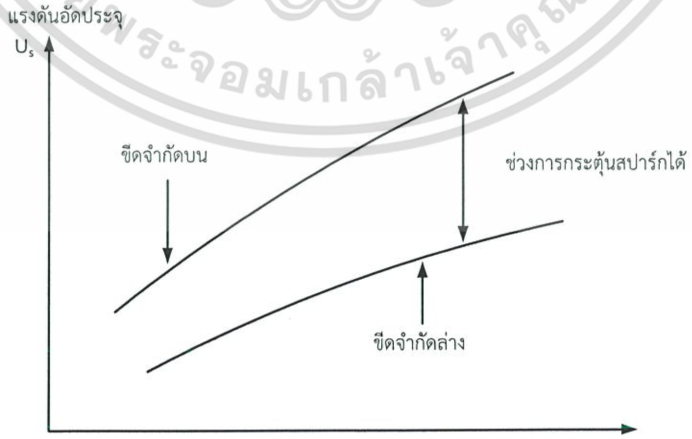


รูปที่ 2.6 สปาร์กแกปมีไกสวิตซ์

คุณลักษณะการทำงานหรือประสิทธิภาพของไกสวิตซ์จะพิจารณากันที่ช่วงการกระตุ้น สปาร์กได้ ซึ่งหมายถึงที่ระยะแกปกำหนดให้ค่าหนึ่ง โดยให้เกิดสปาร์กเอง (Self firing) เรียกว่า ขีดจำกัดบน และที่พัลส์ไกสวิตซ์จะสามารถจุดสปาร์กได้ (Trigger) ที่แรงดันอัดประจุต่ำสุดเท่าใด เรียกว่า ขีดจำกัดล่าง ความแตกต่างของแรงดันกระตุ้นสปาร์กได้ระหว่างค่าต่ำสุดกับค่าสูงสุดเรียกว่า “ช่วงการกระตุ้นสปาร์กได้” (Trigger range) ของไกสวิตซ์ ซึ่งอาจแสดงเป็นค่าแรงดันกิโลโวลต์ หรือเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าแรงดันขีดจำกัดบนตามสมการที่ 2.10

$$\text{ช่วงการกระตุ้นสปาร์กได้} = ((\text{ขีดจำกัดบน} - \text{ขีดจำกัดล่าง})/\text{ขีดจำกัดบน}) \times 100\% \qquad (2.10)$$

ความสัมพันธ์ของแรงดันที่กระตุ้นได้ต่ำสุดและสูงสุด และช่วงการกระตุ้นได้ในเทอมของระยะแกปแสดงดังรูปที่ 2.7

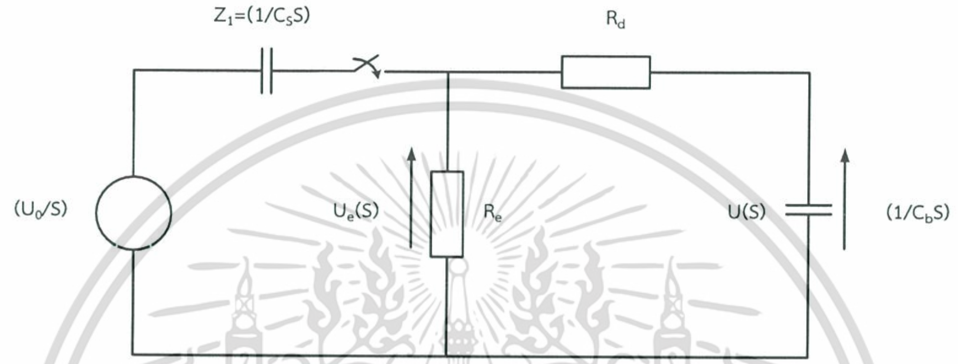


รูปที่ 2.7 ช่วงการกระตุ้นสปาร์กได้ของไกสวิตซ์ในเทอมของระยะแกป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์ [1]

1. การแปรของแรงดันในเทอมของเวลา อาศัยการวิเคราะห์จากวงจรพื้นฐานสร้างแรงดันอิมพัลส์ เช่น วงจรพื้นฐาน B ในรูปที่ 2.4 ข) เมื่ออัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) ด้วยแรงดันอัดประจุ (U_0) และเกิดสปาร์กที่สปาร์กแกป S จะทำให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) ต่อกับวงจรปรับรูปคลื่น การวิเคราะห์ใช้ Laplace transform เขียนวงจรสร้างแรงดันได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลาปลาซทรานฟอร์มของวงจรอิมพัลส์พื้นฐาน

จากวงจรในรูปที่ 2.8 ค่าแรงดันตกคร่อม R_e จะเขียนได้ดังสมการที่ 2.11

$$U_e(s) = \frac{U_0}{S}\frac{Z_2}{(Z_1+Z_2)} \tag{2.11}$$

เมื่อ

$$Z_1 = \frac{1}{C_s S} \tag{2.12}$$

$$Z_1 = \frac{R_e(R_d+\frac{1}{C_b S})}{R_e+R_d+\frac{1}{C_b S}} \tag{2.13}$$

นำสมการ (2.12) และ (2.13) แทนลงใน (2.11)

ฉะนั้น

$$U_e(s) = \frac{U_0(R_d R_e C_s C_b S+R_e C_s)}{R_d C_b S+R_e C_b S+R_e C_s S+R_d R_e C_s C_b S^2} \tag{2.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันที่จ่ายออกจากโหลดคิดจาก $U_e(s)$ ตามอัตราส่วนอิมพีแดนซ์จะได้

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

แทน $U_e(s)$ ด้วยสมการ (2.14)

$$U(s) = \frac{U_0 R_e C_s}{R_d R_e C_s C_b S^2 + (R_d C_b + R_e C_b + R_e C_s)S+1}$$

$$U(s) = \frac{U_0}{R_d C_b} \frac{1}{S^2 + \frac{(R_d C_b + R_e C_b + R_e C_s)S}{R_d R_e C_s C_b} + \frac{1}{R_d R_e C_s C_b}}$$

ซึ่งอาจเขียนได้ในภาพแบบง่ายๆ คือ

$$U(s) = \frac{U_0}{K} \frac{1}{S^2 + B_1 S + B_0}$$

$$= \frac{U_0}{K} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \left[\frac{1}{(S-\alpha_1)} - \frac{1}{(S-\alpha_2)} \right] \qquad (2.15)$$

เมื่อกำหนดให้

$$B_1 = \frac{R_d C_b + R_e C_s + R_e C_b}{R_d R_e C_s C_b} \qquad (2.16)$$

$$B_0 = \frac{1}{R_d R_e C_s C_b} \qquad (2.17)$$

$$K = R_d C_b \qquad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

α_1, α_2 เป็นค่ารากที่สองของสมการ $S^2+B_1S+B_0 = 0$

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{B_1 \pm \sqrt{b_1^2 - 4B_0}}{2} \tag{2.19}$$

จึงเขียนค่าแรงดันอิมพัลส์ในเทอมของเวลาได้ดังนี้

$$U(t) = \frac{U_0}{K}\frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)}\left\{e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}\right\} \tag{2.20}$$

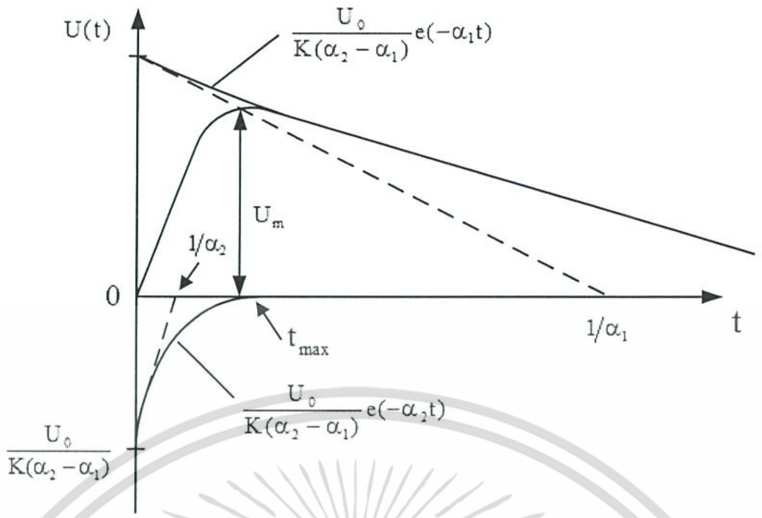
ค่าองค์ประกอบของ B_1, B_0 และ K สำหรับวงจร A และ วงจร B แสดงไว้ในตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าองค์ประกอบของ B_1, B_0 และ K สำหรับวงจร A และ วงจร B

	B_1	B_0	K
วงจร A	$\frac{R_dC_s+R_eC_s+R_eC_b}{R_dR_eC_sC_b}$	$\frac{1}{R_dR_eC_bC_s}$	R_dC_b
วงจร B	$\frac{R_dC_b+R_eC_b+R_eC_s}{R_dR_eC_sC_b}$	$\frac{1}{R_dR_eC_bC_s}$	R_dC_b

จากสมการของแรงดันที่ได้จากวงจรอิมพัลส์จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของแรงดันในเทอมของเวลา ประกอบด้วยเทอมเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม ซึ่งมีค่าคงตัวเวลา (Time constant) เท่ากับ $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม

ตามนิยามของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานที่กำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่นและหลังคลื่น T_1 และ T_2 ตามลำดับ มีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลา $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ T_1 / T_2 อันเป็นตัวแสดงถึงภาพพลักษณะของรูปคลื่น ค่า T_1 และ T_2 อาจหาได้ดังนี้

$$T_1 = k_2/\alpha_2 \tag{2.21}$$

$$T_2 = k_1/\alpha_1 \tag{2.22}$$

กรณีของรูปคลื่น 1.2/50 μs ค่าคงตัวจะมีค่า

$$k_1 = 0.73, \quad k_2 = 2.96$$

$$1/\alpha_1 = 68.5, \quad 1/\alpha_2 = 0.405$$

2. การคำนวณค่าองค์ประกอบวงจร การสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นใด กำหนดด้วยค่า T_1 และ T_2 ปกติเราจะเริ่มต้นมาจากค่าความจุไฟฟ้าของโหลด (C_b) ก่อนและเลือกตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) ให้สอดคล้องกับตัวเก็บประจุโหลด (C_b) กล่าวคือตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) เป็นตัวเก็บพลังงานได้มากพอที่จะจ่ายถ่ายทอดให้กับโหลด ดังนั้นเมื่อทราบค่าตัวเก็บประจุโหลด (C_b) และตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) แล้ว องค์ประกอบที่เหลือต้องคำนวณ คือ ความต้านทานปรับช่วงเวลาหน้าคลื่น (R_d) และความต้านทานปรับช่วงเวลาหลังคลื่น (R_e) ซึ่งอาจหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าคงตัวเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha_1,\alpha_2 = \sqrt{\frac{B_1}{2} \pm \left(\frac{B_1}{2}\right)^2 - B_0}$$

จะได้
$$\alpha_1 + \alpha_2 = B_1$$

$$\alpha_1 \cdot \alpha_2 = B_0$$

จากค่า B_1 และ B_0 คำนวณหาค่า R_d และ R_e ได้ตามสมการที่ 2.23 ถึงสมการที่ 2.26

<u>วงจร A</u>

$$R_e = \frac{1}{2(C_s+C_b)}\left\{\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)+\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)^2-\frac{4(C_s+C_b)}{\alpha_1\alpha_2\cdot C_b}}\right\} \tag{2.23}$$

$$R_d = \frac{1}{2C_s}\left\{\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)-\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)^2-\frac{4(C_s+C_b)}{\alpha_1\alpha_2\cdot C_b}}\right\} \tag{2.24}$$

<u>วงจร B</u>

$$R_e = \frac{1}{2(C_s+C_b)}\left\{\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)+\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)^2-\frac{4(C_s+C_b)}{\alpha_1\alpha_2\cdot C_s}}\right\} \tag{2.25}$$

$$R_d = \frac{1}{2C_b}\left\{\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)-\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)^2-\frac{4(C_s+C_b)}{\alpha_1\alpha_2\cdot C_s}}\right\} \tag{2.26}$$

3. ประสิทธิภาพของวงจร (η) เมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพของวงจรหรือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ หมายถึง อัตราส่วนค่ายอดของแรงดันที่สร้างขึ้นออกมาได้ ต่อค่าแรงดันอัดประจุปกติจะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอทั้งวงจร A หรือวงจร B

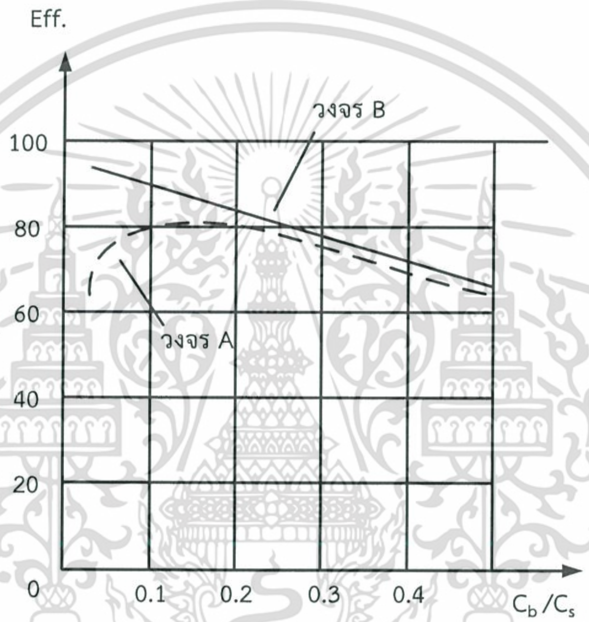
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta = U_m / U_0 < 1 \tag{2.27}$$

เมื่อ U_m คือ ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ u(t)

U_0 คือ แรงดันอัดประจุให้กับ C_s

ในกรณีแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (1.2/50 μs) ประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนระหว่าง C_b และ C_s มีค่าดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

4. การคำนวณหาค่าช่วงเวลาหน้าคลื่นและช่วงเวลาหลังคลื่น T_1 และ T_2 ในกรณีที่ทราบค่าองค์ประกอบต่างๆ ของวงจรอิมพัลส์ ถ้าจำเป็นต้องการทราบค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและช่วงหลังคลื่น อาจคำนวณค่าโดยประมาณได้จากวิธีการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ค่าองค์ประกอบเวลา T_1, T_2 และประสิทธิภาพของวงจร A และ วงจร B

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

การคำนวณที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ถือว่าวงจรที่ใช้คำนวณ ไม่มีค่าความเหนี่ยวนำในทางปฏิบัติ รูปคลื่นที่ได้มักจะแตกต่างไปจากทฤษฎี โดยเฉพาะค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและค่ายอดของแรงดัน ทั้งนี้เนื่องจากในวงจรมีความเหนี่ยวนำซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ อาจทำให้เกิดการแกว่งบริเวณยอดคลื่นขึ้นได้ ดังนั้นความต้านทานปรับหน้าคลื่น R_d ต้องมีค่ามากกว่าวิกฤตของวงจร ดังสมการที่ 2.28

$$R_d \geq k\sqrt{\frac{L(C_s+C_b)}{C_s C_b}} \quad \text{โดย } k = 2 \text{ ถึง } 4 \tag{2.28}$$

2.1.5 การวัดแรงดันอิมพัลส์ [1]

การวัดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้กันอยู่ในห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูงทั่วไปมีอยู่ 2 วิธีคือ

1. วัดด้วยแกปทรงกลม
2. วัดด้วยระบบโวลเตจดิไวเดอร์

1. การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลม หลักการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลม ก็ปฏิบัติเช่นเดียวกันกับการวัดแรงดันกระแสสลับและแรงดันกระแสตรง กล่าวคือค่าแรงดันเบรกดาวน์ของแกปทรงกลมนั้น ขึ้นอยู่กับระยะแกปของทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม และสภาวะอากาศรอบๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

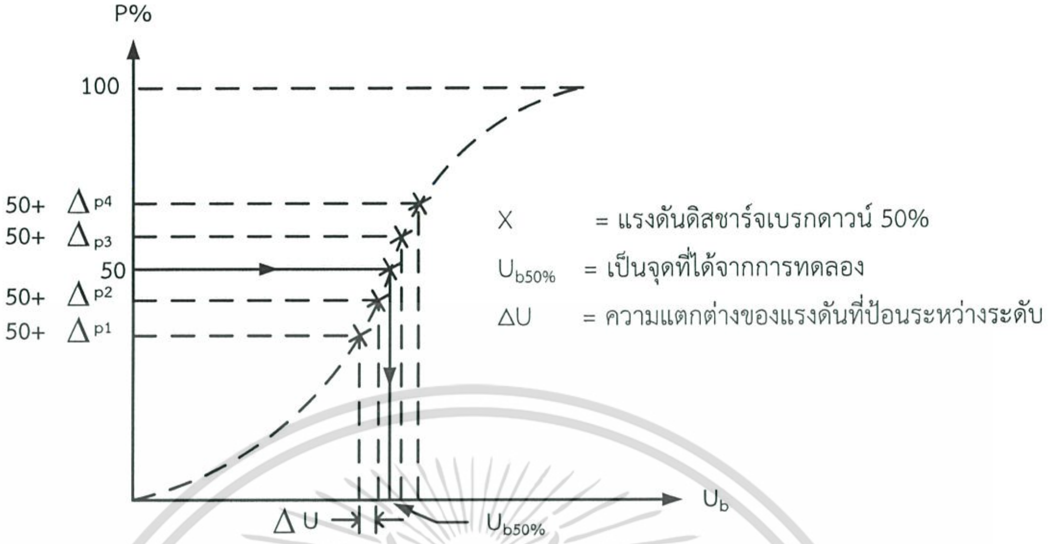
ทรงกลมการเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ในช่องแกปที่เป็นอากาศ ใช้เวลาหลักไมโครวินาที ฉะนั้นในกรณีของแรงดันกระแสสลับ ช่วงเวลาของแรงดันที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีผลนัยสำคัญต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ (U_b) เบรกดาวน์จะเกิดเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าหนึ่ง แต่ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์ ช่วงเวลาของแรงดันจะมีความสำคัญต่อการเกิดเบรกดาวน์ หรือค่าแรงดันเบรกดาวน์ ผลของเวลาดังกล่าวอาจอธิบายได้ด้วยเรื่องเวลาล่าช้า (time lag) ของการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซด้วยแรงดันอิมพัลส์

วิธีการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลม มีความแตกต่างที่สำคัญจากการวัดแรงดันกระแสตรงและแรงดันกระแสกลับ ก็คือ การวัดแรงดันอิมพัลส์นั้นไม่สามารถใช้วิธีค่อยๆ เพิ่มแรงดันสูงขึ้นจนกระทั่งการเกิดเบรกดาวน์ หากแต่ต้องใช้การอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุแรงสูงของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ให้ได้แรงดันอัดประจุตามที่ต้องการก่อน แล้วจึงปล่อยดิสชาร์จออกไปที่แกปทรงกลม ซึ่งอาจเกิดเบรกดาวน์หรือไม่เกิดก็ได้ ทั้งๆ ที่แรงดันสูงมากพอ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็น (Probability) และขนาดแรงดัน ถ้าแรงดันอัดประจุต่ำเกินไป ก็จะไม่เกิดเบรกดาวน์ที่แกปทรงกลมวัดแรงดัน แต่ถ้าแรงดันอัดประจุเพิ่มสูงขึ้นมากพอ ก็จะทำให้มีโอกาสเกิดเบรกดาวน์มากขึ้น และถ้าแรงดันอัดประจุสูงมากเกินไป ก็จะเกิดเบรกดาวน์ทุกครั้งที่คายประจุออกไป ด้วยเหตุนี้เองการวัดแรงดันอิมพัลส์จึงกำหนดเป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์ 50% คือ $U_{b50\%}$ อันหมายถึงค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ค่าปานกลาง บางทีก็เรียกว่า ค่าอิมพัลส์วิกฤต (Critical impulse) ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่ทำให้จำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวน์ที่แกปของทรงกลม เป็นจำนวนครั้งครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ดิสชาร์จออกไป ฉะนั้นการหาค่า $U_{b50\%}$ จึงหาได้โดยวิธีการคายประจุออกไปเป็นจำนวนหลายๆครั้ง จนกระทั่งจำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวน์เป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ดิสชาร์จออกไป เช่น ดิสชาร์จ 10 ครั้ง แล้วเกิดเบรกดาวน์ที่แกปทรงกลม 5 ครั้ง ค่าแรงดันนั้นก็คือ $U_{b50\%}$ แต่การที่จะอัดประจุให้ได้แรงดันอัดประจุพอดีที่จะทำให้ได้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ 50% พอดีนั้นทำได้ยากและเสียเวลา

การวัดค่าแรงดัน $U_{b50\%}$ โดยทั่วไปวัดได้ 3 วิธี คือวิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ (Multiple level voltage method) วิธีปรับขึ้นลง (Up and down method) และวิธีการเพิ่มความเครียดสนามไฟฟ้า (Progressive stress method)

- วิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ เป็นวิธีหาค่า $U_{b50\%}$ ด้วยเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเบรกดาวน์กับค่าแรงดัน ป้อนแรงดันอย่างน้อย 10 ครั้งที่แรงดันแต่ละค่า หรือแต่ละระดับต่างกัน ΔU น้อยกว่า 3% ของค่าแรงดันเบรกดาวน์ 50% ที่คาดหมายทดลองแรงดันหลายระดับที่สูงกว่า และที่ต่ำกว่าค่าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ 50% จากกราฟเส้นนี้จะหาค่าแรงดันดิสชาร์จ 50% ได้ดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 เส้นกราฟใช้หาแรงดันดิสชาร์จเบรกดาวน์ 50%

- วิธีปรับขึ้นลง เป็นวิธีหาค่าแรงดันดิสชาร์จเบรกดาวน์ 50% โดยการเริ่มต้นเลือกแรงดันค่าหนึ่ง U_k ที่คาดหมายว่าจะเป็นแรงดันเบรกดาวน์ 50% ป้อนเข้าไปที่แกปทรงกลม ถ้าหากไม่เกิดเบรกดาวน์ที่แกปทรงกลมให้เพิ่มแรงดันขึ้น ΔU ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 3% ของแรงดันดิสชาร์จ 50% จึงป้อนแรงดันใหม่ด้วยค่า $U_k + \Delta U$ แต่ถ้าเกิดเบรกดาวน์ที่แกปทรงกลมที่แรงดัน U_k ก็ให้ลดแรงดันเหลือเพียง $U_k - \Delta U$ ฉะนั้นค่าแรงที่ป้อนต่อไป จะขึ้นอยู่กับผลที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันครั้งที่ผ่านมา ปฏิบัติต่อเนื่องกันเช่นนี้จนกระทั่งมีจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันมากพอ จะหาค่าแรงดันดิสชาร์จเบรกดาวน์ 50% ได้จากสมการ

$$U_{50\%} = \frac{\sum n_v U_v}{\sum n} \tag{2.29}$$

โดยที่ n_v คือ จำนวนครั้งที่ที่ป้อนแรงดันที่ระดับแรงดัน U_v
และ $\sum n$ คือ ผลรวมจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดัน ควรจะ > 20

- วิธีการเพิ่มความเครียดสนามไฟฟ้า เป็นวิธีการหาแรงดันที่ทำให้เกิดการปล่อยประจุแบบทำลาย (Disruptive discharge) บนวัสดุทดสอบ โดยเพิ่มแรงดันทดสอบแบบต่อเนื่องหรือแบบขั้นบันได จนถึงแรงดันที่ทำให้เกิดการปล่อยประจุแบบทำลาย (U_i) หรือคงที่ระดับแรงดันไว้จนเกิดการปล่อยประจุแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

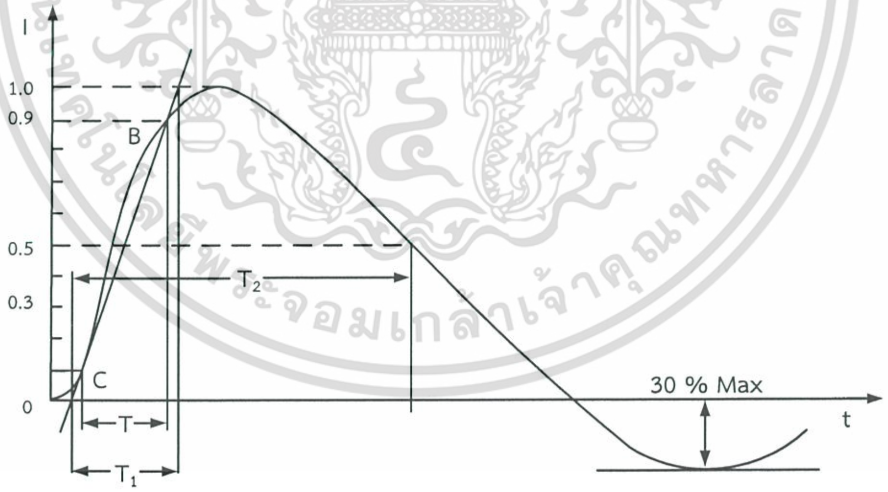
ทำลายที่เวลาหนึ่ง (t_i) ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบจะมีทั้งแรงดัน U_i หรือเวลา t_i วิธีนี้ควรทดสอบอย่างน้อย 10 ครั้ง

2. การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดิไวเดอร์ ในส่วนของขั้นตอนการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลมนั้น สามารถทราบเฉพาะค่ายอดของแรงดันเท่านั้น แต่ไม่ทราบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตามเวลา คือคุณลักษะของรูปคลื่นแรงดัน ซึ่งจำเป็นต้องทำการวัด และสามารถทำได้โดยใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) หรือเครื่องบันทึกแรงดันอิมพัลส์ ประกอบเข้ากับโวลเตจดิไวเดอร์ ถ้าแรงดันที่วัดมีค่าไม่เกิน 100 kV เทคนิคการวัดจะไม่ซับซ้อน เมื่อแรงดันเพิ่มสูงมากขึ้นเทคนิคและปัญหาการวัดก็มีมากขึ้นตามขนาดแรงดันที่วัด

2.2 ทฤษฎีการสร้างกระแสอิมพัลส์ [4]

2.2.1 ลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน

ขนาดของกระแสฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นนั้น มีขนาดตั้งแต่กิโลแอมป์ถึงร้อยกิโลแอมป์ โดยค่ากระแสเฉลี่ยประมาณ 20-30 กิโลแอมป์ ซึ่งอาจเป็นขั้วลบหรือบวกก็ได้ IEC 61000-4-5 [5] ได้กำหนดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐานโดนพยายามเลียนแบบรูปคลื่นที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติให้ใกล้เคียงที่สุด



รูปที่ 2.12 ลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.1 องค์ประกอบของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์

1. เวลาหน้าคลื่น (Front time, T_1) หมายถึงช่วงเวลาที่กระแสอิมพัลส์เริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอดของกระแสอิมพัลส์

2. เวลาหลังคลื่น (Tail time, T_2) หมายถึงช่วงเวลาตั้งแต่กระแสอิมพัลส์เริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านกระแสค่ายอดกระแสอิมพัลส์จนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดกระแสอิมพัลส์

3. ค่ายอดกระแสอิมพัลส์

4. ค่ายอดกระแสอิมพัลส์กลับขั้ว

ตารางที่ 2.3 ชนิดของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน IEC 62475 [6]

ชนิดรูปคลื่น	เวลาหน้าคลื่น (T_1) (μs)	เวลาหลังคลื่น(T_2) (μs)
1/20	1	20
8/20	8	20
10/350	10	350

2.2.1.2 ค่าวามคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน

IEC 61000-4-5 ได้กำหนดขอบเขตมาตรฐานค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ได้จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ดังนี้

1. การวัดค่าช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1) นั้นคำนวณจาก 1.25 เท่าของช่วงเวลาตั้งแต่กระแสอิมพัลส์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 10% ของค่ายอดจนถึงค่า 90% ของค่ายอดกระแสอิมพัลส์

2.การวัดค่าช่วงเวลาหลังคลื่น (T_2) คำนวณจากเวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จนถึงกระแสอิมพัลส์ลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดกระแสอิมพัลส์

3. จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแส คือจุดระหว่างแกนนอน (แกนเวลา) กับเส้นตรงที่ลากผ่านระหว่างจุด 10% ของค่ายอดกระแสอิมพัลส์ และจุด 90% ของค่ายอดกระแสที่ด้านหน้าคลื่น

2.2.1.3 ค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ขนาด 8/20 μs ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5 กำหนดดังนี้

1. ค่ายอดของกระแสอิมพัลส์ (I_m) ± 10%

2. เวลาหน้าคลื่น (T_1) ± 20%

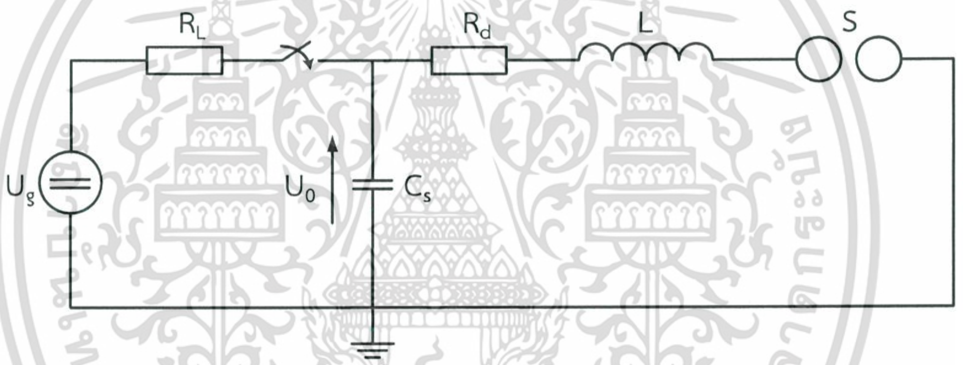
3. เวลาหลังคลื่น (T_2) ± 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์อาจเกิดการแกว่ง ซึ่งการแกว่งของรูปคลื่นของกระแสอิมพัลส์นี้เมื่อกลับเข้าสู่ศูนย์แล้ว อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางขั้วได้ โดยค่ากระแสกลับขั้วต้องมีค่าไม่เกิน 30% ของค่ายอดคลื่นกระแสอิมพัลส์

2.2.2 วงจรและหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

การสร้างกระแสอิมพัลส์นั้นอาศัยวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดกระแสตรง (DC Generator, U_s) เป็นตัวป้อนแรงดันไฟฟ้าอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ (Capacitor, C_s) ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุหลายตัวต่อกันจนกระทั่งได้แรงดันไฟฟ้าอัดประจุที่ต้องการแล้วเกิดเบรกดาวน์ที่สปาร์กแกป (Spark Gap, S) ทำให้เกิดการคายประจุไปยังตัวต้านทาน(Resistor, R) ที่มีตัวเหนี่ยวนำ (Inductor,L) เกิดเป็นรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

ความหมายในรูปวงจร

U_g	คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ (kV)
C_s	คือ ตัวเก็บประจุ (μF)
R_L	คือ ตัวต้านทานกระแสอัดประจุ (Ω)
R	คือ ตัวต้านทานสำหรับรูปคลื่น (Ω)
L	คือ ตัวเหนี่ยวนำสำหรับรูปคลื่น (μH)
S	คือ สปาร์กแกป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.1 ตัวเก็บประจุอิมพัลส (C_S)

การเลือกค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการจ่ายกระแสอิมพัลส์นั้นต้องคำนึงถึงแรงดันไฟฟ้าอัดประจุที่ต้องการใช้งานดังนั้นจึงต้องเลือกค่าตัวเก็บประจุให้สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้โดยไม่เกิดความเสียหาย

1. ช่วงการอัดประจุ

เมื่อตัวเก็บประจุได้รับแรงดันไฟฟ้าอัดประจุจากเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงก็เกิดการเก็บสะสมประจุ(Q) ขึ้นภายในตัวเก็บประจุโดยค่าของประจุที่มีการสะสมมีขนาดเท่ากับ

$$Q = CU \tag{2.30}$$

เมื่อ Q คือ ค่าพลังงานอัดประจุหน่วยเป็นคูลอมบ์ (Coulomb)

C คือ ตัวเก็บประจุหน่วยเป็นฟารัด (Farad)

U คือ แรงดันอัดประจุหน่วยเป็นโวลต์ (Volt)

เมื่อมีการอัดประจุ (Q) ผ่านตัวต้านทานจำกัดกระแส (R_L) ให้กับตัวเก็บประจุภายในเวลา (t) ย่อมได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.31

$$q(t) = CU(1-e^{\frac{-t}{RC}}) \tag{2.31}$$

สำหรับตัวต้านทานกระแสที่เพิ่มเข้ามาทำหน้าที่ควบคุมเวลาและการอัดประจุโดยมีค่าความคงที่เวลา(τ) คือเท่ากับ R_LC ซึ่งตัวเก็บประจุจะได้รับการอัดประจุจนถึงสภาวะคงตัว (Steady state) ภายในเวลาทั้งหมดประมาณ 5 เท่าหรือ 5(τ) หรือ 5 R_LC ซึ่งในช่วงเวลาที่การสะสมของประจุที่ตัวเก็บประจุย่อมเกิดการสะสมของพลังงานในรูปสนามไฟฟ้าขึ้นโดยเมื่อเราพิจารณาในแง่ของกำลัง (P_c) ที่ตัวเก็บประจุจะได้รับเป็นดังสมการที่ 2.32

จาก $$i_c(t) = \frac{dQ_{cr}}{dt} = \frac{CUe^{(\frac{-t}{R_LC})}}{R_LC}$$

และ $$U_c(t) = U(1-e^{\frac{-t}{RC}})$$

จะได้ $$P_c(t) = U_c(t)\, i_c(t)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{U^2(1-e^{(-\frac{t}{R_L C})})e^{(-\frac{t}{R_L C})}}{R} \tag{2.32}$$

โดยที่ $P_c(t)$ คือ กำลังงานที่ตัวเก็บประจุมีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt)

$U_c(t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าอัดประจุ ณ เวลา t ใดๆ มีหน่วยเป็นโวลต์ (Volt)

$i_c(t)$ คือ การอัดประจุ ณ เวลาใดๆ มีหน่วยเป็นแอมป์ (Ampere)

และพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการสร้างรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ตัวเก็บประจุสะสมไว้คือ

$$\text{Energy} = \int_0^t P_c(t)dt = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}QU \tag{2.33}$$

$$\text{Loss} = I^2R = \frac{U^2}{R} \tag{2.34}$$

เมื่อเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จ่ายแรงดันไฟฟ้าผ่านตัวต้านทานจำกัดกระแสย่อมเกิดค่าความสูญเสียขึ้น (Loss) ดังสมการ (2.34) เนื่องจากกระแสที่จ่ายมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยตัวต้านทานจำกัดกระแสทำหน้าที่ควบคุมปริมาณกระแสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (หรือเป็นการควบคุมเวลาในการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุนั่นเอง) ซึ่งจะเกิดค่าความสูญเสียขึ้นในรูปของความร้อน

2. ช่วงคายประจุ

เมื่อมีการสะสมประจุของตัวเก็บประจุ ทำให้เกิดการสะสมของพลังงานมากขึ้นจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่สภาวะคงตัว (แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ ย่อมเท่ากับ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนจากเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) พลังงานที่สะสมไว้นี้ จะถูกส่งผ่านมาที่อิเล็กโตรดทรงกลมซึ่งทำหน้าที่เหมือนสวิตช์ โดยที่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างขั้วอิเล็กโตรดทั้งสองมีค่าเท่ากับเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เราจึงใช้หลักการนี้ในการควบคุมอิเล็กโตรดให้ทำงานเหมือนสวิตช์ คือออกแบบอิเล็กโตรดเบรกดาวน์ (Break down) ภายใต้แรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงกับค่าแรงดันไฟฟ้าอัดประจุ โดยการเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรดทรงกลมย่อมส่งผลให้ตัวเก็บประจุคายพลังงานในรูปของประจุเปลี่ยนแปลงตามเวลาผ่านไปยังตัวเหนี่ยวนำ โดยตัวเหนี่ยวนำได้เก็บพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็กเมื่อสะสมพลังงานเต็มที่แล้วจะเกิดการถ่ายเทพลังงานกลับไปยังตัวเก็บประจุใหม่ การถ่ายเทพลังงานกลับไปกลับมาระหว่างตัวเก็บประจุกับตัวเหนี่ยวนำนั้นทำให้เกิดการแกว่งของรูปคลื่นกระแส โดยมีอัตราการเพิ่มค่ายอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

di/dt = e/L ซึ่งในขณะที่รูปคลื่นกระแสเกิดการแกว่ง ตัวต้านทานภายในวงจรย่อมทำการหน่วงรูปคลื่นกระแสเพื่อลดการแกว่งที่เกิดขึ้น โดยพลังงานที่ตัวเก็บประจุส่งผ่านไปยัง R และ L คือ

$$W_c = \int_0^t i^2 R dt = \frac{1}{2} i^2 R^2 C = \frac{1}{2} C U^2 \qquad (2.35)$$

ส่วนพลังงานที่ตัวเหนี่ยวนำสะสมจะอยู่ในรูปของสนามแม่เหล็กชั่วขณะ(Transient magnetic field) มีค่าเท่ากับ

$$W_L = \frac{1}{2} L i^2 \qquad (2.36)$$

2.2.2.2 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L)

ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมีการกำหนดจำนวนครั้งการคายประจุ เพราะการใช้เครื่องมือให้คายประจุด้วยอัตราเร็วเกินไป ย่อมทำให้เกิดผลเสียต่อองค์ประกอบต่างๆ เช่น ไดโอดแรงสูง ตัวเก็บประจุ เพราะการคายประจุเป็นสภาวะชั่วครู่ มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าและกระแสอย่างรวดเร็ว นั่นคือการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีผลต่อการอฉนวนขององค์ประกอบเครื่องกำเนิดในด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าหรือความเครียดสนามไฟฟ้า จึงทำให้อายุการใช้งานขององค์ประกอบสั้นลง ถ้าหากมีการคายประจุอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการเว้นช่วง ซึ่งการคายประจุก็หมายถึงการอัดประจุด้วยเช่นกัน การจำกัดอัตราการอัดประจุทำได้โดยใช้ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L) ซึ่งต่ออนุกรมคั่นอยู่ระหว่างตัวจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงกระแสตรงกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_S) ให้มีค่าสูงมากพอ เพื่อให้ได้กระแสอัดประจุที่มีค่าต่ำ กล่าวคือไม่เกินพิกัดกระแสของตัวจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงกระแสตรง (i_o) ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราเพิ่มแรงดันอัดประจุ du/dt ไม่ควรเร็วเกินไป ค่ากระแสอัดประจุจึงเขียนได้ว่า $i = C \cdot du/dt$ ฉะนั้นค่าความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L) หาได้จากสมการที่

$$R_L \geq \frac{U}{i} \qquad (2.37)$$

นอกจากนี้ต้องสามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าอัดประจุของตัวเก็บประจุได้ เพราะความต้านทาน R_L นั้นต้องรับแรงดันไฟฟ้าเท่าแรงดันไฟฟ้าอัดประจุที่กำหนดเมื่อตัวเก็บประจุอัดประจุเต็มแล้ว นอกจากต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกค่าความต้านทานและแรงดันไฟฟ้าแล้วยังต้องคำนึงถึงค่ากำลังไฟฟ้าของการอัดประจุอีกด้วย กล่าวคือ ความต้านทาน R_L ต้องทนต่อกระแสอัดประจุได้สูงสุด

2.2.2.3 ตัวต้านทานปรับรูปคลื่น

ความต้านทานปรับรูปคลื่นจะต้องสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ รับพลังงานดีสชาร์จทรานเซียนต์ที่เกิดในเวลาสั้นๆ ได้ โดยไม่ทำให้อุณหภูมิสูงเกินไป โดยทั่วไปมักจะใช้ความต้านทานที่สร้างจากลวดความต้านทาน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมการของพลังงานที่ผ่านความต้านทาน ดังสมการที่ 2.9

2.2.2.4 เทคนิคการพันตัวต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำ

ความเหนี่ยวนำ นิยาม คือ "อัตราส่วนของค่าการเชื่อมโยงฟลักซ์ (flux linkage) ผลรวมต่อกระแส I ที่คล้องเกี่ยวกับฟลักซ์ในตัวเหนี่ยวนำ" ซึ่งเมื่อเขียนเป็นสูตรก็คือ ϕ

$$L = \frac{\phi}{I} \tag{2.38}$$

ค่าการเชื่อมโยงฟลักซ์ จะมีค่าแตกต่างกันออกไป ตามลักษณะของตัวเหนี่ยวนำในกรณี ขดลวดซึ่งมีจำนวนรอบของวงเส้นลวดเป็น N และมีฟลักซ์แม่เหล็ก ϕ ผ่านวงของขดลวด ค่าการเชื่อมโยงฟลักซ์เป็น

$$\phi = N\lambda \tag{2.39}$$

สนามแม่เหล็กของตัวเหนี่ยวนำในขณะที่มีกระแส I ไหลผ่านมีค่าเป็น

$$W = \frac{1}{2}Li^2 \tag{2.40}$$

จากสมการข้างบนนี้ให้สูตรสำหรับคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ L ได้คือ

$$L = \frac{2W}{I^2} \tag{2.41}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าความเหนี่ยวนำที่เป็นขดลวดนี้เราสามารถหาความเหนี่ยวนำได้ง่าย คือ

$$L = \frac{\mu N^2 \pi A^2}{\lambda} \tag{2.42}$$

μ คือ Permeability ของขดลวดความต้านทาน (H/m)

λ คือ ความยาวของลวด (m)

A คือ รัศมีของพื้นที่หน้าตัดทรงกระบอกขดลวด (m)

N คือ จำนวนรอบขดลวด

2.2.3 การวัดกระแสอิมพัลส์

2.2.3.1 มาตรฐานของระบบการวัดกระแสอิมพัลส์

1. ความผิดพลาดในการวัดค่ายอดคลื่นกระแสไม่เกิน ± 3%

2. ความผิดพลาดในการวัดค่าทางเวลาซึ่งเป็นตัวกำหนดลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ไม่เกิน ± 10%

การวัดกระแสสูงที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างรวดเร็วสามารถใช้เครื่องมือวัดต่างๆ ดังต่อไปนี้

- อุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานบริสุทธิ์หรือชันท์
- หม้อแปลงกระแส
- อุปกรณ์ที่ใช้หลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์
- อุปกรณ์ที่ใช้หลักการของ Magneto-optic

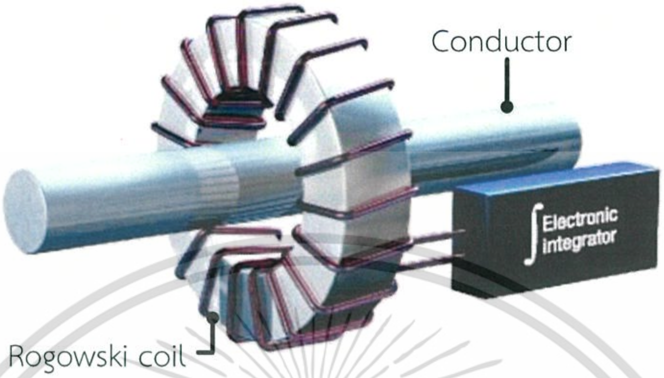
ซึ่งในโครงงานนี้เลือกใช้โรกอฟสกีคอยล์เป็นอุปกรณ์วัดกระแสที่ได้จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ที่ทำการออกแบบไว้

2.2.3.2 หลักการของโรกอฟสกีคอยล์

โรกอฟสกีคอยล์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดกระแส ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งสร้างเส้นแรงแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กคล้องผ่านขดลวดที่พันรอบแกนที่ไม่เป็นแม่เหล็กของขดลวดโรกอฟสกี ผลจากสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปตามเวลาย่อมไปคาบเกี่ยวหรือคล้อง (Link) กับขดลวดที่วางอยู่เป็นวงกลมรอบตัวนำและเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ปลายของขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวไปผ่านตัวอินทิเกรทที่เหมาะสมทำให้ได้รูปคลื่นกระแสที่วัดได้อย่างถูกต้องดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การวัดกระแสด้วยโรกอฟสกีคอยล์

หลักการวัดกระแสของโรกอฟสกีคอยล์โดยมีขดลวด n รอบต่อเมตรและพื้นที่หน้าตัด A วางอยู่ล้อมรอบตัวนำที่มีกระแส I_p ผ่าน เมื่อพิจารณาในช่วงความยาว dl เป็น $d\phi$ ซึ่ง

$$d\phi = \mu_0 nAdi_p \tag{2.43}$$

และเมื่ออินทริเกรทรอบขดลวดย่อมได้เส้นแรงแม่เหล็กที่มาคล้องขดลวดทั้งหมด

$$\phi = \int d\phi = \mu_0 nA \int H\cos(\alpha)\, dl \tag{2.44}$$

จากกฎของแอมแปร์

$$\oint H\cos(\alpha)\, dl = i_p \tag{2.45}$$

แทน (2.45) ลงใน (2.44) จะได้

$$\phi = \mu_0 nAi_p \tag{2.46}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎของฟาราเดย์

$$M = \mu_0 nA$$

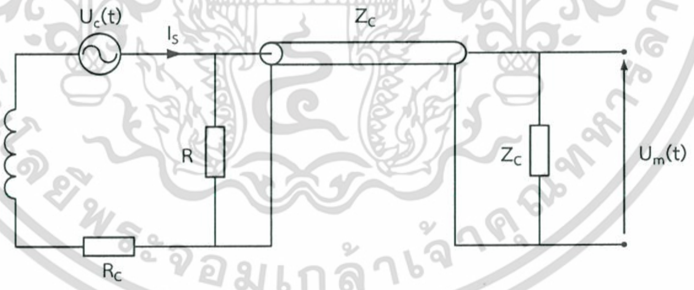
M (μH) คือค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance)

$$U_c = \frac{d\phi}{dt} = \mu_0 nA\frac{di_p}{dt} = M\frac{di_p}{dt} \tag{2.47}$$

จากสมการที่ (2.46) เห็นได้ว่าการวัดกระแสอิมพัลส์ของโรกอฟสกีคอยล์นั้น ต้องทำการอินทิเกรทแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขดลวดซึ่งการอินทิเกรทที่ใช้สำหรับโรกอฟสกีคอยล์ที่สร้างขึ้นเป็นแบบพาสซีฟ ชนิด Self Integrator

2.2.3.3 หลักการทำงานของโรกอฟสกีคอยล์แบบพาสซีฟ ชนิด Self Integrator

วงจร Self Integratorคือวงจรที่ต่อขาออกที่โรกอฟสกีคอยล์ด้วยความต้านทานค่าต่ำดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 โรกอฟสกีคอยล์ชนิด Self integrator

U_c คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Volt)

L_c คือ ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอฟสกี (Henry)

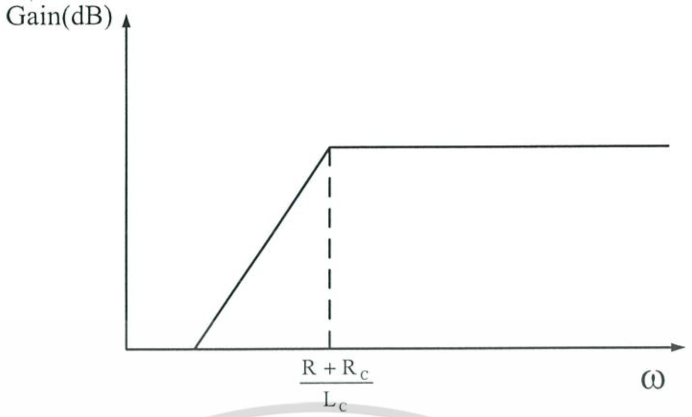
R_c คือ ความต้านทานของขดลวดโรกอฟสกี (Ohm)

R คือ ความต้านทานโหลด (Ohm)

Z_c คือ เสิร์จอิมพิแดนซ์ของสายวัดและแมชชิ่งอิมพิแดนซ์ (Ohm)

U_m คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ (Volt)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ผลตอบสนองทางความถี่ของโรกอฟสกีคอยล์ชนิด Self integrator

จากรูปที่ 2.15 สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันไฟฟ้าดังนี้

$$U_c = M\frac{di_p(t)}{dt} = L_c\frac{di_c(t)}{dt} + i_s(t)[R_c + R] \qquad (2.48)$$

เนื่องจาก $L_c\frac{di_c(t)}{dt} \gg i_s(t)\,[R_c + R]$

$$U_c = L_c\frac{di_s(t)}{dt} \qquad (2.49)$$

ทำการอินทิเกรทได้กระแสในขดลวด

$$I_s(t) = \frac{1}{L_c\int U_c(t)\,dt} \qquad (2.50)$$

และแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้

$$U_m = i_s(t)R \qquad (2.51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทน i_s จาก (2.51) ลงใน (2.50)

$$U_m(t) = \frac{R}{L_c \int U_c(t)\,dt} \tag{2.52}$$

แทน U_C จาก (2.47) ลงใน (2.52)

$$U_m = \frac{R}{L_c} M\, i_p(t) \tag{2.53}$$

จากสมการที่ (2.53) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้กับกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการวัดซึ่งใช้ในการออกแบบโครงสร้างโรกอฟสกีคอยล์ต่อไปนอกจากขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้แล้วยังต้องคำนึงถึงผลตอบสนองความถี่ของวงจรด้วยจากสมการที่ (2.48) ทำการแปลงลาปลาซ

$$M_s I_p(s) = I_s(s)[sL_c + R + R_c] \tag{2.54}$$

จัดรูปใหม่ได้

$$\frac{I_s(s)}{I_p(s)} = \frac{M_s}{sL_c + R + R_c} \tag{2.55}$$

จาก $U_m(s) = i_S(s)\,R$ จะได้

$$\frac{U_m(s)}{I_p(s)} = \frac{RM_s}{(R + R_c + sL_c)}$$

$$\frac{U_m(s)}{I_p(s)} = \frac{\left(\frac{RM}{L_c}\right)s}{s + \frac{(R + R_c)}{L_c}} \tag{2.56}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.56) สามารถเขียนผลตอบสนองความถี่ของวงจร Self integrator ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่านดังรูปที่ 2.16 ที่มีความถี่หักมุม

$$\omega = \frac{(R+R_c)}{L_c} \quad (2.57)$$

2.3 ทฤษฎีวงจรกรองความถี่

2.3.1 วงจรคัปปลิ้งและดีคัปปลิ้ง [7]

ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5 ได้กำหนดค่าของวงจรคัปปลิ้งและดีคัปปลิ้ง สำหรับวงจรคัปปลิ้งนั้นจะเป็นตัวเก็บประจุโดยค่าตัวเก็บประจุนั้นจะขึ้นกับรูปแบบการทดสอบด้วย ซึ่งในการทดสอบแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีนอร์มัล (Normal Mode) และกรณีคอมมัล (Common Mode)

คัปปลิ้งคาปาซิเตอร์	9 μF หรือ 18 μF (ดังรูปที่ 2.17 และ 2.18)
ค่าความเหนี่ยวนำดีคัปปลิ้ง	1.5 mH

โดยค่าแรงดันเกินจะสามารถผ่านเข้าไปสู่แหล่งจ่ายได้ไม่เกิน 15% ของค่าสูงสุดของแรงดันทดสอบขณะไม่ได้ต่ออุปกรณ์ทดสอบและแหล่งจ่ายไฟ หรือไม่เกินสองเท่าของค่าสูงสุดของแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ โดยให้ถือค่าที่สูงกว่าเป็นเกณฑ์ (ในกรณีทดสอบอิมพัลส์ 10 kV ที่ 220 Vac จะต้องไม่เกิน 1500 V แต่ถ้าทดสอบที่ 3 kV จะต้องไม่เกิน 620 V)

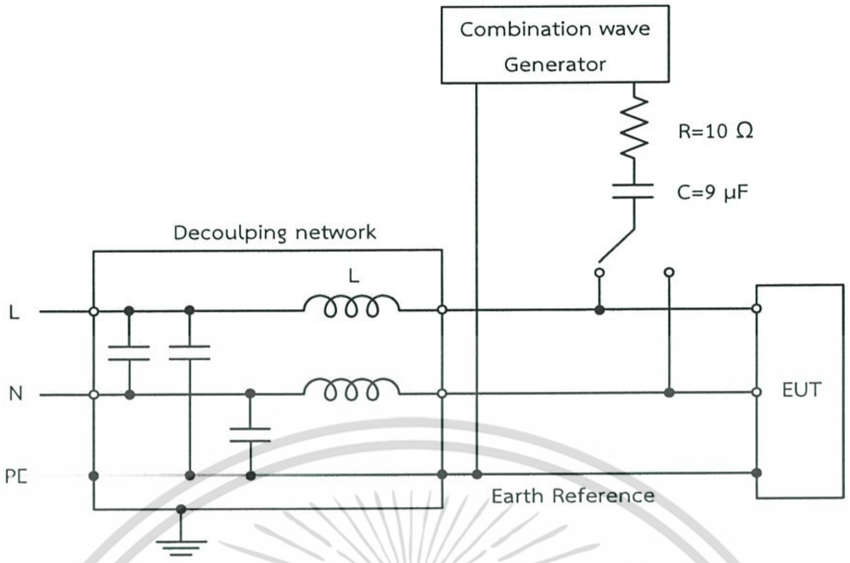
2.3.2 วิธีการทดสอบอุปกรณ์ทดสอบ

การทดสอบตามมาตรฐาน IEC นั้นแบ่งออกเป็นหลายกรณี ในโครงงานนี้จะสนใจเพียงการทดสอบแบบป้อนแรงดันเกินเข้าระหว่างแหล่งจ่ายกับอุปกรณ์ทดสอบ (Tests applied to EUT power supply) ซึ่งได้แบ่งเป็น 2 กรณีคือ กรณีคอมมัล (Common Mode/Line to Earth) และกรณีนอร์มัล (Normal Mode/Line to Line)

1. กรณีคอมมัล (Common Mode)

ในกรณีคอมมัลจะทดสอบอิมพัลส์ระหว่างสายไฟกับสายดิน และสายนิวทรอลกับสายดิน ในกรณีนี้อิมพีแดนซ์จะเป็น 12 Ω เนื่องจากมีตัวต้านทานขนาด 10 Ω ต่ออนุกรมอยู่

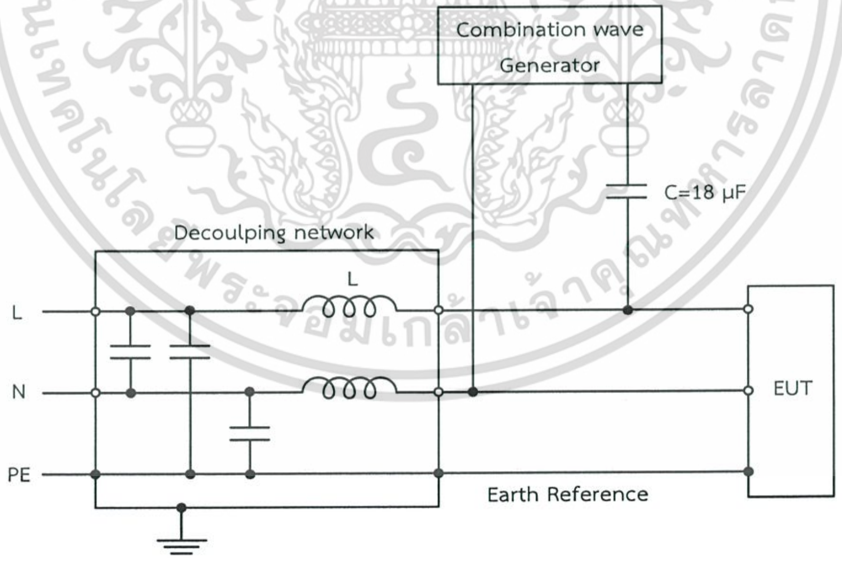
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 วงจรทดสอบในกรณีคอมมัล

2. กรณีนอร์มัล (Normal Mode)

ในกรณีนอร์มัลนี้จะทดสอบระหว่างสายไฟกับสายนิวทรอล จะสังเกตว่าขั้วขาออกของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมนี้จะไม่มีขั้วใดต่อลงดินเลย



รูปที่ 2.18 วงจรทดสอบในกรณีนอร์มัล

ในการทดสอบนั้นสายไฟระหว่างอุปกรณ์ทดสอบและวงจรคัปปลิ้ง วงจรดีคัปปลิ้งไม่ควรยาวเกิน 2 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน

ชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานทำหน้าที่ควบคุมการจุดชนวนของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ โดยทำให้เกิดการเบรกดาวน์ที่สปาร์กแกปคู่แรกของเครื่องกำเนิด ซึ่งการเกิดเบรกดาวน์นี้จะทำหน้าที่เปรียบเสมือนสวิตซ์ที่จะปิดวงจรทำให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) คายประจุ และประกอบไปด้วยวงจรต่างๆดังนี้

2.4.1 วงจรทวีแรงดัน [8]

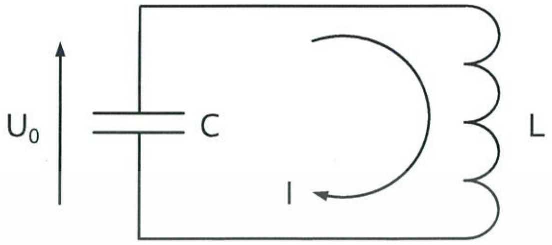
วงจรทวีแรงดัน คือ วงจรไฟฟ้าที่แปลงแรงดันต่ำกระแสสลับเป็นแรงดันสูงกระแสตรง ซึ่งจะจ่ายกระแสได้น้อยลง โดยทั่วไปในวงจรจะประกอบด้วยตัวเก็บประจุและไดโอด วงจรทวีแรงดันจะเพิ่มแรงดันด้านขาออกเป็นแรงดันสูงกระแสตรงตามจำนวนเท่าของการทวีของวงจรทวีแรงดัน โดยคิดจากค่ายอดของแรงดันกระแสสลับด้านขาเข้า หากต้องการให้มีการทวีแรงดันเป็นกี่เท่า ก็สามารถทำได้โดย การเพิ่มส่วนทวีแรงดันสองเท่า ครึ่งส่วน หรือเต็มส่วนอย่างเหมาะสม เช่น หากต้องการสร้างวงจรทวีแรงดันเจ็ดเท่า ก็สามารถทำได้โดยนำวงจร ทวีแรงดันสองเท่าแบบเต็มส่วนสามวงจร สิ่งที่จะต้อง คำนึงในการใช้งานก็คือ ไดโอดและ ตัวเก็บประจุทุกตัวในวงจร จะต้องสามารถทนแรงดันได้อย่างน้อยที่สุดสองเท่า ของแรงดันสูงสุดของสัญญาณขาเข้า หากต้องการให้แรงดันขาออกเป็นไฟลบ สามารถทำได้โดยการกลับขั้วของไดโอดและตัวเก็บประจุทุกตัวในวงจร

2.4.2 วงจรตัวเก็บประจุ – ตัวเหนี่ยวนำ

วงจรตัวเก็บประจุ – ตัวเหนี่ยวนำ (LC circuit) เป็นวงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ โดยวงจรตัวเก็บประจุ – ตัวเหนี่ยวนำอันดับที่สอง (Second order LC circuit) จะประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำหนึ่งตัว แทนด้วยตัวอักษร L และตัวเก็บประจุหนึ่งตัว แทนด้วยตัวอักษร C ซึ่งเป็นชนิดที่ง่ายที่สุดของวงจรตัวเก็บประจุ – ตัวเหนี่ยวนำ วงจรตัวเก็บประจุ – ตัวเหนี่ยวนำสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าที่มีการแกว่งที่ความถี่เรโซแนนซ์ ตัวเก็บประจุจะเก็บพลังงานในรูปของสนามไฟฟ้า (E) เอาไว้ระหว่างแผ่นเพลท ซึ่งจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำจะเก็บพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็ก (B) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ เมื่อตัวเก็บประจุที่ผ่านการอัดประจุแล้วต่ออยู่กับตัวเหนี่ยวนำ ประจุที่ถูกอัดไว้ในตัวเก็บประจุจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดเป็นสนามแม่เหล็กรอบๆ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุอยู่จะลดลง จนเมื่อประจุที่ถูกเก็บอยู่ในตัวเก็บประจุถูกถ่ายเทออกไปจนหมด แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุอยู่จะเท่ากับศูนย์ อย่างไรก็ตามกระแสจะยังคงไหลอยู่อย่างต่อเนื่อง อันเป็นผลมาจากการที่ตัวเหนี่ยวนำจะทำให้กระแสไม่ลดลงอย่างทันทีทันใด พลังงานจะยังคงไหลออกจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะเริ่มลดลง กระแสจะเริ่มชาร์จประจุให้กับตัวเก็บประจุด้วยแรงดันที่มีขั้วตรงข้ามกับในตอนแรก เมื่อสนามแม่เหล็กหมดลงอย่างสมบูรณ์กระแสก็จะหยุดไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

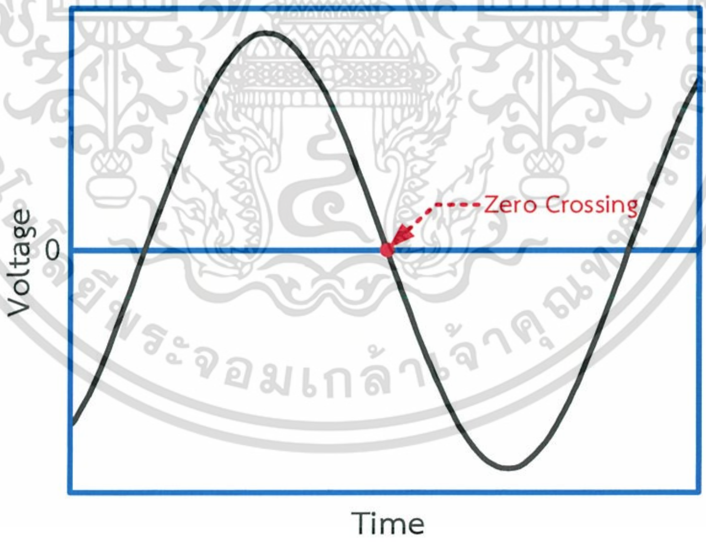
ประจุจะถูกเก็บไว้ในตัวเก็บประจุที่มีขั้วตรงข้ามกับก่อนหน้านี้ จากนั้นรอบของการถ่ายเทพลังงานจะเริ่มขึ้นอีกครั้งพร้อมกับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในทิศทางตรงกันข้าม



รูปที่ 2.19 วงจรวงจรตัวเก็บประจุ – ตัวเหนี่ยวนำ

2.4.3 การตรวจจับผ่านศูนย์

ในแรงดันกระแสสลับ จุดผ่านศูนย์คือจุดใดๆ ที่ไม่มีแรงดันอยู่ โดยใน 1 รอบของรูปคลื่นไซน์ จะมีจุดผ่านศูนย์อยู่ทั้งหมด 2 ครั้ง ซึ่งจุดผ่านศูนย์เป็นสิ่งสำคัญในระบบที่มีการส่งข้อมูลดิจิตอลผ่านวงจรแรงดันกระแสสลับ เช่น โมเด็ม, ระบบควบคุมบ้านอัตโนมัติ



รูปที่ 2.20 จุดผ่านศูนย์ของแรงดันกระแสสลับ

เนื่องจากการที่จะทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถสั่งการส่งสัญญาณกระตุ้นการทำงานให้กับเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยสามารถเลือกมุมจุดชนวนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นจำเป็นจะต้องมีการอ้างอิงมุมของแรงดันกระแสสลับ 220 V ซึ่งมุมที่นำมาทำการอ้างอิงนั้นเป็นมุม 0 องศา และ 180 องศา จึงได้มีการนำวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero-crossing) มาทำการตรวจจับเพื่อเป็นตัวอ้างอิงให้กับชุดไมโครคอนโทรลเลอร์โดยเมื่อรูปคลื่นแรงดันกระแสสลับ 220 V อยู่ที่มุม 0 องศาจะทำให้ตัวตรวจจับสร้างสัญญาณพัลส์ขึ้นมาและเมื่ออยู่ที่มุม 180 องศาตัวตรวจจับก็จะสร้างสัญญาณพัลส์ขึ้นมาเช่นกันทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทราบว่าขณะนี้แรงดันกระแสสลับอยู่ที่มุมที่เท่าใด

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

3.1 การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมให้ได้คุณลักษณะของรูปคลื่นเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5 [5] ซึ่งแสดงตามตารางที่ 3.1 นั้นจำเป็นต้องกำหนดค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าภายในวงจรให้มีความเหมาะสม ซึ่งวิธีหนึ่งที่มีความสะดวกและให้ผลแม่นยำคือการจำลองแบบวงจรไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ATP/EMTP โดยในการจำลองกำหนดเงื่อนไขออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกเป็นการจำลองเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมในขณะเปิดวงจรเพื่อสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (1.2/50 μs) และในกรณีที่สองเป็นการจำลองเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมในขณะลัดวงจรเพื่อสร้างกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า (8/20 μs) โดยกระแสอิมพัลส์จำเป็นต้องมีขนาดครึ่งหนึ่งของแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นในกรณีแรก เมื่อทำการกำหนดแรงดันอัดประจุให้มีค่าเท่ากันทั้งสองกรณี

ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะทางเวลา T_1, T_2 ของรูปคลื่นแรงดันและกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5

ประเภทของรูปคลื่น	T_1 (μs)	T_2 (μs)
แรงดันอิมพัลส์	1.2 ± 30 %	50 ± 20 %
กระแสอิมพัลส์	8 ± 20 %	20 ± 20 %

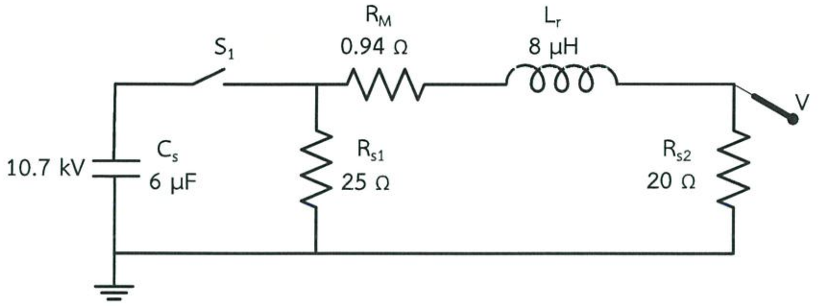
3.1.1 การจำลองเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมขณะเปิดวงจร

องค์ประกอบทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดที่ออกแบบสร้างประกอบด้วย

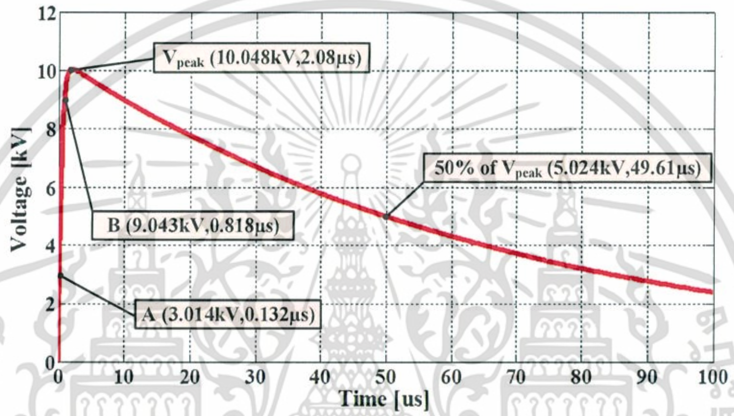
- ตัวเก็บประจุ C_s มีขนาดพิกัดแรงดัน 75 kV มีค่าความเก็บประจุ 6 μF
- ตัวต้านทาน R_M มีขนาด 0.94 Ω
- ตัวต้านทาน R_1 มีขนาด 25 Ω
- ตัวต้านทาน R_2 มีขนาด 20 Ω
- ตัวเหนี่ยวนำ L_r มีขนาด 8 μH

วงจรสมมูลจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมขณะเปิดวงจร แสดงดังรูปที่ 3.1 และผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยกำหนดให้แรงดันอัดประจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) มีค่า 10.7 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลจำลองวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (ขณะเปิดวงจร)



รูปที่ 3.2 ผลการจำลองวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

จากรูปที่ 3.2 $V_{peak} = 10.048$ kV

90 % ของแรงดันค่ายอด $V_{90\%} = 10.048 \times 0.9$

$= 9.043$ kV

ที่เวลา 0.818 μs (T_B)

30 % ของแรงดันค่ายอด $V_{30\%} = 10.048 \times 0.3$

$= 3.014$ kV

ที่เวลา 0.132 μs (T_A)

จาก $T = T_B - T_A$

T_A = เวลาที่จุด A , T_B = เวลาที่จุด B

$T = 0.818 - 0.132$

$T = 0.686$ μs

จาก $$T_1 = \frac{T}{0.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{0.686}{0.6}$$

T_1 = 1.14 μs

มาตรฐาน IEC 61000-4-5 กำหนดให้เวลาช่วงหน้าคลื่นอยู่ในช่วง 0.84 – 1.56 μs

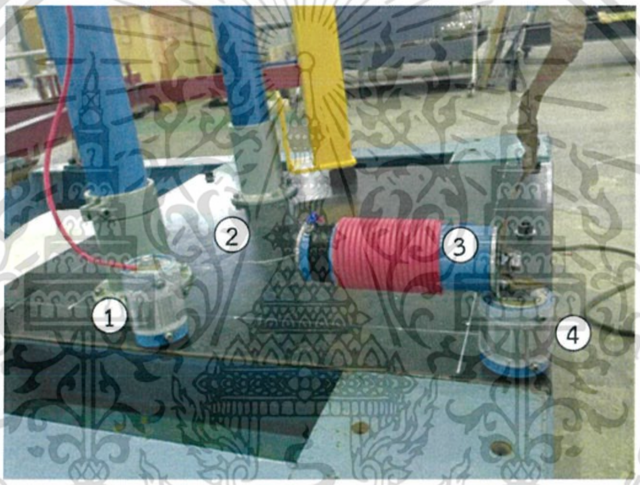
จาก T_2 = 50 μs ± 20 %

50 % ของแรงดันค่ายอด $V_{50\%}$ = 10.048 x 0.5

= 5.024 kV

ที่เวลา 49.61 μs T_2 = 49.61 μs

มาตรฐาน IEC 61000-4-5 กำหนดให้เวลาช่วงหลังคลื่นอยู่ในช่วง 40 – 60 μs



รูปที่ 3.3 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (ขณะเปิดวงจร)

1) ตัวต้านทาน R_{S1} 2) ตัวต้านทาน R_M 3) ตัวเหนี่ยวนำ L_r 4) ตัวต้านทาน R_{S2}

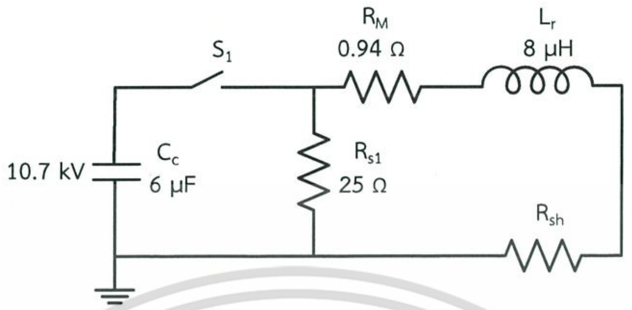
3.1.2 การจำลองเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมขณะลัดวงจร

ชุดสร้างกระแสอิมพัลส์ที่ออกแบบสร้างประกอบด้วย

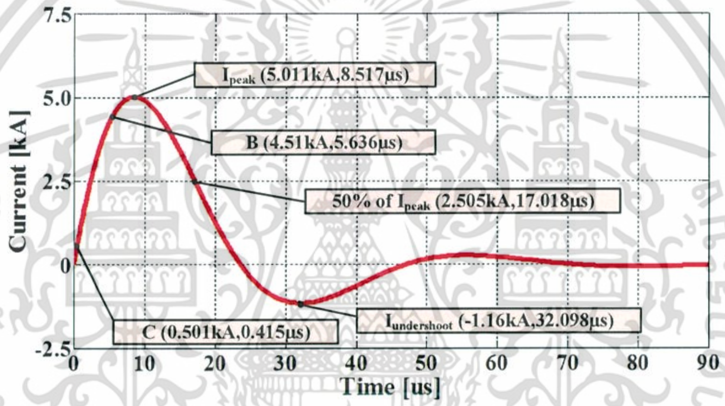
- ตัวเก็บประจุ C_s มีขนาดพิกัดแรงดัน 75 kV มีค่าความเก็บประจุ 6 μF
- ความต้านทาน R_M มีขนาด 0.94 Ω
- ความต้านทาน R_1 มีขนาด 25 Ω
- ความต้านทาน R_2 มีขนาด 20 Ω
- ตัวเหนี่ยวนำ L_r มีขนาด 8 μH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรสมมูลจำลองการทำงานของชุดสร้างกระแสอิมพัลส์แสดงดังรูปที่ 3.4 และผลการจำลองแสดงดัง รูปที่ 3.5 โดยกำหนดให้แรงดันอัดประจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) มีค่า 10.7 kV



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลจำลองวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ (ขณะลัดวงจร)



รูปที่ 3.5 ผลการจำลองวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์

จากรูปที่ 3.4 Overshoot = 5.011 kA

Undershoot = 1.160 kA

คำนวณหา % Undershoot

$$\frac{\text{Undershoot}}{\text{Overshoot}} \times 100\% = \frac{1.160}{5.011} \times 100\%$$

$$= 0.2315 \times 100$$

$$= 23.15\ \%$$

มาตรฐาน IEC 61000-4-5 กำหนดให้ค่า Undershoot ≤ 30 % ของค่ายอด

จากรูปที่ 3.5 I_{peak} = 5.011 kA

90 % ของกระแสค่ายอด $I_{90\%}$ = 5.011 x 0.9

= 4.51 kA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เวลา 5.636 μs (T_B)

10 % ของกระแสค่ายอด $I_{10\%} = 5.011 \times 0.1$

$= 0.501$ kA

ที่เวลา 0.415 μs (T_C)

จาก $T = T_B - T_C$

T_B = เวลาที่จุด B , T_C = เวลาที่จุด C

$T = 5.636 - 0.415$

$T = 5.221$ μs

จาก $T_1 = 1.25 \times T$

$= 1.25 \times 5.221$

$T_1 = 6.526$ μs

มาตรฐาน IEC 61000-4-5 กำหนดให้เวลาช่วงหน้าคลื่นอยู่ในช่วง 6.4 – 9.6 μs

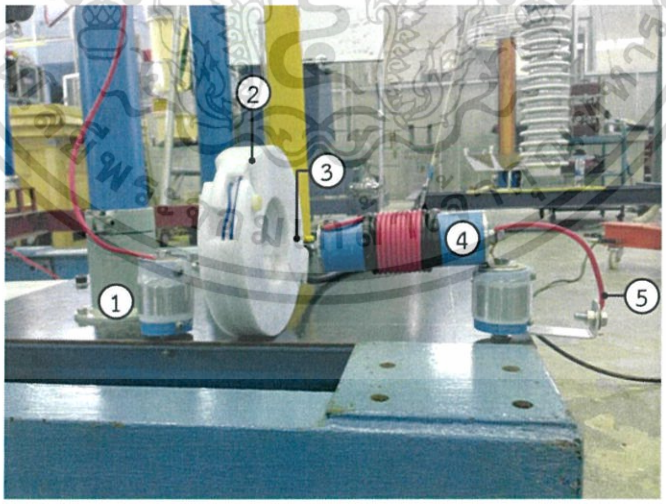
จาก $T_2 = 20$ μs ± 20 %

50 % ของกระแสค่ายอด $I_{50\%} = 5.011 \times 0.5$

$= 2.505$ kA

ที่เวลา 17.013 μs $T_2 = 17.013$ μs

มาตรฐาน IEC 61000-4-5 กำหนดให้เวลาช่วงหลังคลื่นอยู่ในช่วง 16 – 24 μs



รูปที่ 3.6 วงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ (ขณะลัดวงจร)

1) ตัวต้านทาน R_{S1} 2) ตัววัดกระแส โรกอฟสกีคอยล์ 3) ตัวต้านทาน R_M

4) ตัวเหนี่ยวนำ L_r 5) ตัวนำลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

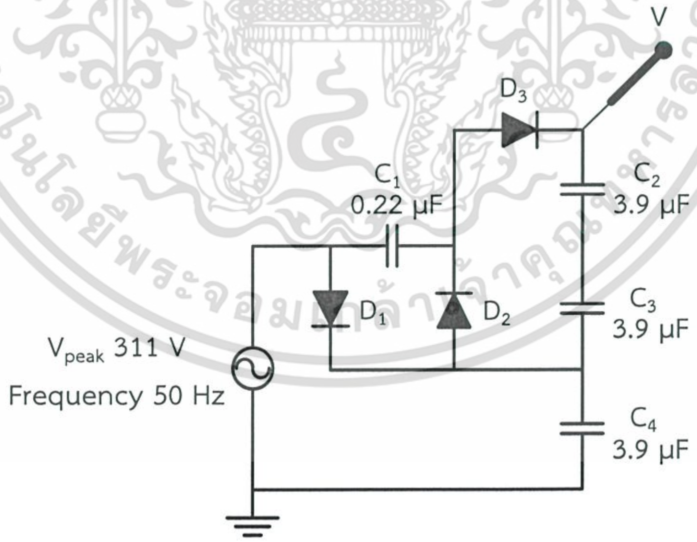
3.2 การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน (Trigatron)

การทดสอบวัสดุทดสอบในบางรายการจำเป็นต้องทำการทดสอบที่มากกว่าหนึ่งครั้ง และในทุกครั้งของการทดสอบต้องมีขนาดของค่ายอดที่ใกล้เคียงกันไม่เกินตามมาตรฐานกำหนด ดังนั้นรูปคลื่นอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมจึงต้องสามารถกำหนดขนาดค่ายอดที่ใช้ในการทดสอบได้ ซึ่งจะพบว่าการสร้างสัญญาณอิมพัลส์ให้ได้ขนาดตามที่ต้องการนั้นมีข้อจำกัดที่เกิดจากปัจจัยภายนอก อาทิ อุณหภูมิขณะทำการทดสอบ ความชื้นขณะทำการทดสอบ ฯลฯ จากปัจจัยที่เป็นปัญหาข้างต้นชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้น (Trigatron) จึงถูกนำมาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว

ชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม ที่ได้ทำการออกแบบประกอบด้วย 3 วงจรหลัก คือ วงจรทวีแรงดัน วงจรกำเนิดแรงดันสูง และวงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์

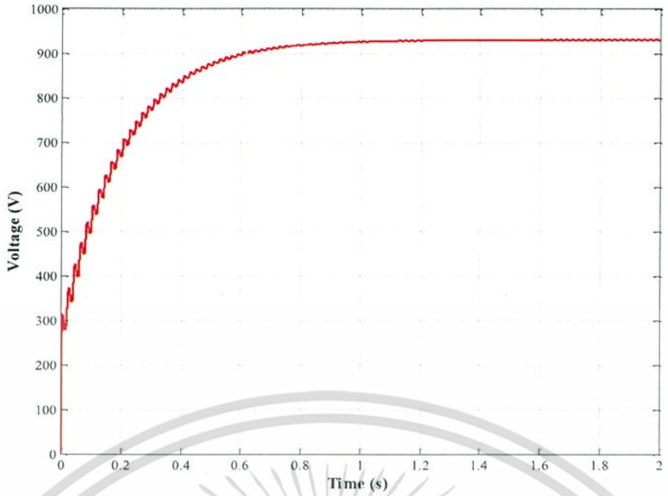
3.2.1 การออกแบบวงจรทวีแรงดัน

จากรูปที่ 3.7 แสดงวงจรทวีแรงดันสามเท่า ทำหน้าที่ให้แรงดันด้านขาออกเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าเป็นสามเท่าของแรงดันสูงสุดของสัญญาณแรงดันขาเข้าซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V ซึ่งมีค่ายอดของแรงดัน 310 โวลต์ โดย D_1 และ C_4 ทำหน้าที่เป็นส่วนทวีแรงดันหนึ่งเท่าได้แรงดัน 310 โวลต์ และ C_1, C_2, C_3, D_2, D_3 ทำหน้าที่เป็นส่วนทวีแรงดันสองเท่าได้แรงดัน 620 โวลต์ และจะได้แรงดันขาออกรวมทั้งหมด 930 โวลต์



รูปที่ 3.7 การจำลองวงจรทวีแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ผลการจำลองวงจรทวีแรงดัน

3.2.2 การออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันสูง

วงจรกำเนิดแรงดันสูงที่ทำการออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.9 ประกอบไปด้วย ทอรอยด์แกนเหล็ก ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำซึ่งเป็นขดลวด 2 ชุด พันอยู่บนทอรอยด์แกนเหล็ก ทำหน้าที่เป็นหม้อแปลงเพิ่มแรงดัน

จากรูปที่ 3.9 เมื่อตัวเก็บประจุ C_1 ได้รับการอัดประจุจากวงจรทวีแรงดันจนได้แรงดันตามที่ต้องการแล้ว และเมื่อสั่งให้สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ทำการปิดวงจร พลังงานที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุ C_1 ในรูปสนามไฟฟ้า ก็จะถ่ายเทประจุให้กับขดลวด L_1 และขดลวด L_1 จะเก็บพลังงานในรูปสนามแม่เหล็กจนเต็มแล้วขดลวด L_1 ก็จะถ่ายทอดพลังงานกลับมาให้ตัวเก็บประจุ C_1 อีกครั้ง การถ่ายทอดพลังงานไปมาระหว่างตัวเก็บประจุ C_1 กับ L_1 จึงทำให้เกิดการแกว่ง (Oscillation) ขึ้น จะมีรูปคลื่นเป็นขบวนหน่วง (Damped train wave) ซึ่งแรงดันจากการแกว่ง (Oscillation) ทางด้านขดลวดแรงต่ำจะเกิดการเหนี่ยวนำผ่านทอรอยด์แกนเหล็กขึ้นเป็นแรงดันสูงทางด้านขดลวดแรงสูง

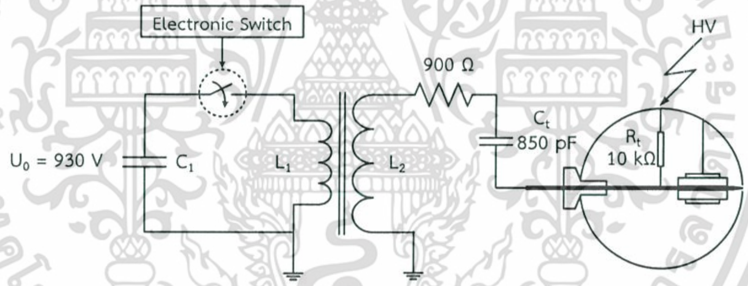
ชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน (Trigatron) สามารถนำไปใช้ติดตั้งได้ทั้งสปาร์กแกปด้านแรงสูงหรือด้านกราวด์ของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม ซึ่งข้อแตกต่างระหว่างการต่อชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานเข้าที่ด้านแรงสูงหรือด้านกราวด์ของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมคือ

- กรณีต่อชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานเข้าที่ด้านแรงสูงของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม ดังรูปที่ 3.7 ก) ต้องต่อตัวต้านทาน R_t เพื่อชาร์จตัวเก็บประจุ C_t (trigatron capacitor) ซึ่งจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดจุดชนวนมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับช่องสปาร์กแกปทรงกลม ทำให้สามารถควบคุมการสปาร์กที่ช่องสปาร์กอากาศช่วยได้ แต่ถ้าไม่มีความต้านทาน R_t เมื่อมีการชาร์จตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s จะ

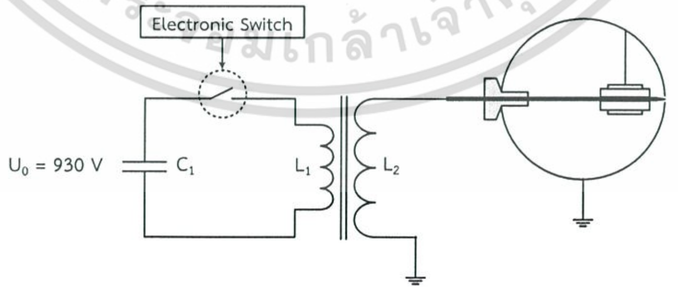
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เกิดการสปาร์กที่ช่องสปาร์กอากาศช่วยเอง โดยที่ยังไม่สั่งให้ชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน และแรงดันชาร์จอาจยังไม่ถึงค่าที่ต้องการ (U_0)

- กรณีเมื่อต่อชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานเข้าที่ด้านกราวด์ของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม ดังรูปที่ 3.7 ข) ไม่จำเป็นต้องมีความต้านทาน R_t และตัวเก็บประจุ C_t ทั้งนี้ เนื่องจากก่อนการสั่งชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานให้ทำงาน สปาร์กแกปทรงกลมจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์โวลต์ แต่เมื่อเราสั่งชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานให้ทำงาน จะทำให้มีค่าแรงดันสัญญาณพัลส์ของชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานเท่ากับ 27 kV ทำให้มีความต่างศักย์เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดจุดชนวน และสปาร์กแกปทรงกลม จึงทำให้มีการสปาร์กที่ช่องอากาศช่วยได้ แต่จะต้องมีการกลับขั้วสัญญาณพัลส์ของชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานเพื่อทำให้เกิดการไอออไนเซชั่นระหว่างสปาร์กแกปทรงกลมทั้ง 2 ด้าน กล่าวคือ ถ้ายิงแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก จะต้องกลับขั้วสัญญาณพัลส์ของชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานเป็นขั้วลบ และถ้ายิงแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ จะต้องกลับขั้วสัญญาณพัลส์ของชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานให้เป็นขั้วบวกเช่นกัน



ก) เมื่อต่อชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานเข้าที่ด้านแรงดันสูงของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม



ข) เมื่อต่อชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานเข้าที่ด้านกราวด์ของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

รูปที่ 3.9 วงจรกำเนิดแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นต้นจะกำหนดคุณสมบัติของชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันสูงของชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม ซึ่งจะมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติที่ต้องการของชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน

ค่าที่ต้องการกำหนด	ค่าที่ออกแบบ
ค่ายอดแรงดันของสัญญาณพัลส์	27 kV
ช่วง 1 คาบเวลาของสัญญาณพัลส์	1 μs
ตัวเก็บประจุพลังงาน C_1	1.3 μF
แรงดันอัดประจุ C_1	930 V

แรงดันที่ได้จากการสร้างด้วยชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานนั้นจะต้องมีหน้าคลื่นที่ไวพอ โดยเลือกให้มีค่าเท่ากับ 250 ns ซึ่ง 1 คาบเวลาการแกว่งเป็น 1 μs ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างตัวเก็บประจุ C_1 และตัวเหนี่ยวนำ L_1 จึงเลือกค่า C_1=1.3 μF

$$L_1 = \frac{1}{C_1}\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \tag{3.1}$$

จากการคำนวณหาค่า L_1 จากสมการที่ 3.1 ได้ค่า L_1= 3.5 μH โดยเลือกอัตราส่วนการแปลงระดับแรงดันของหม้อแปลงประมาณ 1:30 ดังนั้นผลการทดสอบจริงจะให้ค่ายอดของรูปคลื่น 27 kV

จากสมการ
$$L = \frac{N^2 \mu A_c}{l_c} \tag{3.2}$$

L	=	ค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า
N	=	จำนวนรอบขดลวด
μ	=	ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแกนเหล็ก
A_c	=	พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก
l_c	=	ความยาวเฉลี่ยของแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

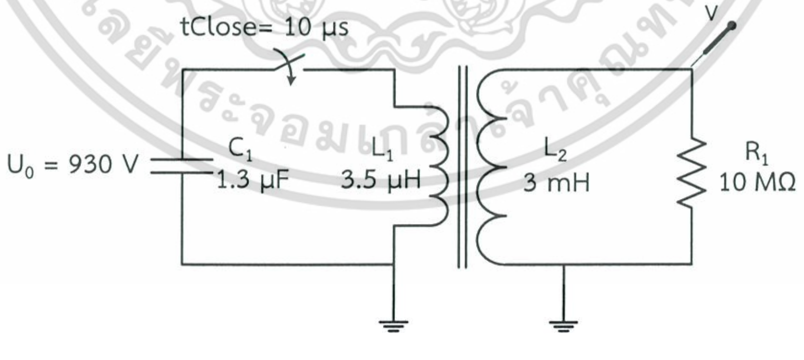
กำหนด $$K = \frac{\mu A_c}{l_c}$$ (3.3)

ให้ K เป็นค่าคงที่ เพราะฉะนั้น $$L \alpha KN^2$$ (3.4)

จากสมการที่ 3.4 จะเห็นว่าค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับกำลังสองของจำนวนรอบขดลวด ดังนั้น จากค่า L_1= 3.5 μH ที่จำนวนรอบด้านแรงต่ำ 1 รอบ และเมื่อเทียบกับจำนวนรอบด้านแรงสูงที่ 30 รอบ จะได้ค่า L_2 = 3 mH

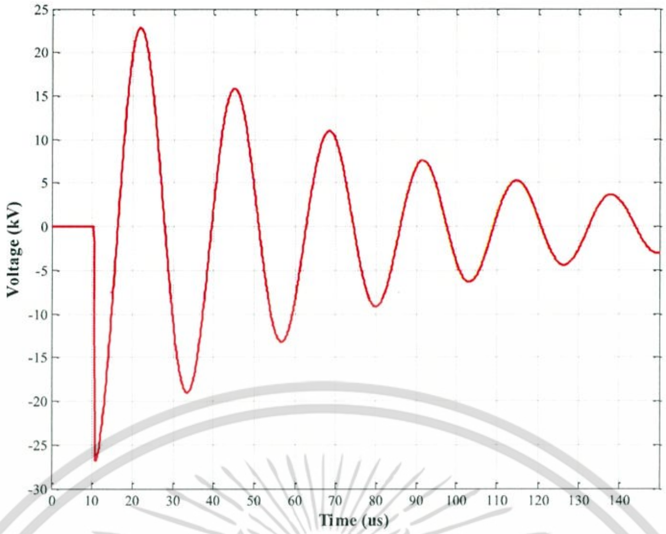
เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของวงจรกำเนิดแรงดันสูงที่ได้จากการคำนวณมาทำการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยวงจรสมมูลที่ใช้ในการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.10 และได้ผลของการจำลองการทำงานดังรูปที่ 3.11 โดยข้อมูลของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นดังนี้

ตัวเก็บประจุ C_1	=	1.3	μF
แรงดันอัดประจุ C_1	=	930	VDC
Switch time close	=	10	μs
ค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าด้านแรงต่ำ	=	3.5	μH
ค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าด้านแรงสูง	=	3.5	mH
ค่าความต้านทานด้านแรงสูง R1	=	10	MEG Ω



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรกำเนิดแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



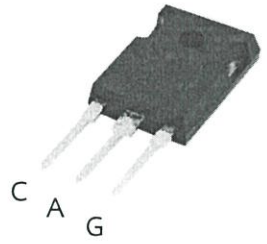
รูปที่ 3.11 ผลของการจำลองวงจรกำเนิดแรงดันสูงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.2.3 การออกแบบวงจรสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์

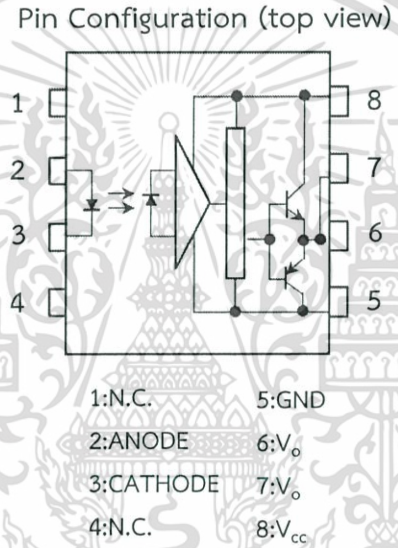
สารกึ่งตัวนำประเภทซิลิกอน คอนโทรล เรคติไฟเออร์ (Silicon-controlled rectifier : SCR) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ในวงจรสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ จะทำหน้าที่เป็นสวิตซ์เปิด-ปิดวงจร โดยจะต้องได้รับคำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ก่อนจึงจะทำงาน และเมื่อ SCR ทำการปิดวงจรจะทำให้มีการถ่ายเทพลังงานจากตัวเก็บประจุที่อัดประจุไฟฟ้าไปยังตัวเหนี่ยวนำผ่านทางหม้อแปลงแกนเหล็ก

การสั่งให้ SCR นำกระแสสามารถทำได้โดย จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขาเกต (G) เมื่อแรงดันตกคร่อมระหว่างขาเกตกับขาแคโทด (C) ถึงค่าที่ SCR ต้องการแล้ว จะทำให้ขั้วแอโนด (A) และแคโทดเชื่อมถึงกันทางไฟฟ้า โดยจะใช้วงจรแยกทางแสง (Opto isolate) ในการควบคุม SCR ซึ่งจะใช้ IC เบอร์ TLP250 เป็นตัวสร้างพัลส์ไปที่ขาเกต ซึ่ง TLP250 มีการทำงานดังนี้ เมื่อไม่มีกระแสไบอัสหลอด LED ในขาที่ 2 และขาที่ 3 จะทำให้แรงดันระหว่างขาที่ 7 กับขาที่ 5 มีค่าเป็น 0 V แต่เมื่อมีกระแสไบอัสเข้ามาที่ขา 2 และขาที่ 3 จนทำให้หลอด LED เปล่งแสง จะทำให้ขาที่ 7 และขาที่ 8 เสมือนลัดวงจรถึงกัน ทำให้แรงดันตกคร่อมระหว่างขาที่ 7 กับขาที่ 5 ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมระหว่างขาที่ 8 กับขาที่ 5 การทำงานของ IC เบอร์ TLP250 จึงเสมือนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่ควบคุมได้ โดยตัวต้านทาน 300 Ω จะจำกัดกระแสไบอัสของหลอด LED ไม่ให้สูงเกินไป และตัวต้านทาน 150 Ω เป็นตัวต้านทานขาออกเพื่อช่วยจำกัดกระแสเข้าขาเกต (Gate : g) ไม่ให้มากเกินกว่าที่ SCR จะรับได้โดยไม่เกิดการเสียหาย วงจรสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์แสดงดังรูปที่ 3.14

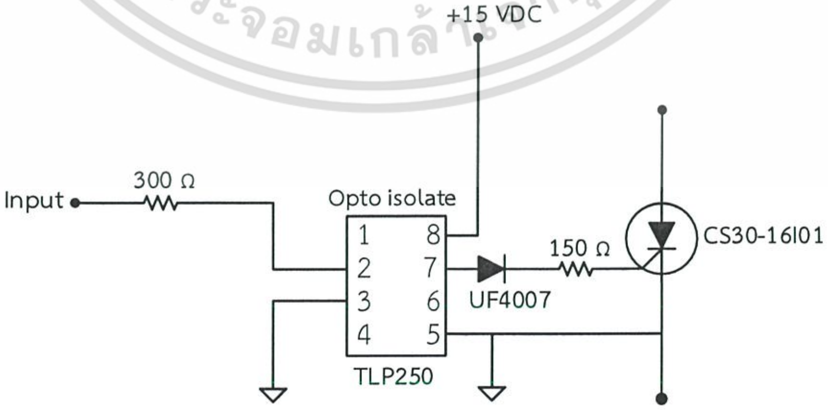
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงตำแหน่งขั้วทั้งสามของ SCR

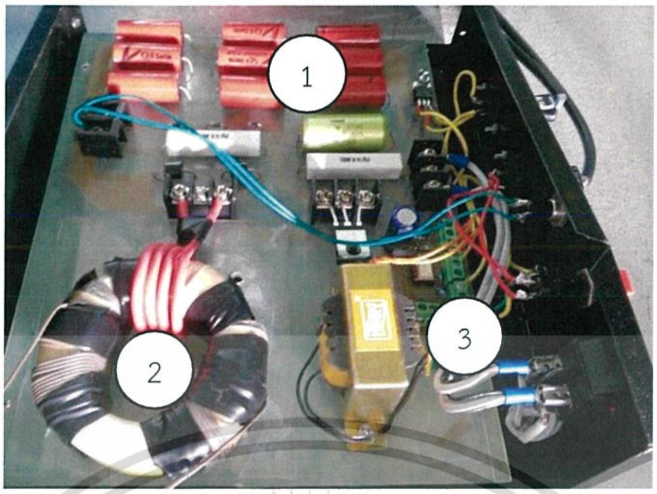


รูปที่ 3.13 วงจรภายใน IC เบอร์ TLP250



รูปที่ 3.14 วงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับควบคุมการกำเนิดแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

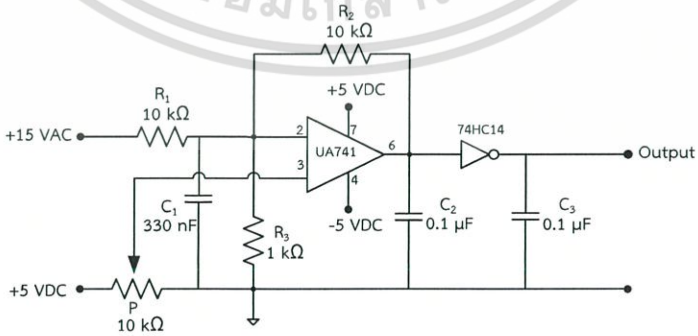


รูปที่ 3.15 เครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม
1) วงจรทวีแรงดัน 2) วงจรกำเนิดแรงดันสูง 3) วงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์

3.3 การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องควบคุมสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน (Trigatron)

3.3.1 การออกแบบสร้างชุดตรวจจับผ่านศูนย์

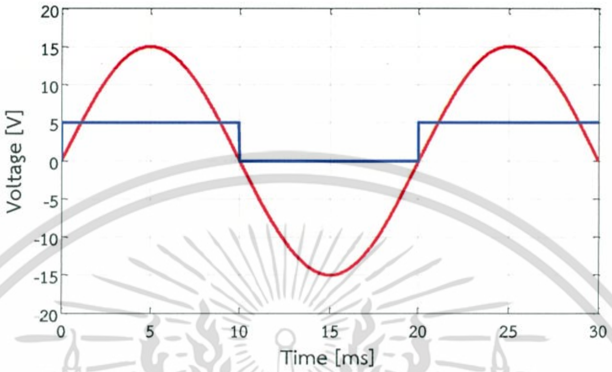
การทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งสัญญาณควบคุมให้กับชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม โดยสามารถเลือกมุมได้นั้น จำเป็นจะต้องมีการอ้างอิงมุมของแรงดันกระแสสลับ 220 V ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมุมที่นำมาทำการอ้างอิงนั้นเป็นมุม 0 องศาและ 180 องศา จึงได้มีการนำวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero-crossing) มาทำการตรวจจับเพื่อเป็นตัวอ้างอิงให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์โดยเมื่อรูปคลื่นแรงดันกระแสสลับ 220 V อยู่ที่มุม 0 องศาจะทำให้ตัวตรวจจับสร้างสัญญาณพัลส์ขึ้นมา และเมื่ออยู่ที่มุม 180 องศา สัญญาณพัลส์นั้นก็จะกลับมาที่สถานะ 0 โวลต์ และเมื่อมุมอยู่ที่ 360 หรือ 0 อีกครั้งตัวตรวจจับก็จะสร้างสัญญาณพัลส์ขึ้นมาอีกครั้ง โดยมีวงจรดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 วงจรชุดตรวจจับผ่านศูนย์

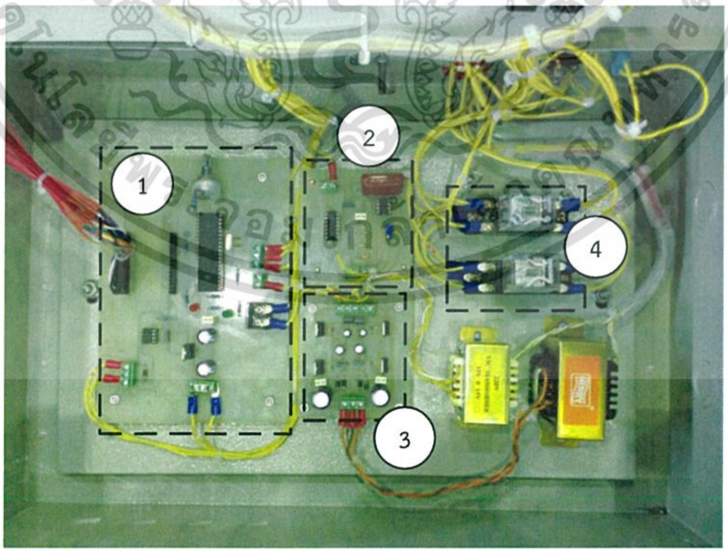
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดตรวจจับผ่านศูนย์จะได้รับสัญญาณอินพุตจากหม้อแปลง 220/15 V ในลักษณะรูปคลื่นไซน์ โดยผ่านความต้านทาน 10 kΩ จากนั้นสัญญาณจะถูกปรับขนาดให้เหมาะสมด้วยออปแอมป์ UA741 เพื่อส่งไปให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผล ซึ่งรูปคลื่นที่ชุดตรวจจับผ่านศูนย์สร้างออกมามีลักษณะดังรูปที่ 3.17



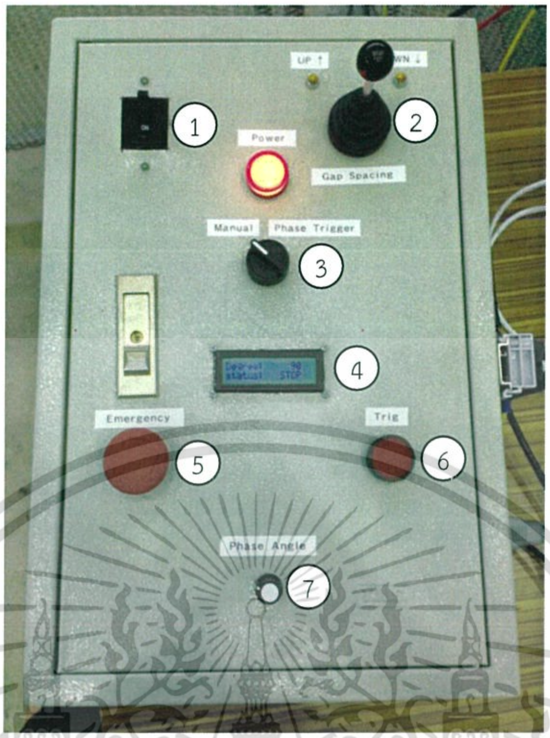
รูปที่ 3.17 รูปคลื่นที่ได้จากชุดตรวจจับผ่านศูนย์

เมื่อได้ทำการออกแบบเครื่องควบคุมสัญญาณเริ่มต้นการทำงานแล้วเสร็จ จึงได้ประกอบสร้างเครื่องควบคุมสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน และวงจรควบคุมระยะแกปให้อยู่ภายในกล่องเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ภายในกล่องเครื่องควบคุมสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 1) วงจรไมโครคอนโทลเลอร์ 2) วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ 3) วงจรแหล่งจ่าย 4) วงจรปรับระยะแกป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 ภายนอกกล่องเครื่องควบคุมสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 1) สวิตช์ ON/OFF 2) ตัวปรับระยะแกป 3) ตัวปรับโหมดการจุดชนวน 4) หน้าจอแสดงผล 5) ปุ่มตัดไฟฉุกเฉิน 6) ปุ่มสั่งจุดชนวน 7) ตัวปรับมุมจุดชนวน

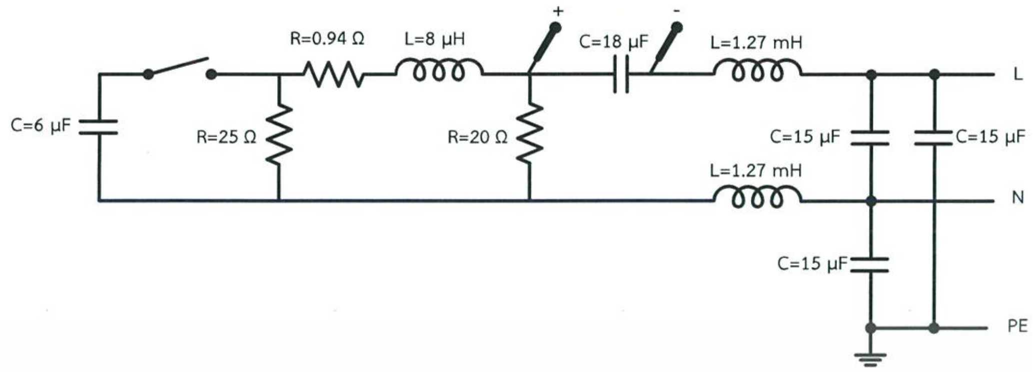
3.4 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรคัปปลิ้งและดีคัปปลิ้ง

3.4.1 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรคัปปลิ้ง

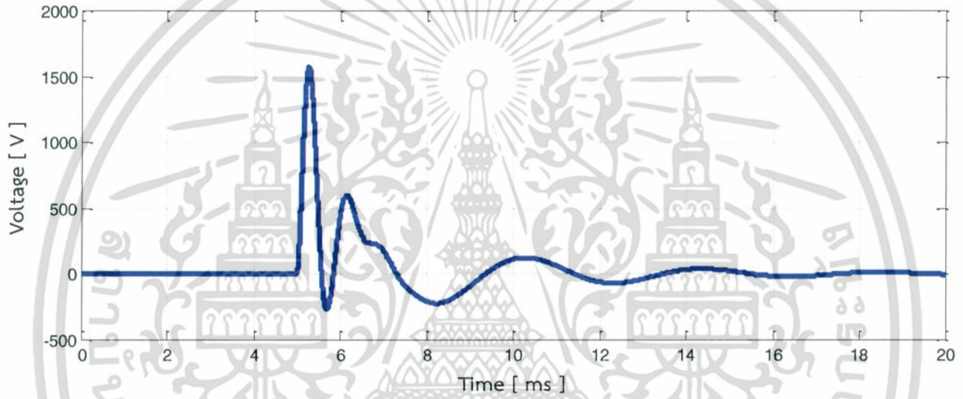
วงจรคัปปลิ้งนั้นจะแบ่งเป็น 2 กรณี คือกรณีนอร์มัล และกรณีคอมมัล ในกรณีนอร์มัลนั้นจะใช้ตัวเก็บประจุขนาด 18 μF เป็นวงจรคัปปลิ้ง ส่วนในกรณีคอมมัลนั้นจะใช้ตัวเก็บประจุขนาด 9 μF อนุกรมกับตัวต้านทานขนาด 10 Ω เป็นวงจรคัปปลิ้ง จึงออกแบบโดยใช้ตัวเก็บประจุ 9 μF 2 ตัว และตัวต้านทาน 10 Ω 1 ตัว พิกัดของตัวเก็บประจุ 9 μF สามารถหาได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยทดสอบกับแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV

จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 18 μF ตามวงจรดังรูปที่ 3.20 ได้ผลการจำลองดังรูปที่ 3.21 ซึ่งมีค่าพิกัดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับ 1600 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

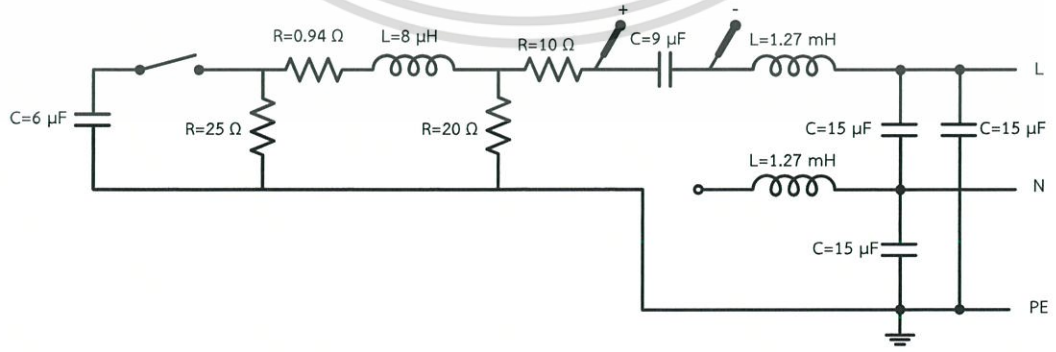


รูปที่ 3.20 วงจรจำลองการทำงานเพื่อหาค่ายอดแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 18 μF



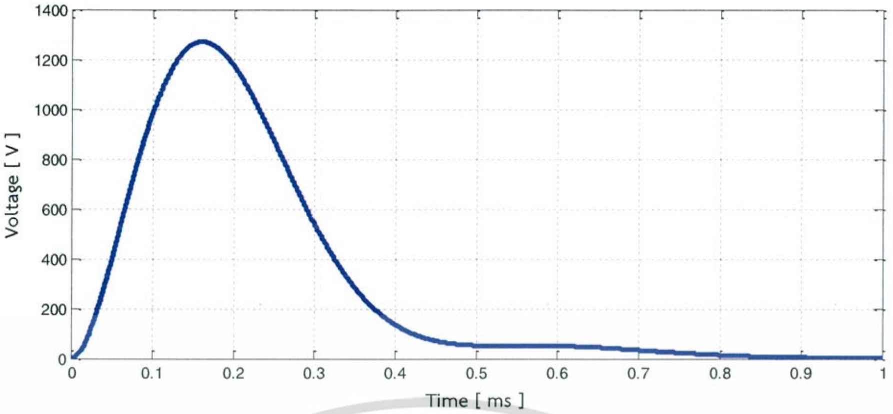
รูปที่ 3.21 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 18 μF

จากการจำลอง ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 9 μF ตามวงจรดังรูปที่ 3.22 ได้ผลการจำลองดังรูปที่ 3.23 โดยมีค่าพิกัดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับ 1300 V



รูปที่ 3.22 วงจรจำลองการทำงานเพื่อหาค่ายอดแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 9 μF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 9 μF

ชนิดของตัวเก็บประจุที่เลือกใช้สร้างตัวเก็บประจุขนาด 9 μF จำนวน 2 ตัวนั้น เลือกใช้เป็นตัวเก็บประจุชนิดไมลาขนาด 1 μF พิกัด 400 V_{DC} อนุกรมกันจำนวน 3 ตัว จะได้ตัวเก็บประจุขนาด 0.33 μF พิกัด 1200 V_{DC} นำไปขนานกันจำนวน 27 ตัว จากการวัดค่าเก็บประจุรวมเมื่อทำการออกแบบสร้างเสร็จจะได้ค่าเก็บประจุรวมเท่ากับ 8.91 μF พิกัด 1200 V_{DC} คลาดเคลื่อนจากค่าที่ต้องการเพียง 1 % ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ และเมื่อนำตัวเก็บประจุขนาด 9 μF มาขนานกัน 2 ตัว จะได้ตัวเก็บประจุขนาด 18 μF เพื่อใช้เป็นวงจรคัปปลิ้งในกรณีนอร์มัล ซึ่งค่าพิกัดแรงดันอิมพัลส์สูงสุดของตัวเก็บประจุนั้นจะมากกว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 2 เท่า คือ 2400 V

รูปที่ 3.24 ตัวเก็บประจุชนิดไมลา 1 μF พิกัด 400 V_{DC}

3.4.2 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรดีคัปปลิ้ง

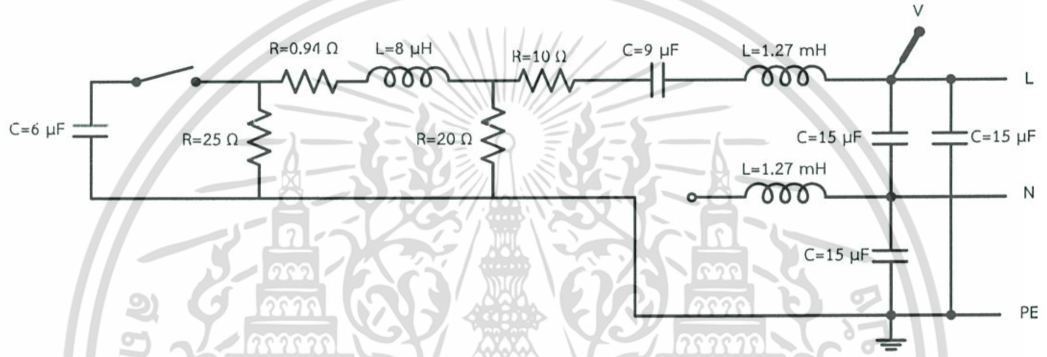
วงจรดีคัปปลิ้งเป็นวงจรที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ 2 ตัว และตัวเก็บประจุ 3 ตัว ค่าความเหนี่ยวนำตามมาตรฐานกำหนดไว้ต้องมีค่าไม่เกิน 1.5 mH ส่วนค่าความเก็บประจุนั้นจะต้องทำให้แรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

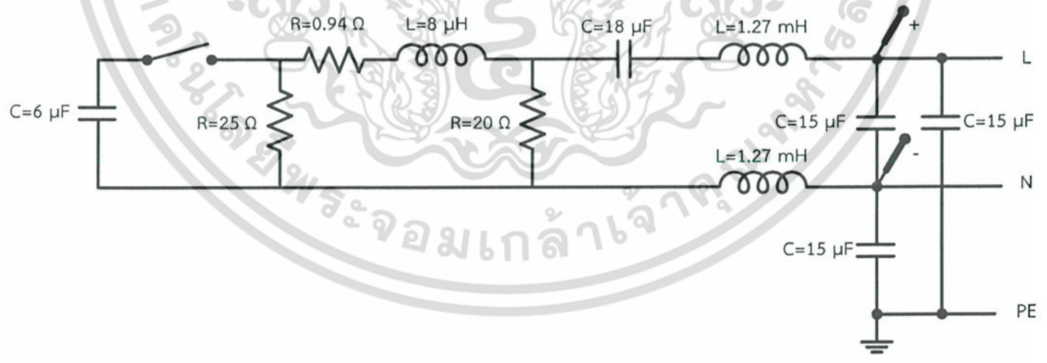
เกินผ่านเข้าสู่แหล่งจ่ายได้ไม่เกิน 15% ของค่าสูงสุดของแรงดันทดสอบขณะไม่ได้ต่ออุปกรณ์ทดสอบและแหล่งจ่ายไฟ หรือไม่เกินสองเท่าของค่าสูงสุดของแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ โดยให้ค่าที่สูงกว่าเป็นเกณฑ์

3.4.3 การออกแบบตัวเก็บประจุ

จากการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าของตัวเก็บประจุที่ทำให้แรงดันเกินผ่านเข้าสู่แหล่งจ่ายโดยไม่เกิน 15% ของแรงดันทดสอบ เมื่อให้แรงดันทดสอบอยู่ที่ 10kV แรงดันเกินที่ผ่านเข้าสู่แหล่งจ่ายจะต้องไม่เกิน 1500 V ตามวงจรดังรูปที่ 3.25 ค่าของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั้งกรณีนอร์มัลและคอมมัลคือ 15 μF



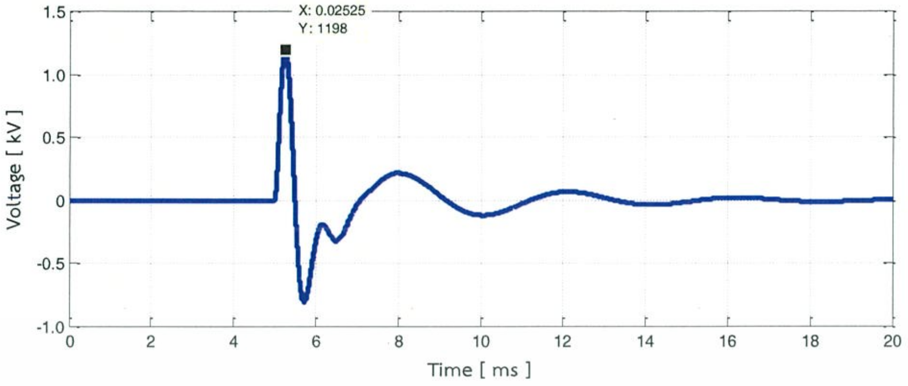
ก) วงจรจำลองการทำงานเพื่อหาขนาดของตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้งที่เหมาะสมในกรณีคอมมัล



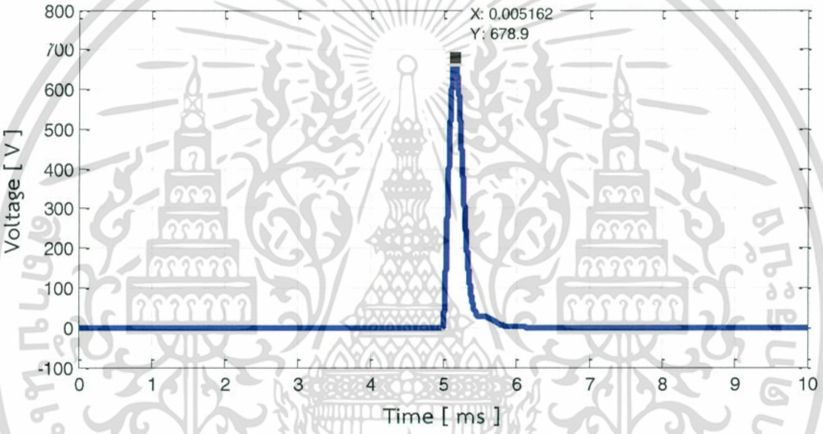
ข) วงจรจำลองการทำงานเพื่อหาขนาดของตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้งที่เหมาะสมในกรณีนอร์มัล

รูปที่ 3.25 วงจรจำลองการทำงานเพื่อหาขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) แรงดันเกินคงเหลือที่เข้าสู่แหล่งจ่ายในกรณีคอมมัล

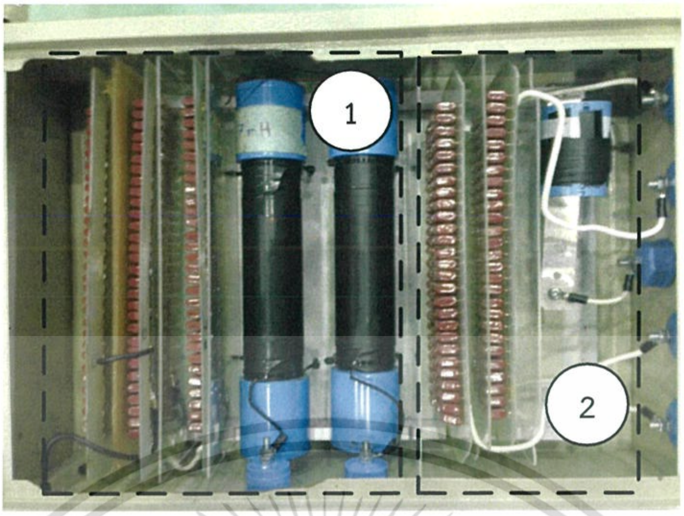


ข) แรงดันเกินคงเหลือที่เข้าสู่แหล่งจ่ายในกรณีนอร์มัล

รูปที่ 3.26 แรงดันเกินคงเหลือที่เข้าสู่แหล่งจ่าย

ชนิดตัวเก็บประจุที่เลือกใช้ในการสร้างตัวเก็บประจุขนาด 15 μF จำนวน 3 ตัวนั้น เลือกใช้เป็นตัวเก็บประจุชนิดไมลาขนาด 1 μF พิกัด 400 V_{DC} อนุกรมกันจำนวน 2 ตัว จะได้ค่าเก็บประจุ 0.5 μF พิกัด 800 V_{DC} นำไปขนานกันจำนวน 30 ตัว จากการวัดค่าเก็บประจุรวมเมื่อทำการออกแบบสร้างเสร็จจะได้ค่าเก็บประจุ 15 μF พิกัด 800 V_{DC} ซึ่งค่าพิกัดแรงดันอิมพัลส์สูงสุดของตัวเก็บประจุนั้นจะมากกว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 1.5 เท่า คือ 1200 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



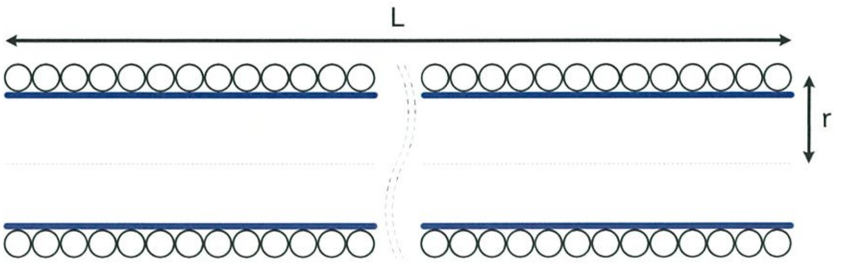
รูปที่ 3.27 กล่องวงจรกรอง
เมื่อ 1) วงจรดีคัปปลิ้ง 2) วงจรคัปปลิ้ง

3.4.4 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำจะใช้วิธีการพันขดลวดเหนี่ยวนำแบบหนึ่งชั้น (Single Layer Inductor) จำนวน 3 ตัวมาซ้อนแกนร่วมเดียวกันเพื่อให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ ในปริญญานิพนธ์นี้เลือกใช้ลวดทองแดงเคลือบฉนวนเบอร์ 21 AWG เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.032 นิ้ว ดังรูปที่ 3.28 โดยการพันขดลวดทองแดงเคลือบฉนวนลงบนท่อ PVC 3 ขนาดได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว และเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ตามลำดับ และสามารถคำนวณค่าองค์ประกอบของตัวเหนี่ยวนำได้จากสมการที่ 3.5

รูปที่ 3.28 ขดลวดทองแดงเคลือบฉนวนเบอร์ 21 AWG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 การจำลองที่ใช้ในการสร้างตัวเหนี่ยวนำแบบหนึ่งชั้น

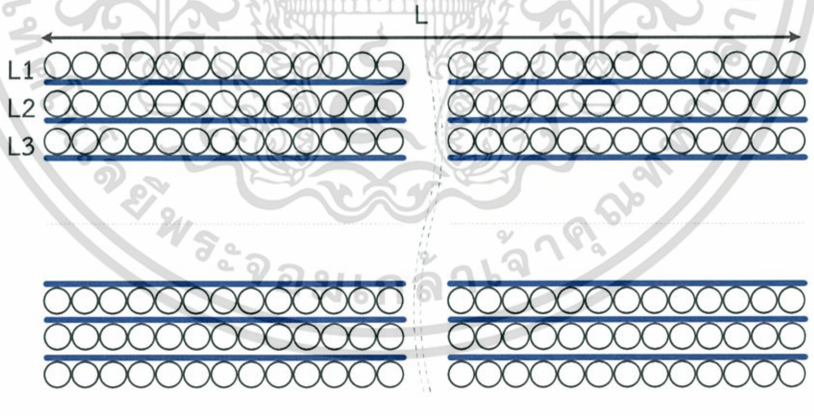
$$L = \frac{N^2 r^2}{9r + 10l} \tag{3.5}$$

เมื่อ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดง (µH)

r คือ รัศมีของท่อ PVC (inch)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด

l คือ ความยาวของท่อ PVC ที่มีขดลวดพันอยู่ (inch)



รูปที่ 3.30 การจำลองที่ใช้ในการคำนวณสร้างตัวเหนี่ยวนำแบบหลายชั้น

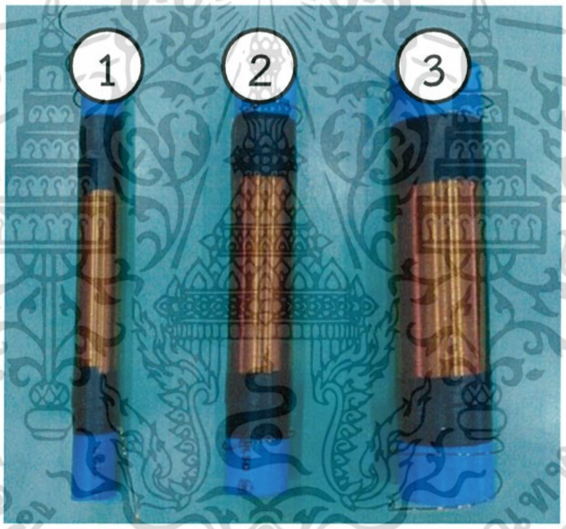
การออกแบบตัวเหนี่ยวนำแบบหลายชั้นที่ได้จากการพันขดลวดแบบชั้นเดียว โดยนำมาต่ออนุกรม และซ้อนแกนร่วมเดียวกันโดยให้ท่อด้านในอยู่จุดกึ่งกลางของท่อด้านนอก ซึ่งการซ้อนแกนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อก่อให้เกิดความเหนี่ยวนำแฝงของขดลวดทองแดงระหว่างชั้น สามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำแบบหลายชั้นได้ดังสมการที่ 3.6

$$L = \sum_{i=1}^{n}(2i - 1)L_i \tag{3.6}$$

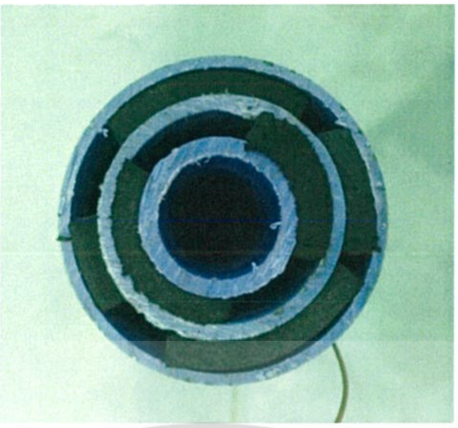
เมื่อทำการประกอบสร้างตัวเหนี่ยวนำแบบหนึ่งชั้นแล้วเสร็จ ดังแสดงในรูปที่ 3.31 จึงนำตัวเหนี่ยวนำแต่ละชั้นมาอนุกรม และซ้อนบนแกนร่วมเดียวกันโดยใช้แผ่นยางหนุนแต่ละชั้นให้แกนท่อด้านในอยู่กึ่งกลางของท่อด้านนอกและมีความแน่นหนา จากการประกอบสร้างตัวเหนี่ยวนำแบบสามชั้นขึ้นจากตัวเหนี่ยวนำแบบหนึ่งชั้นทั้งสามตัวจะได้ค่าความเหนี่ยวนำรวมเท่ากับ 1.27 mH ดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.31 ตัวเหนี่ยวนำที่ประกอบสร้าง

1) ตัวเหนี่ยวนำแบบชั้นเดียวบนท่อ PVC เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว
2) ตัวเหนี่ยวนำแบบชั้นเดียวบนท่อ PVC เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว
3) ตัวเหนี่ยวนำแบบชั้นเดียวบนท่อ PVC เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 ตัวเหนี่ยวนำสามชั้นซ้อนแกนร่วม

3.5 อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน

อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน คือ อุปกรณ์ที่ช่วยลดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาสั้นๆ ได้ ซึ่งหากไม่มีอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินนี้พลังงานที่สูงมากเช่นนี้สามารถสร้างความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องมือวัด หรือเครื่องมือประมวลผลต่างๆ

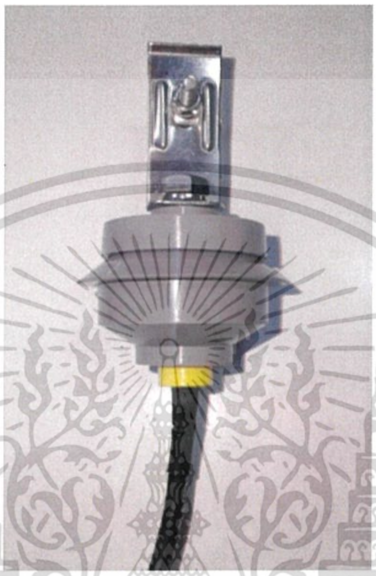
หลักการทำงานทั่วไปของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน คือ เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินอยู่ในสภาวะปกติ อุปกร์ณ์ป้องกันแรงดันเกินจะอยู่ในสภาวะ High Impedance ที่มีค่าสูงมาก และเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินอยู่ในสภาวะสูงผิดปกติจนถึงค่าที่อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินทำงาน อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินจะเปลี่ยนสภาวะจากค่าความต้านทานที่สูงมากๆ ไปสู่สภาวะความต้านทานที่ต่ำมากๆ ด้วยความรวดเร็ว กล่าวคือสามารถเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นในช่วงเวลาอันสั้นออกจากอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยสร้างค่าความต้านทานต่ำเชื่อมกับสายดิน เพื่อให้แรงดันที่สูงขึ้นชั่วขณะนั้นไหลไปตามแนวค่าความต้านทานต่ำไปยังสายดิน

การใช้อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินสำหรับแต่ละลักษณะการใช้งาน จะมีความแตกต่างกัน ดังนั้นส่วนประกอบที่อยู่ภายในอุปกรณ์ก็จะแตกต่างกันแต่มีวัตถุประสงค์เดียวกันคือ เพื่อป้องกันแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นในระยะเวลาอันรวดเร็วได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนมากอุปกรณ์ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินจะต้องมีหน้าที่ทำให้เกิดความต้านทานต่ำ เช่น MOV (Metal Oxide Varistor), Gas Discharge Tube (GDT), และ Silicon Avalance Diode (SAD) ซึ่งอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่นำมาทดสอบนั้นสร้างขึ้นมาจาก Metal Oxide Varistor (MOV) ซึ่งมีคุณสมบัติตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นในช่วงเวลาสั้นได้อย่างรวดเร็ว (ประมาณ 20 ns) แต่ถ้าหากรับกระไฟฟ้าสูง จะทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ลดลง ภายใต้สภาวะปกติ MOV จะมีความ

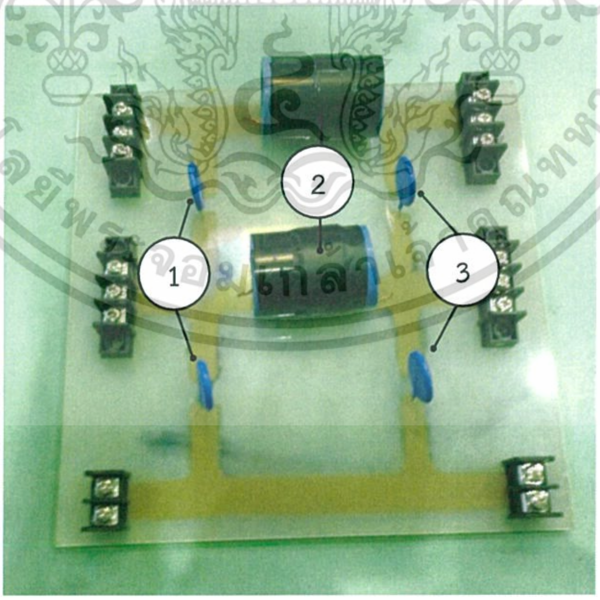
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้านทานสูง แต่เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นเกินกว่าปกติ ความต้านทานของ MOV จะลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลลงสู่สายดิน จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าลดลงสู่ระดับปกติ

อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่นำมาทดสอบนั้นมี 2 ระแบบแรงดัน คือ ระบบแรงดันต่ำ 480 V และระบบแรงดันต่ำ 275 V



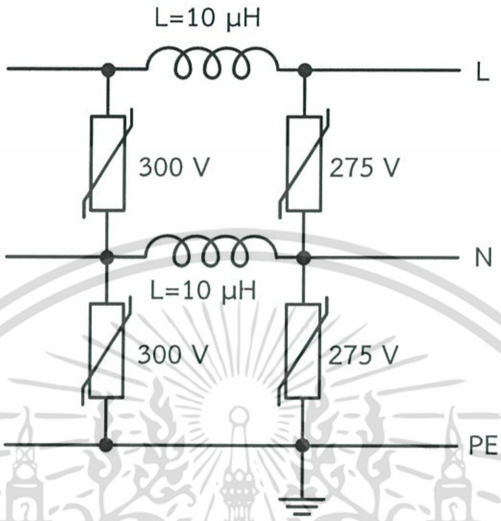
รูปที่ 3.33 อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่ใช้ในระบบแรงดันต่ำ 480 V



รูปที่ 3.34 อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่ใช้ในระบบแรงดันต่ำ 275 V
1) MOV 300 V 2) ตัวเหนี่ยวนำ 10 mH 3) MOV 275 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่ใช้ในระบบแรงดันต่ำ 275 V ประกอบด้วย MOV 300 V , MOV 275 V และตัวเหนี่ยวนำขนาด 10 µF นำมาสร้างเป็นวงจรดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 วงจรสมมูลของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่ใช้ในระบบแรงดันต่ำ 275 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การทดสอบและประเมินผล

เพื่อเป็นการยืนยันประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมที่ออกแบบสร้าง จึงทำการทดสอบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้ว่าเป็นไปตามมาตรฐาน หรือตามทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบสร้างหรือไม่ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 หัวข้อหลักดังนี้

1. การทดสอบชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม
2. การทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

   1) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/50 μs ค่ายอด 10 kV โดยทดสอบทั้งขั้วบวกและขั้วลบ

   2) กระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20 μs ค่ายอด 5 kA โดยทดสอบทั้งขั้วบวกและขั้วลบ

3. การทดสอบวงจรกรอง ขณะต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำความถี่พลังงาน (50Hz)

   1) การทดสอบชุดวงจรคัปปลิ้ง และดีคัปปลิ้ง

   - จ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground
   - จ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Neutral – Ground
   - จ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line - Neutral

   2) การทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่มุม 0 องศา 90 องศา 180 องศาและ 270 องศา

4. การทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่ต่อเข้าไปในระบบ ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5

   1) ทดสอบแยกระบบ โดยไม่ต่อแหล่งจ่าย

   1.1 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล คือจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground และปลดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ออยู่ออก โดยทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ

   1.2 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล คือ จ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Neutral – Ground และปลดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ออยู่ออก โดยทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ

   1.3 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบนอร์มัล คือ จ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Neutral และปลดแหล่งจ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ออยู่ออก โดยทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ

1.4 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล คือ จ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground และปลดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ออยู่ออก โดยทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ

1.5 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล คือ จ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Neutral – Ground และปลดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ออยู่ออก โดยทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ

2) ทดสอบระบบรวม แบบต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 380 V

2.1 ทดสอบ อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล คือ จ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground ซึ่งมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 380 V ต่ออยู่ โดยทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ในกรณีที่ทดสอบโดยชาร์จแรงดันขั้วลบ จะต้องเปลี่ยนขั้วของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 380 V เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง -380 V

2.2 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบนอร์มัล คือ จ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Neutral ซึ่งมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V ต่ออยู่ โดยทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ

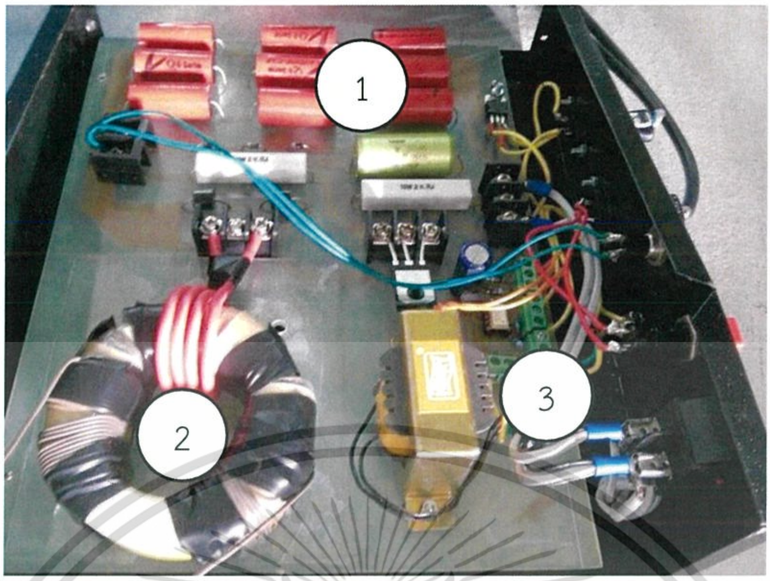
4.1 การทดสอบชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างการจำลองโดยโปรแกรม ATP/EMTP กับการทดสอบจริงจะมีตัวแปรที่ทำการพิจารณาอยู่ 3 ตัวแปรคือ

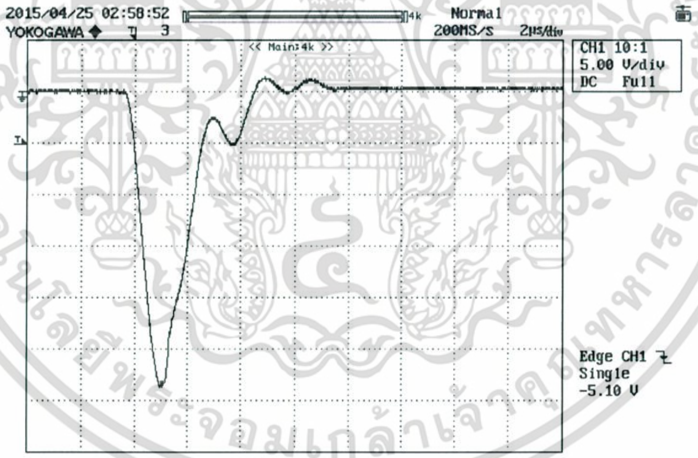
1. ค่ายอดแรงดันของสัญญาณพัลส์ จะต้องมีค่ายอด 27 kV
2. ช่วง 1 คาบเวลาของสัญญาณพัลส์ จะต้องมีค่าประมาณ 1 μs หรือ ช่วงเวลาหน้าคลื่นประมาณ 300 ns
3. มุมจุดชนวน

ซึ่งตัวแปรทั้ง 3 ตัวที่พิจารณานั้น จะต้องมีค่าใกล้เคียงกับเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นในขั้นตอนการออกแบบสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 1) วงจรทวีแรงดัน 2) วงจรกำเนิดแรงดันสูง 3) วงจรสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 4.2 รูปคลื่นที่วัดได้จากชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน

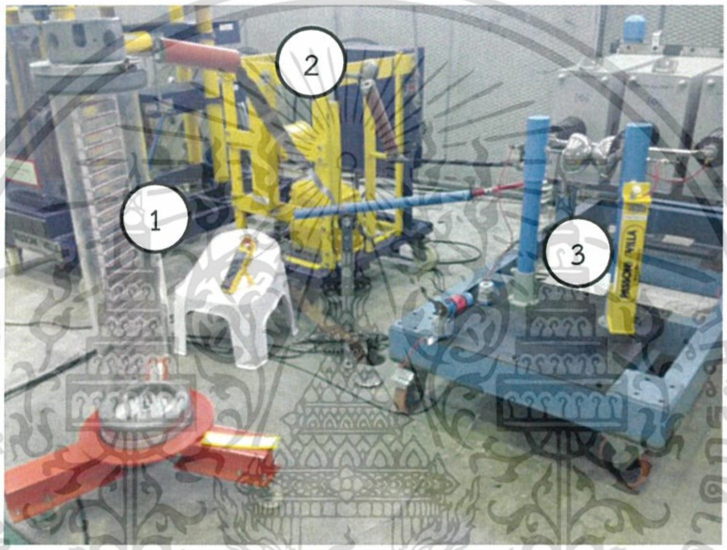
จากผลการทดสอบดังรูปที่ 4.2 พบว่าลักษณะของรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบจริงนั้นมีลักษณะที่แตกต่างจากผลการทดสอบที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่ส่วนสำคัญที่ใช้ในการพิจารณาคือ ค่ายอดของแรงดันและช่วงเวลาหน้าคลื่น โดยผลการทดสอบมีแรงดันค่ายอด 28 kV ช่วงเวลาหน้าคลื่นประมาณ 900 ns ซึ่งสามารถนำไปใช้จุดชนวนเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

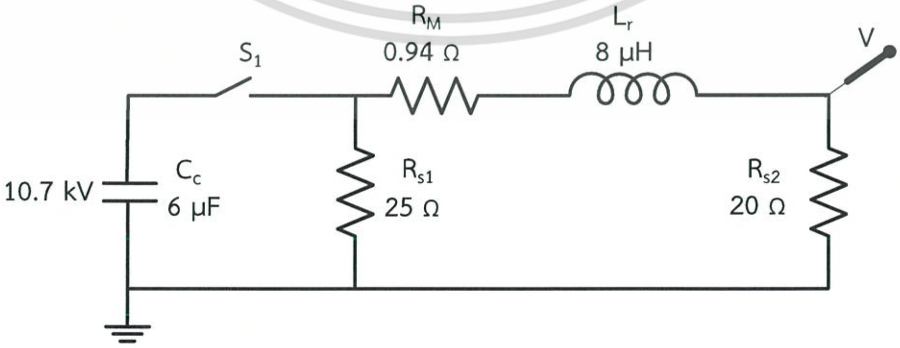
4.2 การทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

4.2.1 การทดสอบสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/50 µs ค่ายอด 10 kV

เพื่อเป็นการทดสอบความสามารถในการจ่ายแรงดันอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม จึงทำการทดสอบสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/50 µs ค่ายอด 10 kV โดยอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ด้วยแรงดัน 10.7 kV และใช้โวลเตจดิไวเดอร์ในการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้น สำหรับวงจรการทดสอบและวงจรสมมูลของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ ซึ่งในการทดสอบได้ทำการทดสอบทั้งขั้วบวกและขั้วลบ



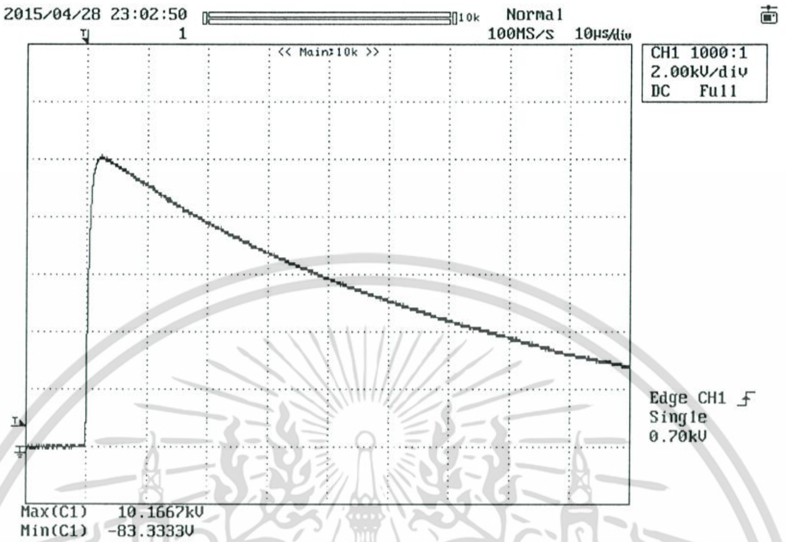
รูปที่ 4.3 วงจรทดสอบการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพพัลส์
1) โวลเตจดิไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันสูง 2) ชุดหม้อแปลงอัดประจุ
3) เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมในกรณีสร้างแรงดันอิมพัลส์



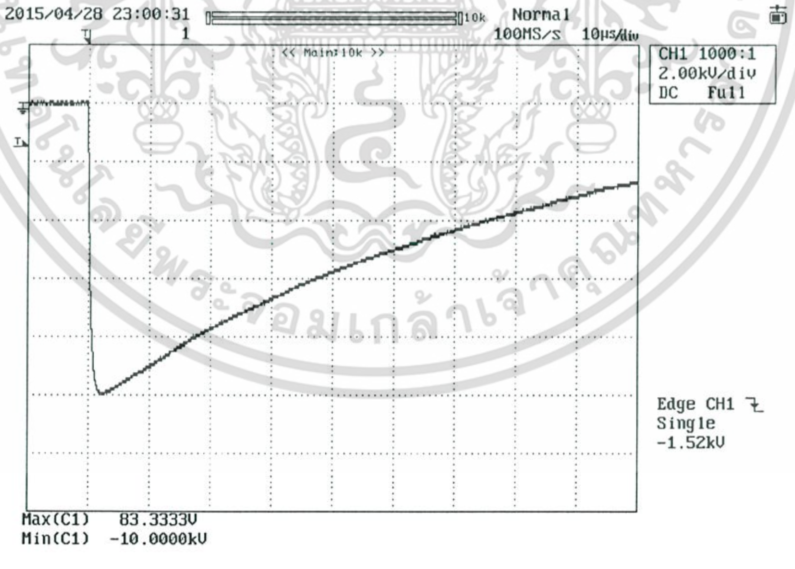
รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลของการทดสอบในการสร้างแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรการทดสอบดังรูปที่ 4.3 ได้ผลการทดสอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกที่ได้จากการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม



รูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบที่ได้จากการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

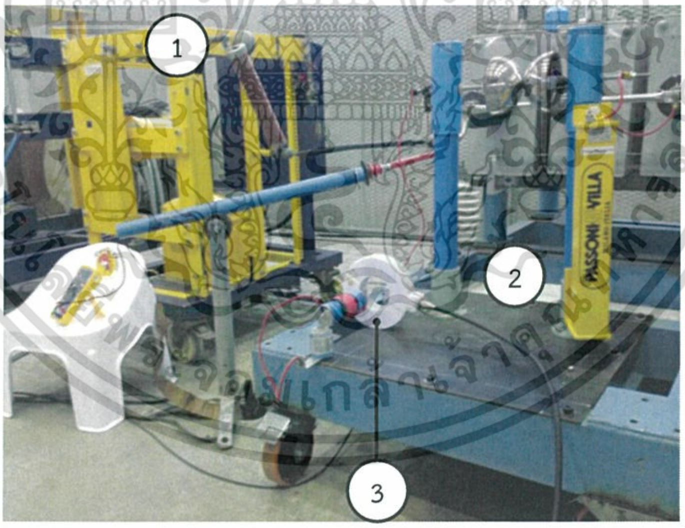
ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมในกรณีสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากการทดสอบ

เวลาหน้าคลื่น	1.516 μs
เวลาหลังคลื่น	48.77 μs
ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก	10.17 kV
ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ	-10.0 kV

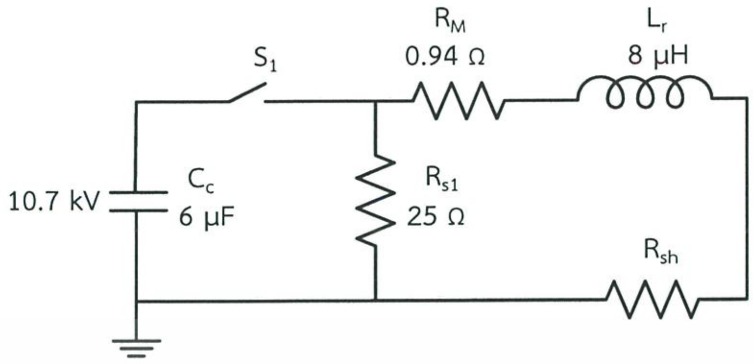
4.2.2 การทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20 μs ค่ายอด 5 kA

เพื่อเป็นการทดสอบความสามารถในการจ่ายกระแสอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม จึงทำการทดสอบสร้างกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20 μs ค่ายอด 5 kA ด้วยขนาดแรงดันอัดประจุ 10.7 kV และใช้ขดลวดโรกอฟสกีเป็นอุปกรณ์ในการวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ วงจรการทดสอบและวงจรสมมูลของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ ซึ่งในการทดสอบได้ทำการทดสอบทั้งขั้วบวกและขั้วลบ



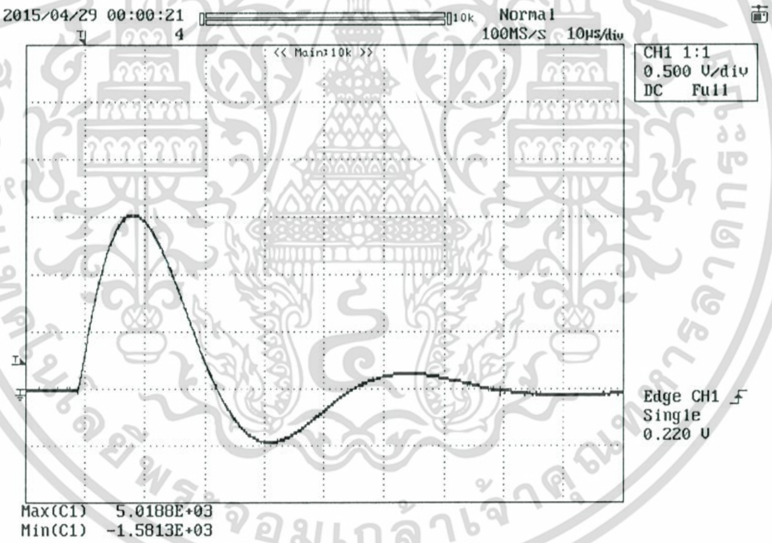
รูปที่ 4.7 วงจรการทดสอบการสร้างรุปคลื่นกระแสอิมพัลส์
1) ชุดหม้อแปลงอัดประจุ 2) เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 3) โรกอฟสกีคอยล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



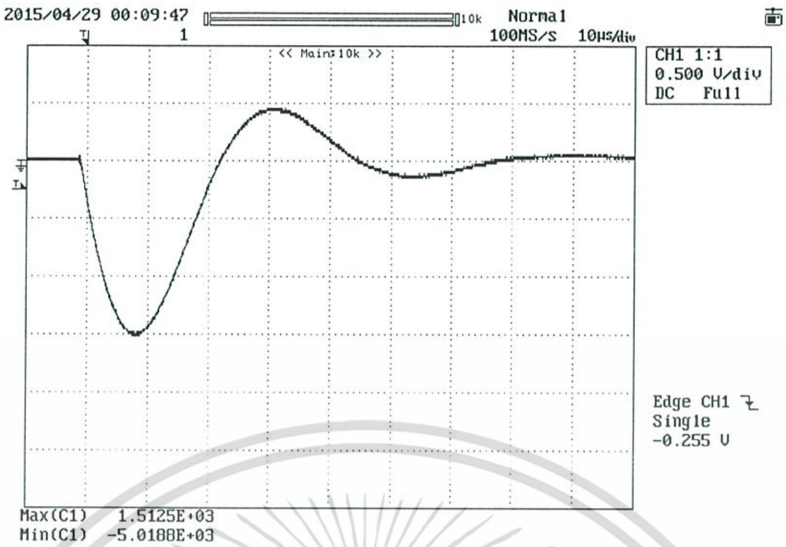
รูปที่ 4.8 วงจรสมมูลของการทดสอบในการสร้างกระแสอิมพัลส์

จากวงจรการทดสอบดังรูปที่ 4.7 ได้ผลการทดสอบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ขั้วบวกที่ได้จากการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ขั้วลบที่ได้จากการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

จากรูปคลื่นผลการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมในกรณีสร้างรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ได้ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ได้จากการทดสอบ

เวลาหน้าคลื่น	7.01 μs
เวลาหลังคลื่น	17.25 μs
ค่ายอดกระแสอิมพัลส์ขั้วบวก	5.02 kA
ค่ายอดกระแสอิมพัลส์ขั้วลบ	-5.02 kA
เปอร์เซ็นต์ค่ายอดขั้วตรงข้าม	29.88 %

4.3 การทดสอบวงจรกรองความถี่ขณะต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำความถี่พลังงาน

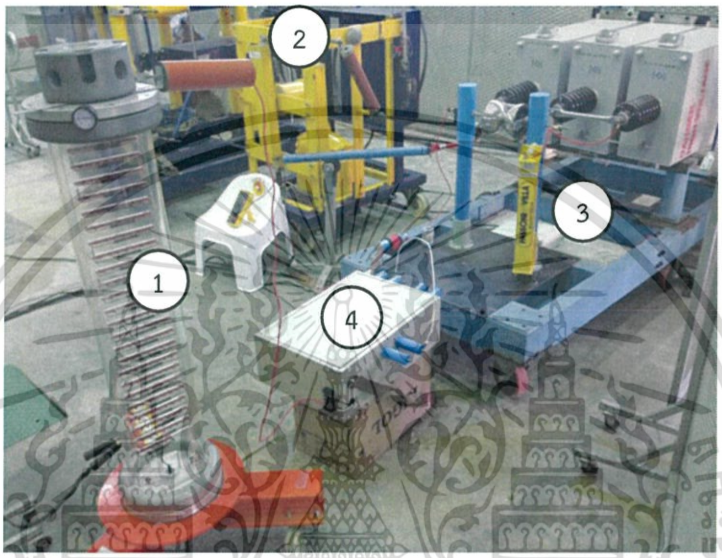
4.3.1 การทดสอบวงจรกรองความถี่ โดยไม่ต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าและอุปกรณ์ทดสอบ

เพื่อเป็นการทดสอบความสามารถในการป้องกันแรงดันเกินของวงจรกรอง จึงทำการทดสอบวงจรคัปปลิ้ง และดีคัปปลิ้ง ด้วยแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV โดยไม่ต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้า และอุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งมาตรฐาน IEC 61000-4-5 ได้กำหนดให้ขนาดของแรงดันเกินที่ผ่านเข้าสู่แหล่งจ่ายที่ยอมรับได้ต้องไม่เกิน 15 % ของค่าแรงดันสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบ หรือไม่เกินสองเท่าของค่าสูงสุดของแรงดันในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำที่ทดสอบ โดยจะพิจารณาจากค่าที่สูงกว่าเป็นเกณฑ์ สำหรับวงจรการทดสอบและ

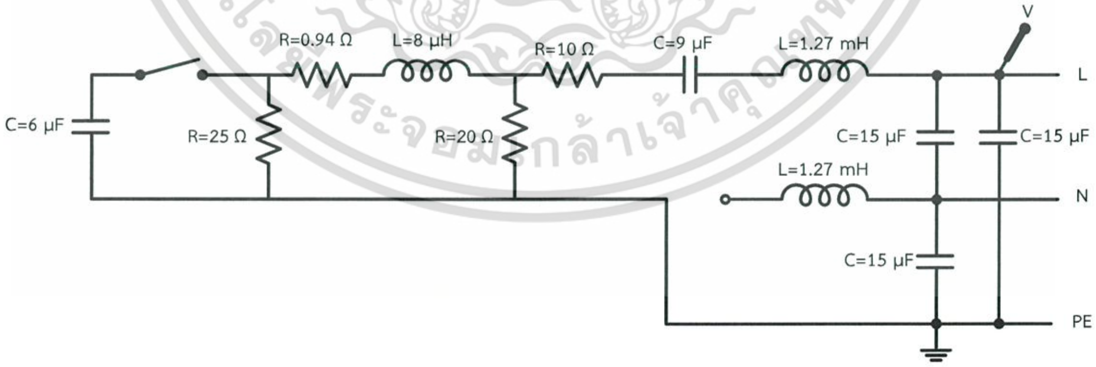
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรสมมูลของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ ในส่วนของการทดสอบวงจรคัปปลิ้ง และดีคัปปลิ้งจะแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ

- จ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground
- จ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Neutral -- Ground
- จ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line - Neutral



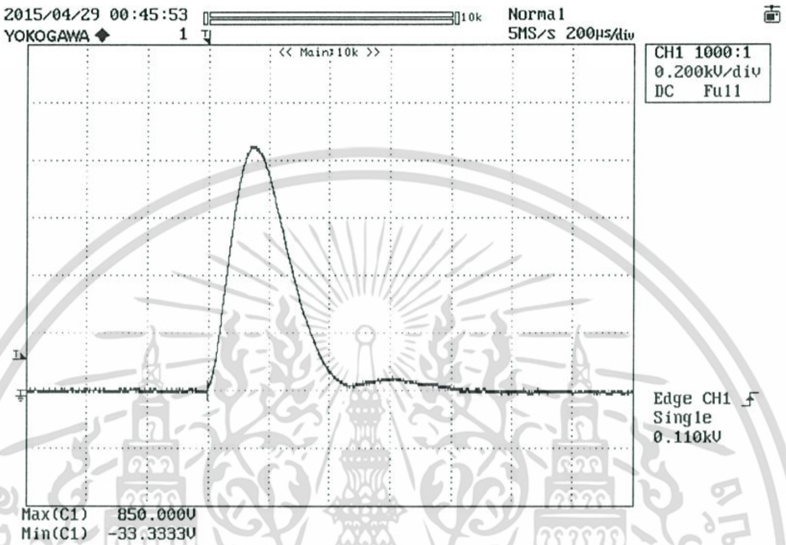
รูปที่ 4.11 วงจรการทดสอบวงจรคัปปลิ้ง และดีคัปปลิ้ง
1) โวลเตจดิไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันสูง 2) ชุดหม้อแปลงอัดประจุ
3) เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 4) ชุดวงจรกรอง



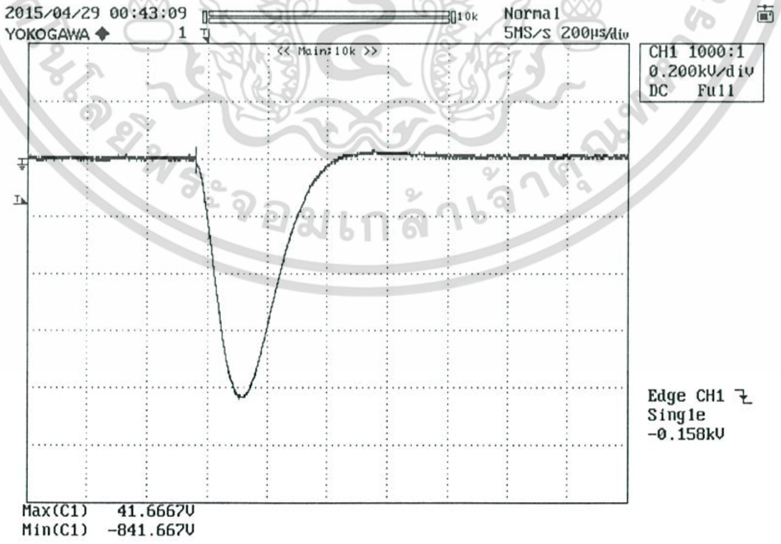
รูปที่ 4.12 วงจรสมมูลของการทดสอบวงจรคัปปลิ้ง และดีคัปปลิ้ง ในกรณี Line – Ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบวงจรคัปปลิ้ง และดีคัปปลิ้ง เมื่อจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground ด้วยแรงดันอิมพัลส์ 10 kV โดยไม่ต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้า และอุปกรณ์ทดสอบ ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ



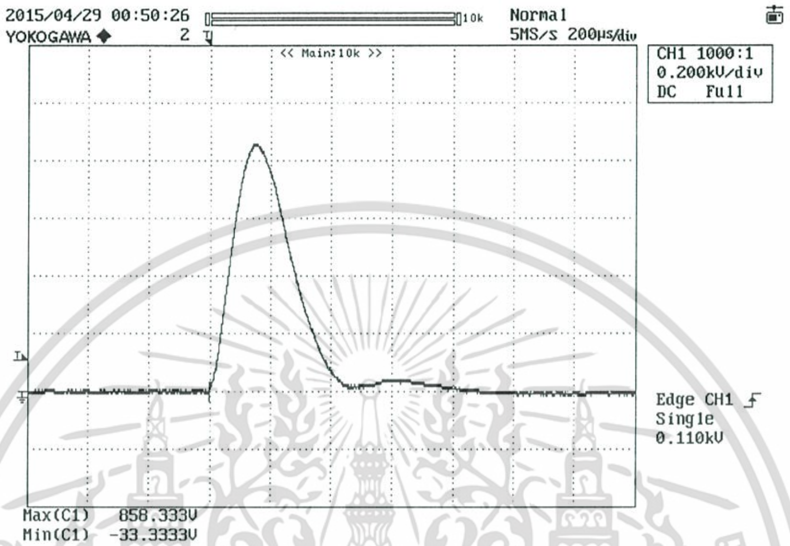
รูปที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดันเกินขั้วบวกที่ผ่านเข้าสู่แหล่งจ่าย Line – Ground



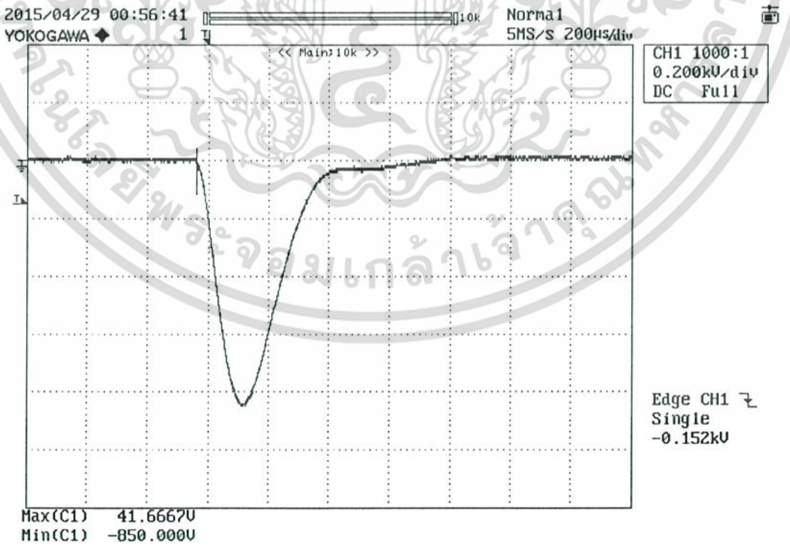
รูปที่ 4.14 รูปคลื่นแรงดันเกินขั้วลบที่ผ่านเข้าสู่แหล่งจ่าย Line – Ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบวงจรคัปปลิ้ง และดีคัปปลิ้ง เมื่อจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Neutral – Ground ด้วยแรงดันอิมพัลส์ 10 kV โดยไม่ต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้า และอุปกรณ์ทดสอบ ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ



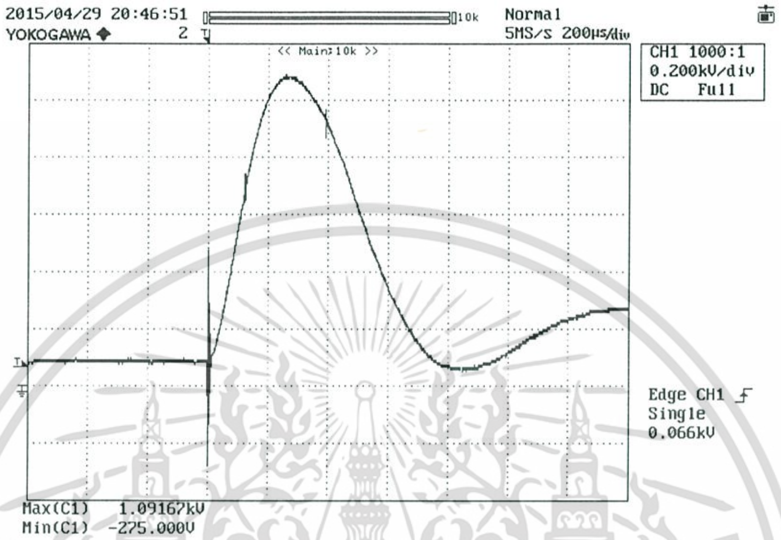
รูปที่ 4.15 รูปคลื่นแรงดันเกินขั้วบวกที่ผ่านเข้าสู่แหล่งจ่าย Neutral – Ground



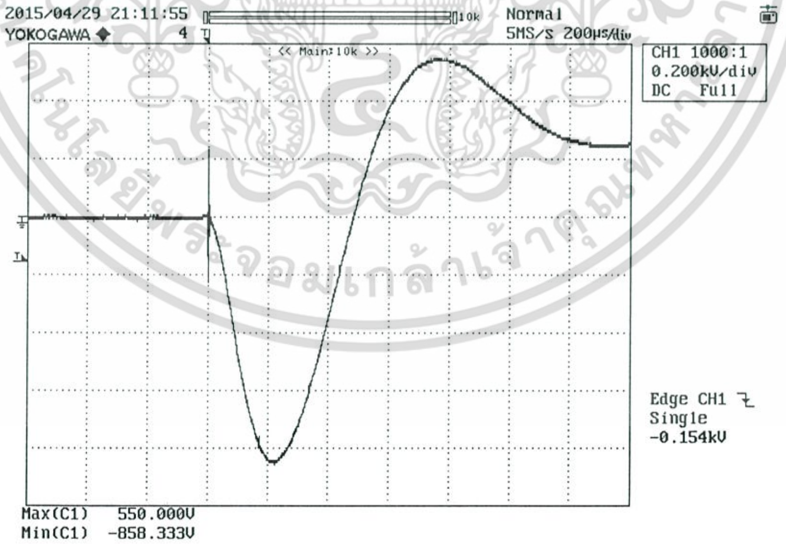
รูปที่ 4.16 รูปคลื่นแรงดันเกินขั้วลบที่ผ่านเข้าสู่แหล่งจ่าย Neutral – Ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบวงจรคัปปลิ้ง และดีคัปปลิ้ง เมื่อจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line - Neutral ด้วยแรงดันอิมพัลส์ 10 kV โดยไม่ต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้า และอุปกรณ์ทดสอบ ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 รูปคลื่นแรงดันเกินขั้วบวกที่ผ่านเข้าสู่แหล่งจ่าย Line - Neutral



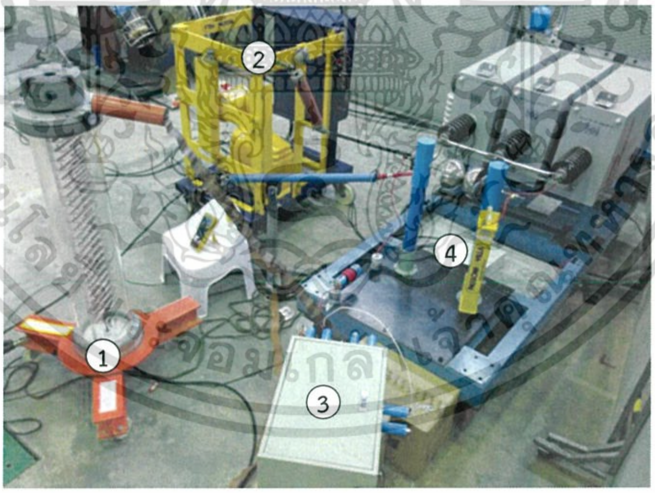
รูปที่ 4.18 รูปคลื่นแรงดันเกินขั้วลบที่ผ่านเข้าสู่แหล่งจ่าย Line - Neutral

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบวงจรคัปปลิ้ง และดีคัปปลิ้งเพื่อหาแรงดันเกินคงเหลือที่ผ่านเข้าสู่แหล่งจ่ายทั้ง 3 กรณีข้างต้น พบว่าเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5 ที่กำหนดไว้ว่าแรงดันเกินจะผ่านเข้าสู่แหล่งจ่ายได้ไม่เกิน 15% ของค่าสูงสุดของแรงดันทดสอบขณะไม่ได้ต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้า และอุปกรณ์ทดสอบ หรือไม่เกินสองเท่าของค่าสูงสุดของแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้าระบบแรงดันต่ำ โดยให้ค่าที่สูงกว่าเป็นเกณฑ์ จากผลการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ 10 kV แรงดันเกินที่ผ่านเข้าสู่แหล่งจ่ายจะต้องไม่เกิน 1.5 kV ซึ่งผลการทดสอบทั้ง 3 กรณีพบว่าแรงดันเกินคงเหลือมีค่าสูงสุด 1.092 kV หรือประมาณ 10.92% ในกรณีทดสอบ Line – Neutral

4.3.2 การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

เพื่อเป็นการทดสอบความสามารถของวงจรกรองและเครื่องควบคุมสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน จึงทำการทดสอบสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยนำเครื่องควบคุมสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน ต่อเข้ากับชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน เพื่อควบคุมมุมของการจุดชนวนให้แรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ตามมุมที่ต้องการ ในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบที่มุม 0 องศา 90 องศา 180 องศา และ 270 องศา โดยวงจรการทดสอบและวงจรสมมูลของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ

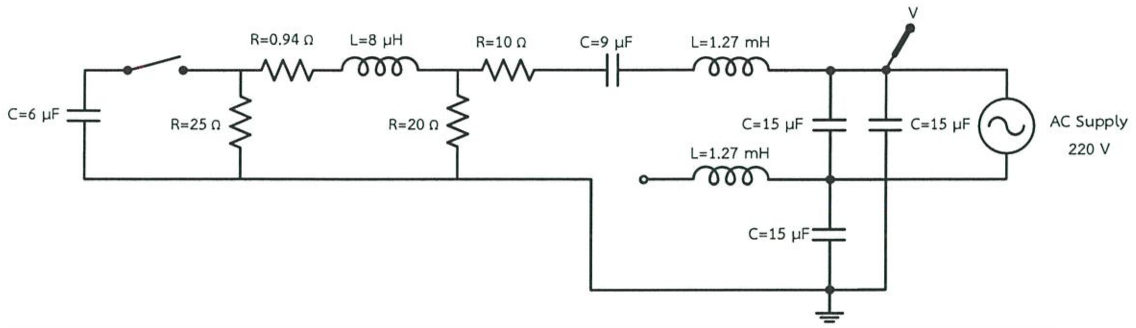


รูปที่ 4.19 วงจรการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมในกรณีสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

1) โวลเตจดิไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันสูง 2) ชุดหม้อแปลงอัดประจุ

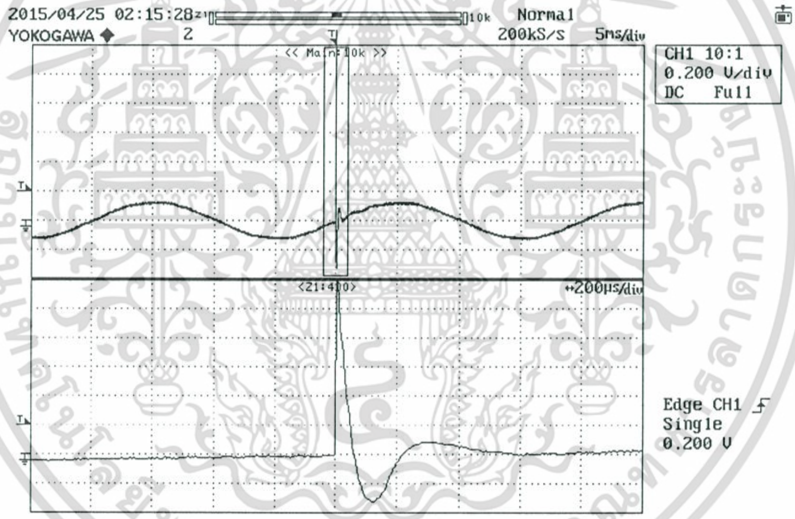
3) ชุดวงจรกรอง 4) เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 วงจรสมมูลของการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

การทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 0 องศา ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.21



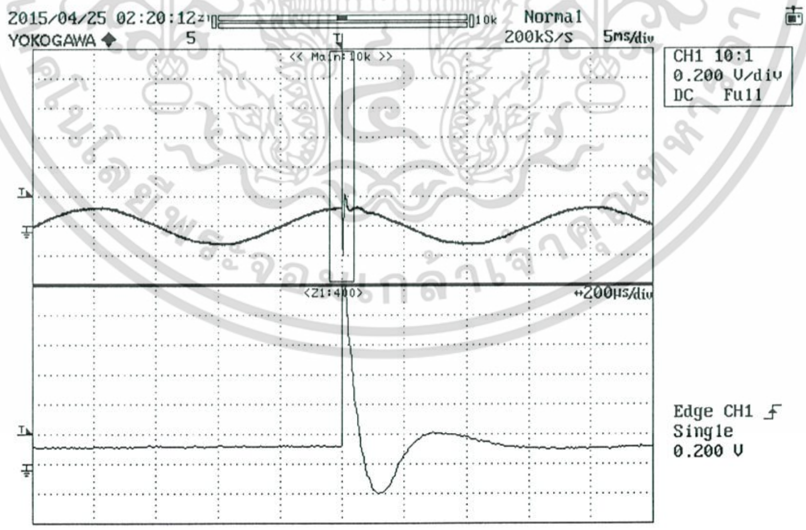
ก) แรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) แรงดันอิมพัลส์ขั้วลบทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 0 องศา

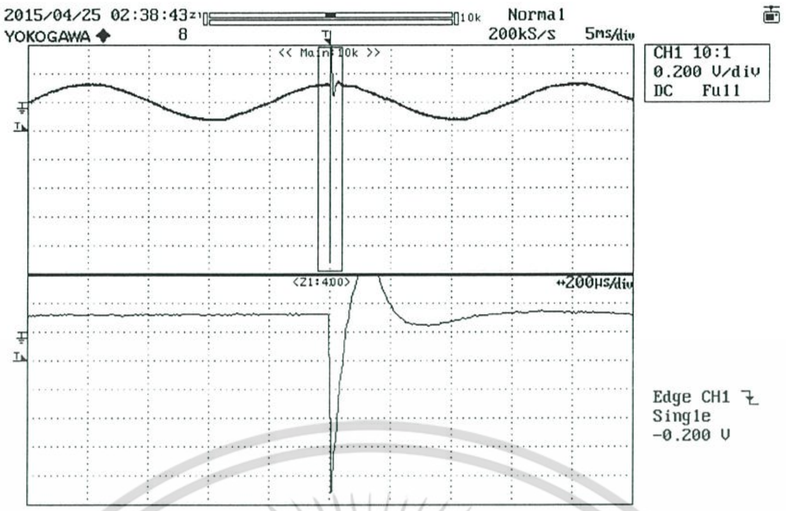
รูปที่ 4.21 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 0 องศา

การทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 90 องศา ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.22



ก) แรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 90 องศา

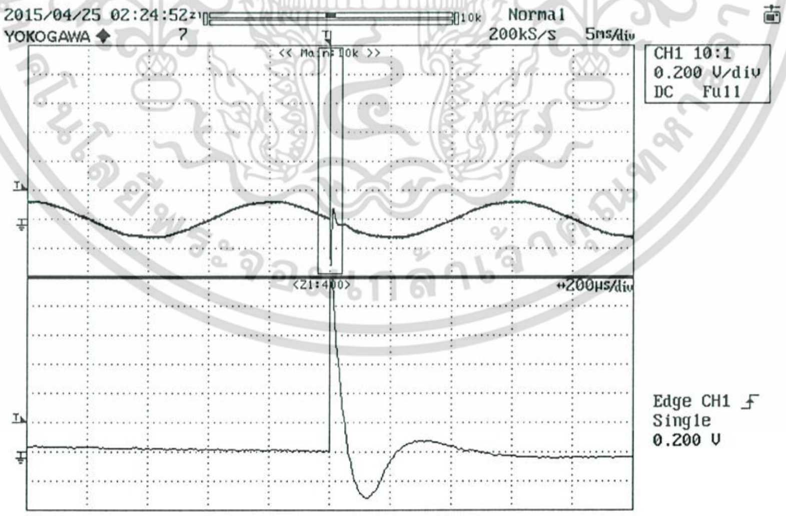
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) แรงดันอิมพัลส์ขั้วลบทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 90 องศา

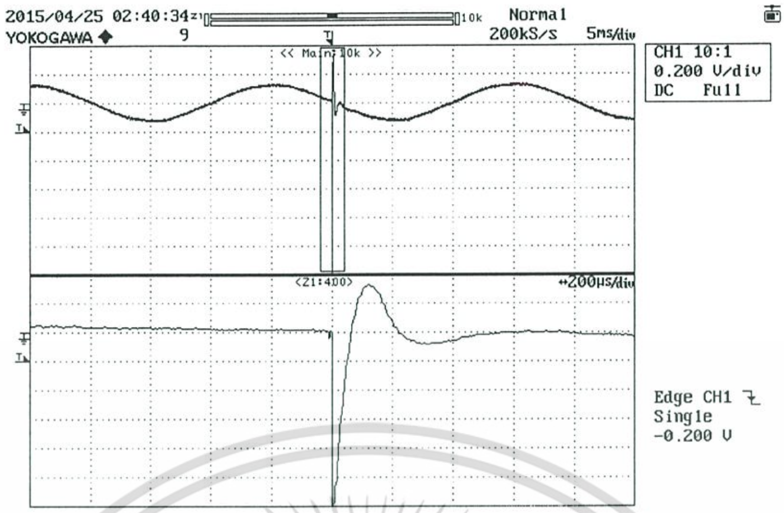
รูปที่ 4.22 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 90 องศา

การทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 180 องศา ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.23



ก) แรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 180 องศา

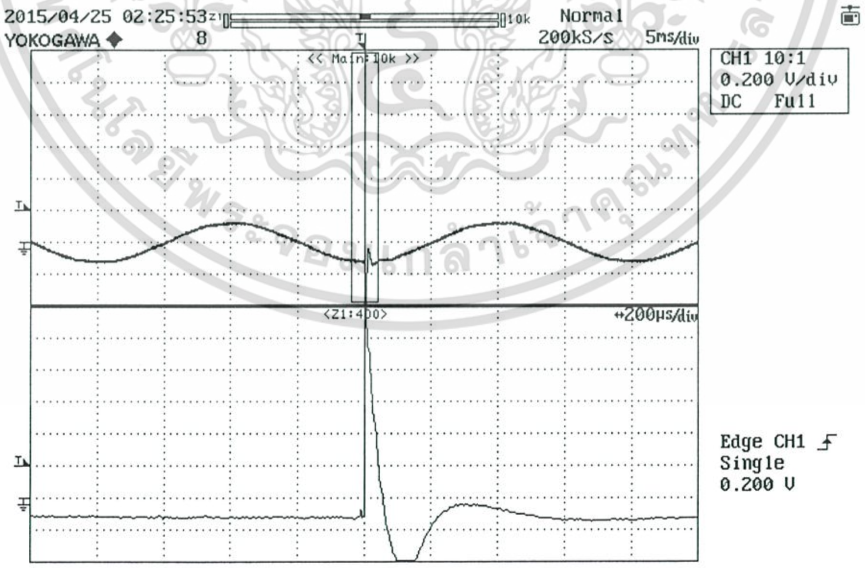
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) แรงดันอิมพัลส์ขั้วลบทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 180 องศา

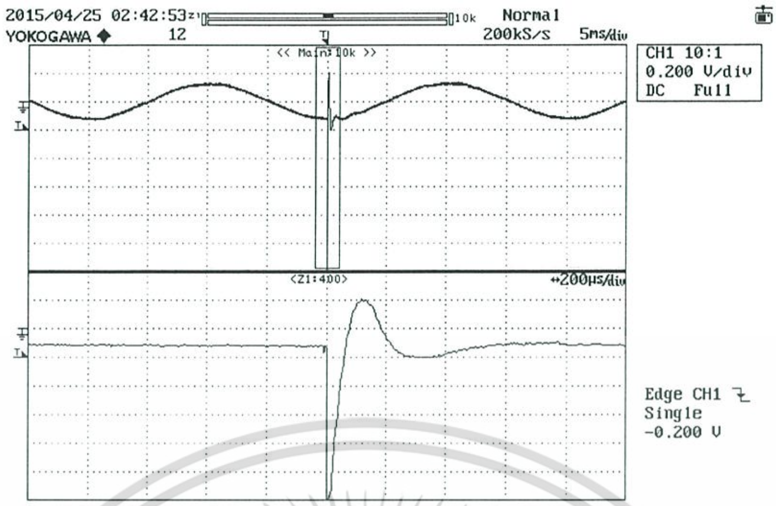
รูปที่ 4.23 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 180 องศา

การทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 270 องศา ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.24



ก) แรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้านกระแสสลับที่มุม 270 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) แรงดันอิมพัลส์ขั้วลบทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 270 องศา

รูปที่ 4.24 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุม 270 องศา

จากผลการทดสอบความสามารถของวงจรกรองและเครื่องควบคุมสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน โดยทดสอบที่มุม 0 องศา 90 องศา 180 องศา และ 270 องศา พบว่าการควบคุมมุมของการจุดชนวนแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ สามารถจุดชนวนลงบนมุมของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับตรงตามมุมที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ

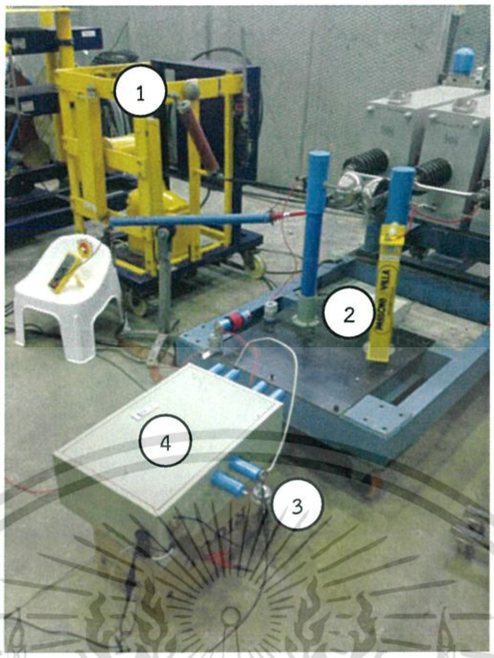
4.4 การทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่ต่อเข้าไปในระบบโดยรวมตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5

4.4.1 การทดสอบแยกระบบ โดยไม่ต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้า

4.4.1.1 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V (Arrester 480 V) ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล กรณี Line – Ground

เพื่อเป็นการทดสอบความสามารถในการป้องกันแรงดันเกินของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ในกรณีการต่อวงจรแบบคอมมัล จึงทดสอบด้วยการจ่ายแรงดันอิมพัลส์ 10 kV ระหว่าง Line – Ground ซึ่งปลดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ หรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงออก และใช้โพรบวัดแรงดัน (Voltage probe) อัตราการลดทอน 100 เท่า พิกัด 2500 V เป็นอุปกรณ์ในการวัดรูปคลื่นแรงดัน วงจรทดสอบและวงจรสมมูลของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ โดยทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ

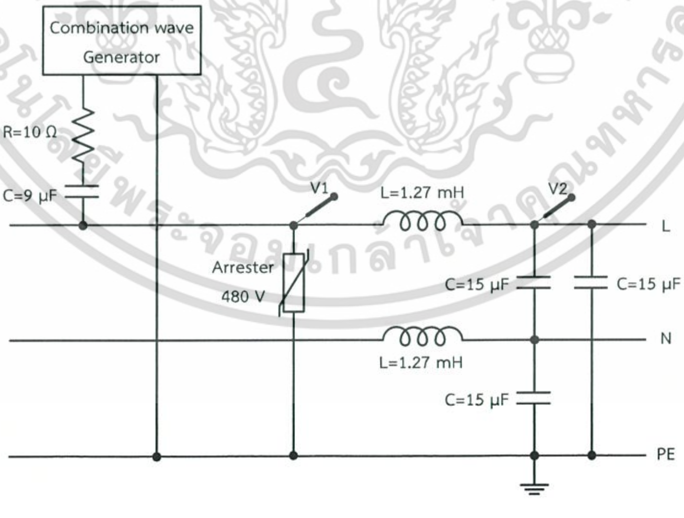
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 วงจรการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล ในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line - Ground

1) ชุดหม้อแปลงอัดประจุ 2) เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

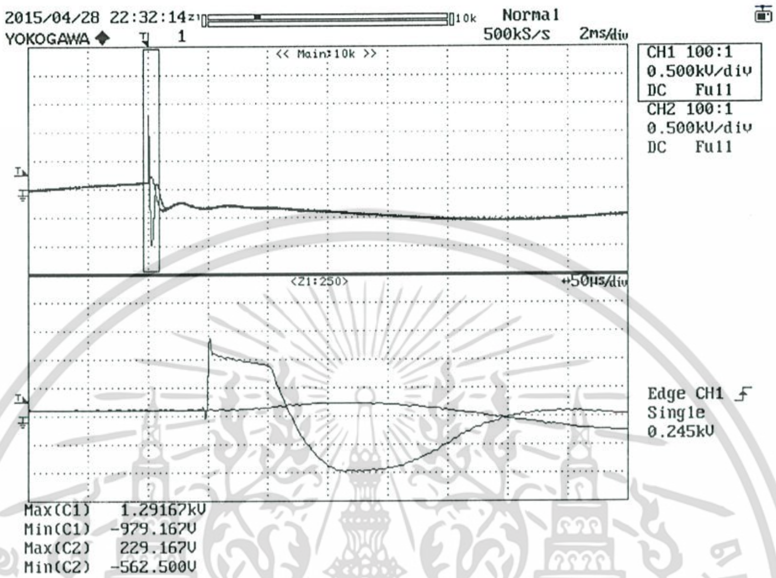
3) อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V 4) ชุดวงจรกรอง



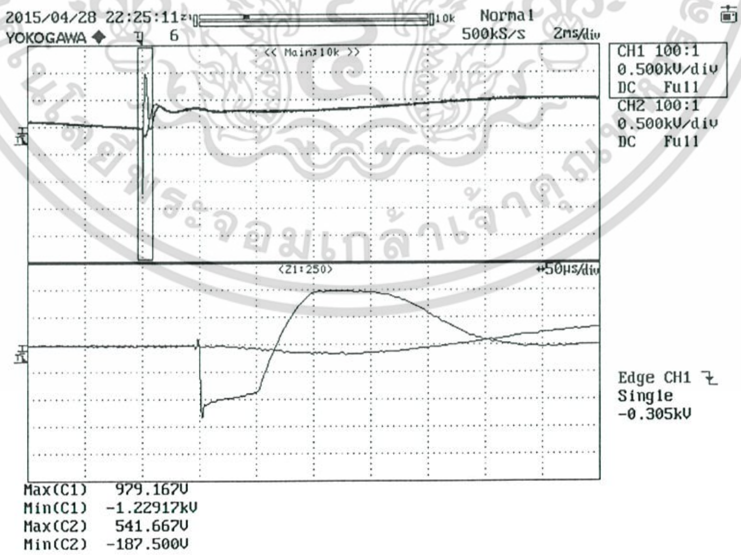
รูปที่ 4.26 วงจรสมมูลของการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัลในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล คือ จ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground และปลดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ หรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงออก ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.27 และ 4.28 ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ต่อวงจรแบบคอมมัล เมื่ออัดประจุด้วยแรงดันขั้วบวก โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Ground

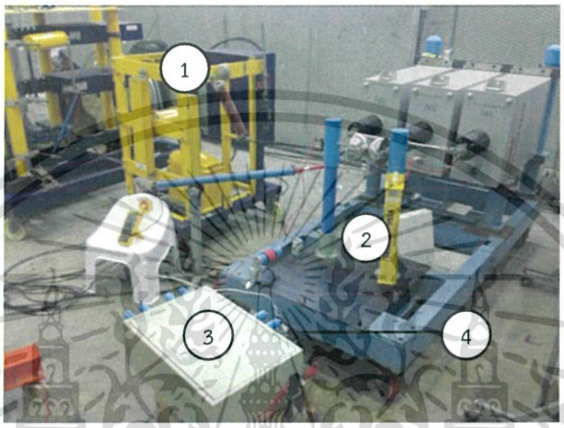


รูปที่ 4.28 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ต่อวงจรแบบคอมมัล เมื่ออัดประจุด้วยแรงดันขั้วลบ โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Ground

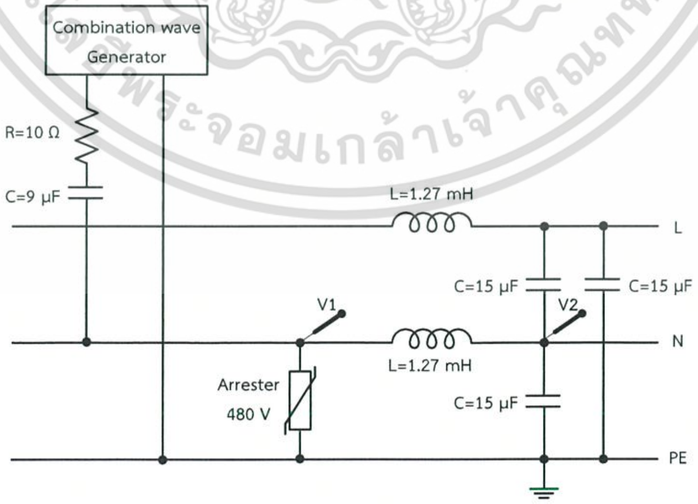
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.2 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V (Arrester 480 V) ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล กรณี Neutral – Ground

ทดสอบโดยการจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Neutral – Ground และปลดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ หรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงออก ซึ่งวงจรทดสอบและวงจรสมมูลของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.29 และ 4.30 ตามลำดับ โดยทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ



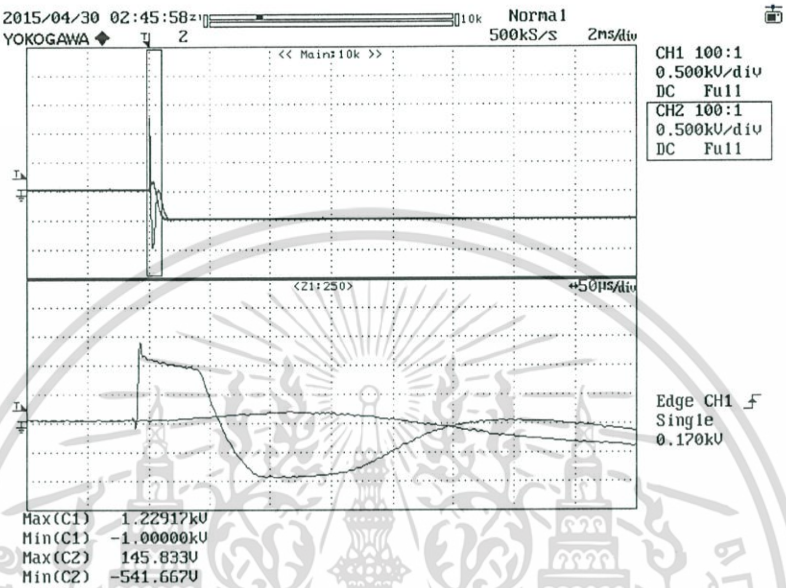
รูปที่ 4.29 วงจรการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัลในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Neutral – Ground
1) ชุดหม้อแปลงอัดประจุ 2) เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม
3) ชุดวงจรกรอง 4) อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V



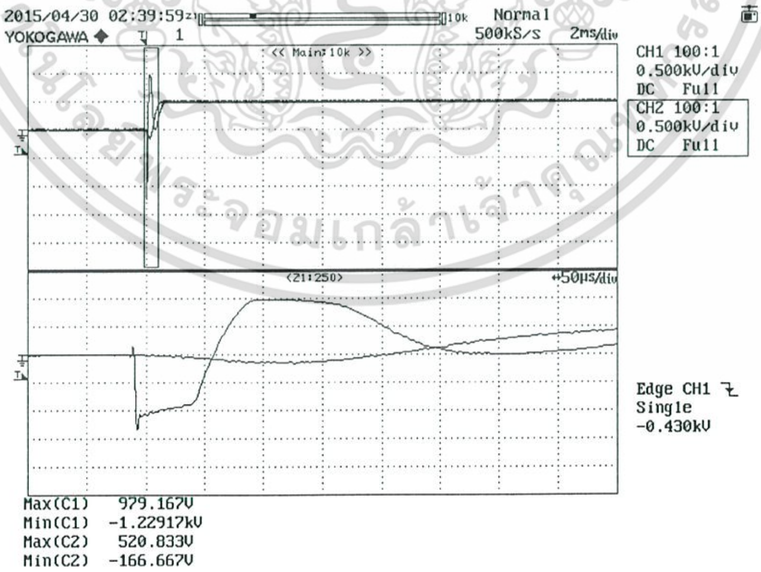
รูปที่ 4.30 วงจรสมมูลของการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัลในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Neutral – Ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล คือ จ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Neutral – Ground และปลดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ หรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงออก ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.31 และ 4.32 ตามลำดับ



รูปที่ 4.31 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ต่อวงจรแบบคอมมัล เมื่ออัดประจุด้วยแรงดันขั้วบวก โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Neutral – Ground

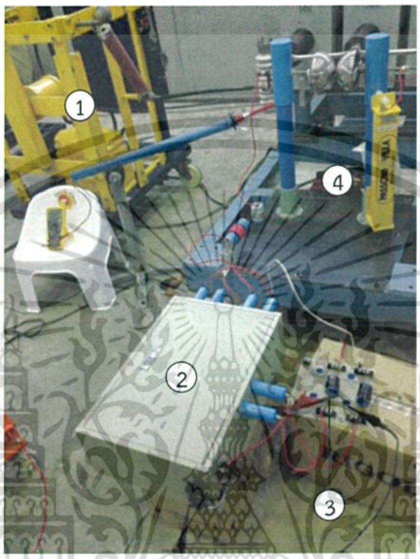


รูปที่ 4.32 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ต่อวงจรแบบคอมมัล เมื่ออัดประจุด้วยแรงดันขั้วลบ โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Neutral – Ground

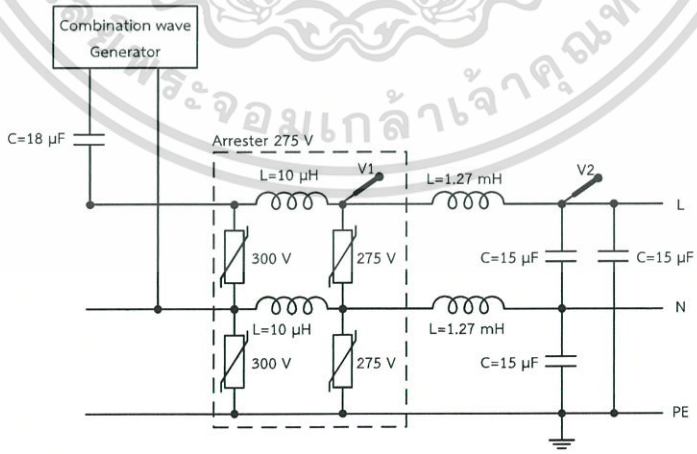
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.3 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V (Arrester 275 V) ด้วยการต่อวงจรแบบนอร์มัล กรณี Line – Neutral

ทดสอบโดยการจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Neutral และปลดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ หรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงออก ซึ่งวงจรทดสอบและวงจรสมมูลของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.33 และ 4.34 ตามลำดับ โดยทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ



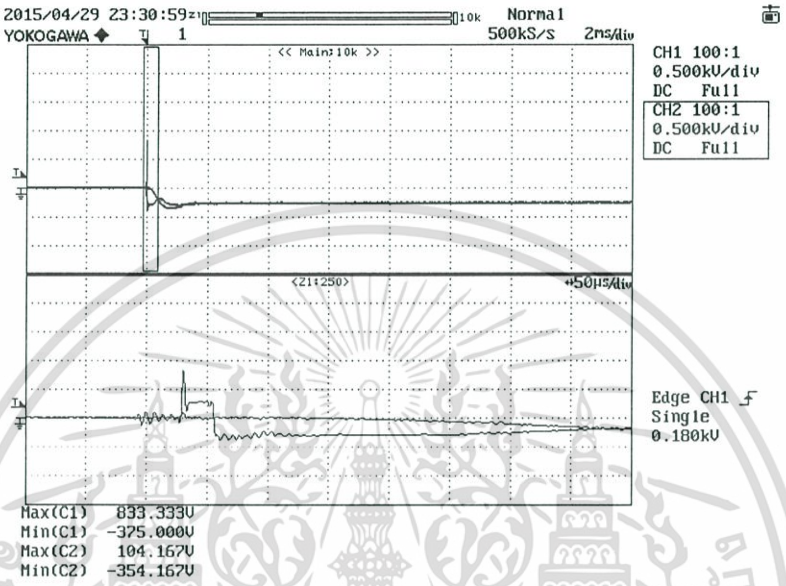
รูปที่ 4.33 วงจรการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบนอร์มัล
1) ชุดหม้อแปลงอัดประจุ 2) ชุดวงจรกรอง
3) อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V 4) เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม



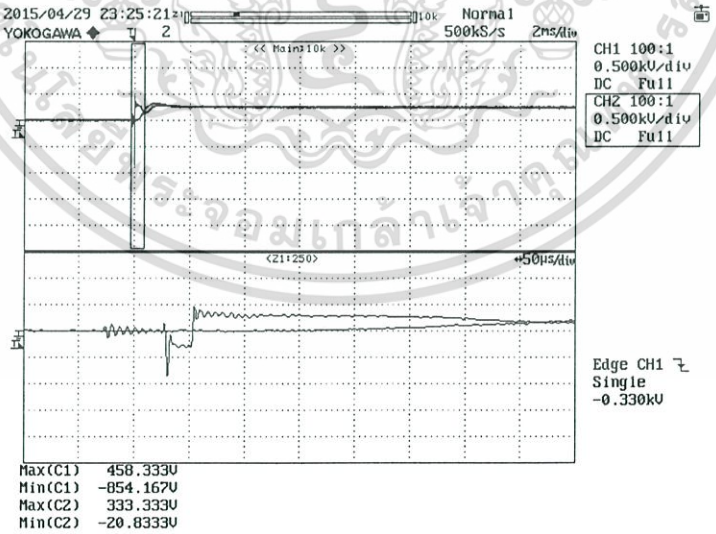
รูปที่ 4.34 วงจรสมมูลของการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบนอร์มัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบนอร์มัล คือ จ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line - Neutral และปลดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ หรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงออก ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.35 และ 4.36 ตามลำดับ



รูปที่ 4.35 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ต่อวงจรแบบนอร์มัล เมื่ออัดประจุด้วยแรงดันขั้วบวก โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Neutral

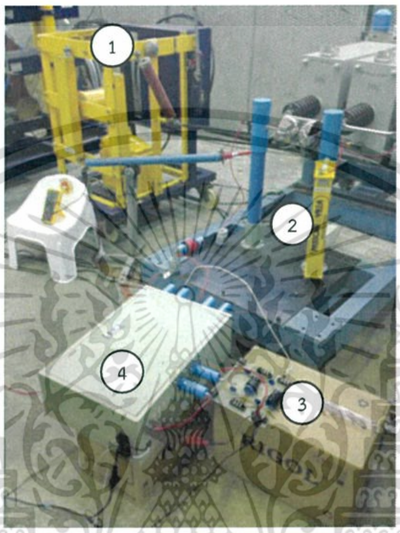


รูปที่ 4.36 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ต่อวงจรแบบนอร์มัล เมื่ออัดประจุด้วยแรงดันขั้วลบ โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Neutral

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.4 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V (Arrester 275 V) ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล กรณี Line – Ground

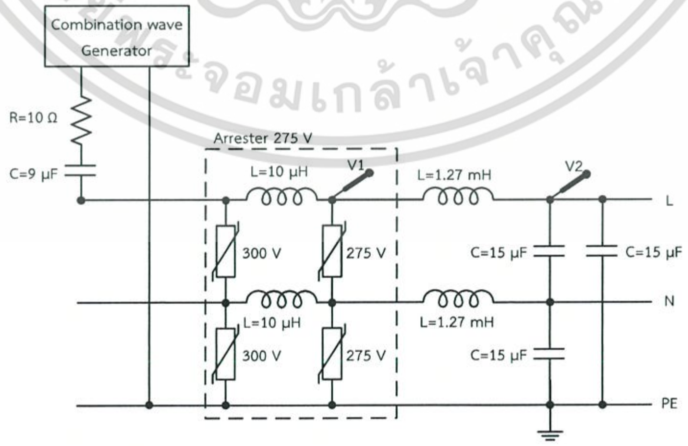
ทดสอบโดยการจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground และปลดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ หรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงออก ซึ่งวงจรทดสอบและวงจรสมมูลของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.37 และ 4.38 ตามลำดับ โดยทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ



รูปที่ 4.37 วงจรการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล ในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground

1) ชุดหม้อแปลงอัดประจุ 2) เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

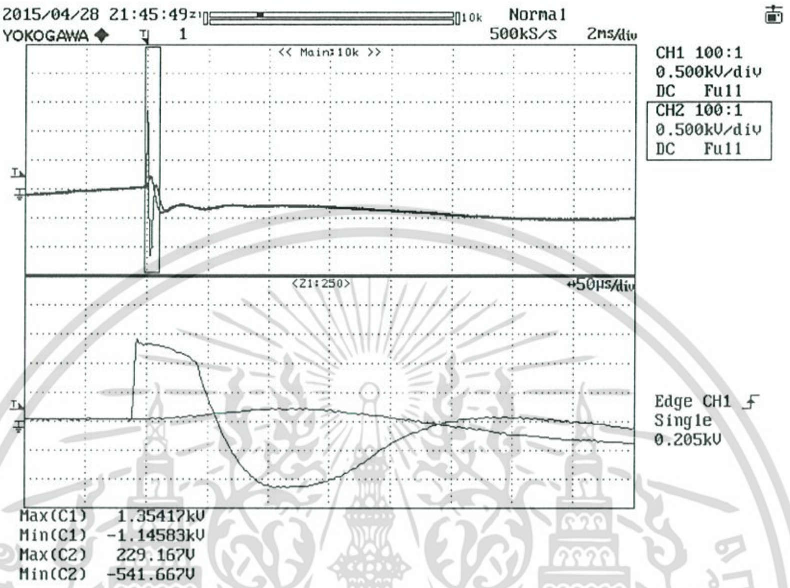
3) อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V 4) ชุดวงจรกรอง



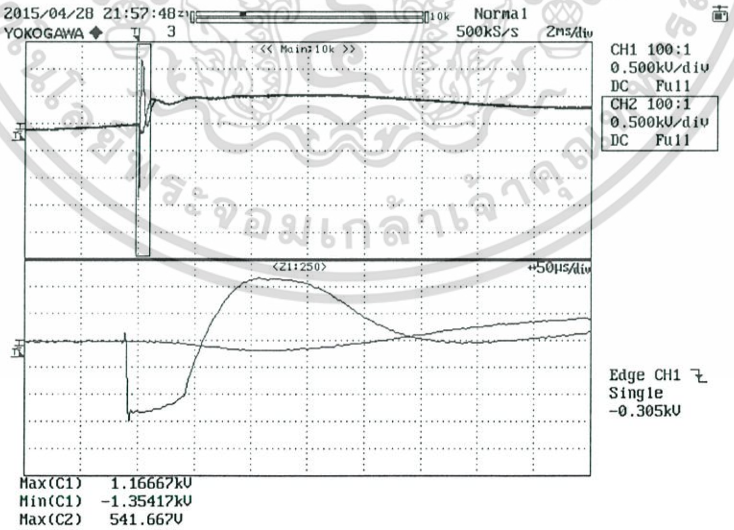
รูปที่ 4.38 วงจรสมมูลของการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัลในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล คือ จ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line - Ground และปลดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ หรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงออก ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.39 และ 4.40 ตามลำดับ



รูปที่ 4.39 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ต่อวงจรแบบคอมมัล เมื่ออัดประจุด้วยแรงดันขั้วบวก โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Ground

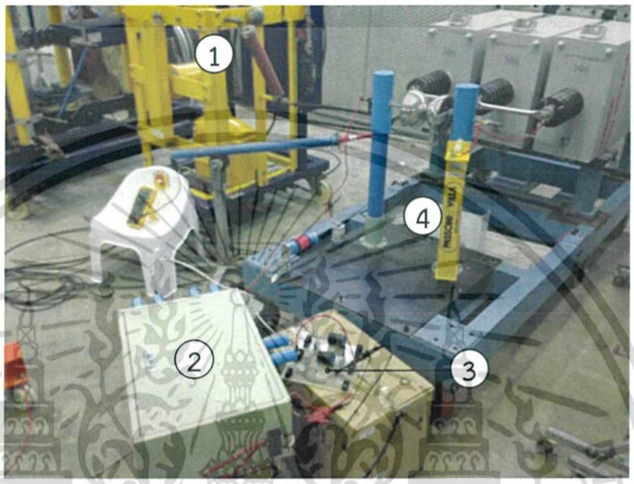


รูปที่ 4.40 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ต่อวงจรแบบคอมมัล เมื่อชาร์จแรงดันขั้วลบ โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Ground

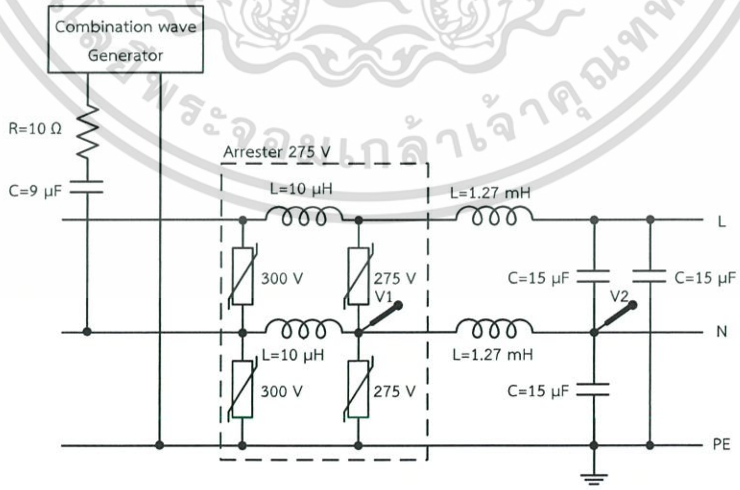
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.5 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V (Arrester 275 V) ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล กรณี Neutral – Ground

ทดสอบโดยการจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Neutral – Ground และปลดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ หรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงออก ซึ่งวงจรการทดสอบและวงจรสมมูลของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.41 และ 4.42 ตามลำดับ โดยทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ



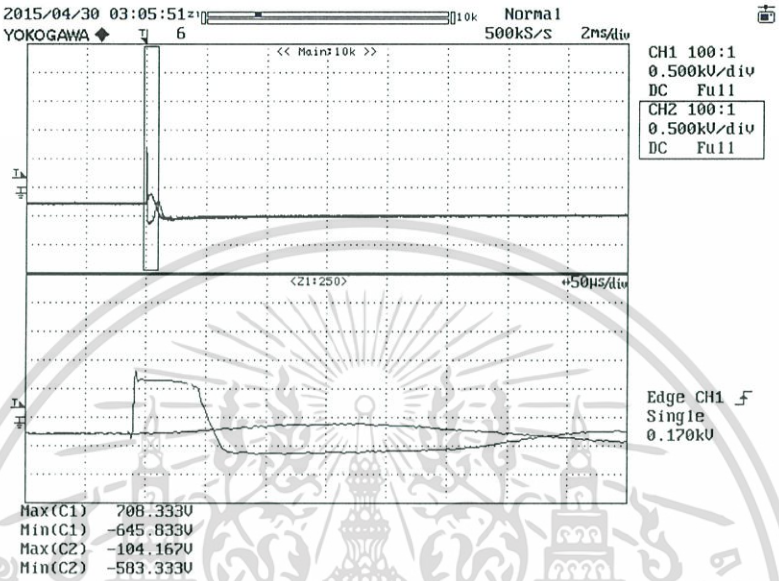
รูปที่ 4.41 วงจรการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัลในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Neutral – Ground
1) ชุดหม้อแปลงอัดประจุ 2) ชุดวงจรกรอง
3) อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V 4) เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม



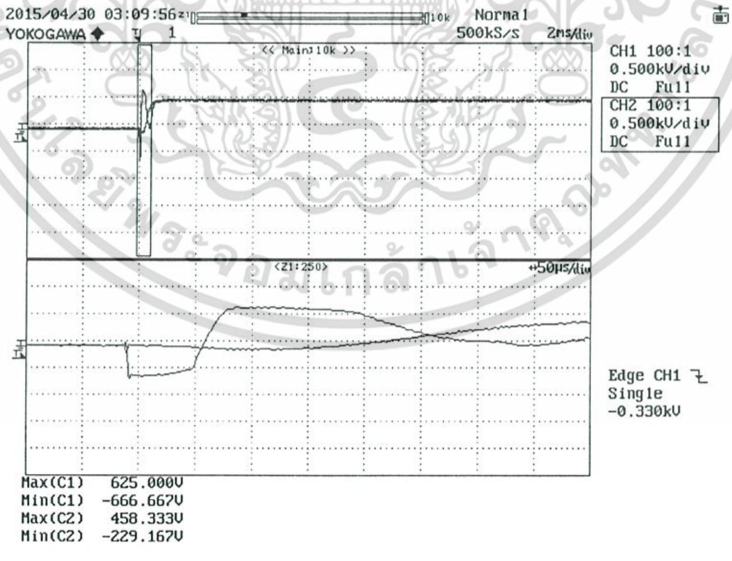
รูปที่ 4.42 วงจรสมมูลของการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัลในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Neutral – Ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล คือ จ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Neutral - Ground และปลดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ หรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงออก ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.43 และ 4.44 ตามลำดับ



รูปที่ 4.43 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ต่อวงจรแบบคอมมัล เมื่ออัดประจุด้วยแรงดันขั้วบวก โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Neutral – Ground



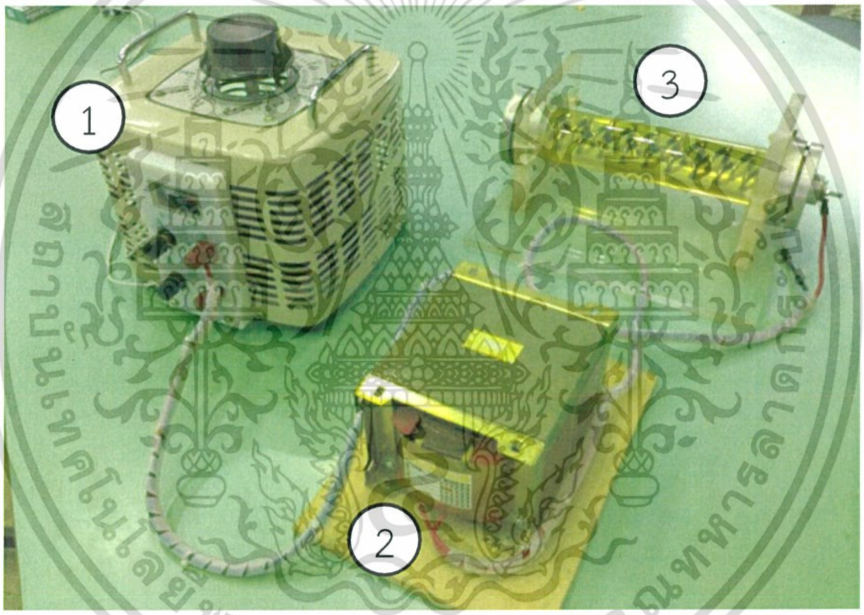
รูปที่ 4.44 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ต่อวงจรแบบคอมมัล เมื่ออัดประจุด้วยแรงดันขั้วลบ โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Neutral – Ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ทดสอบระบบโดยรวม แบบต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 380 V หรือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V

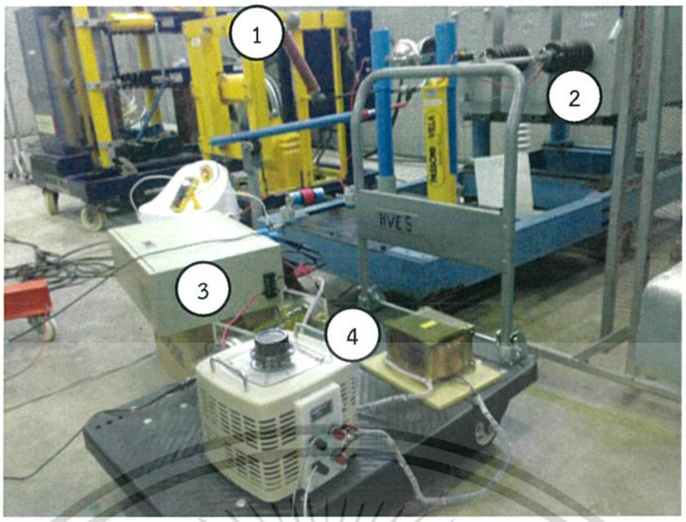
4.4.2.1 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V (Arrester 480 V) ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล กรณี Line – Ground

ทดสอบโดยการจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground ซึ่งมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 380 V ต่ออยู่ โดยทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ในกรณีที่ทดสอบโดยการชาร์จแรงดันขั้วลบ จะต้องเปลี่ยนขั้วของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 380 V เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง -380 V ซึ่งมีวงจรสร้างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 4.45 มีวงจรการทดสอบและวงจรสมมูลของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.46 และ 4.47 ตามลำดับ

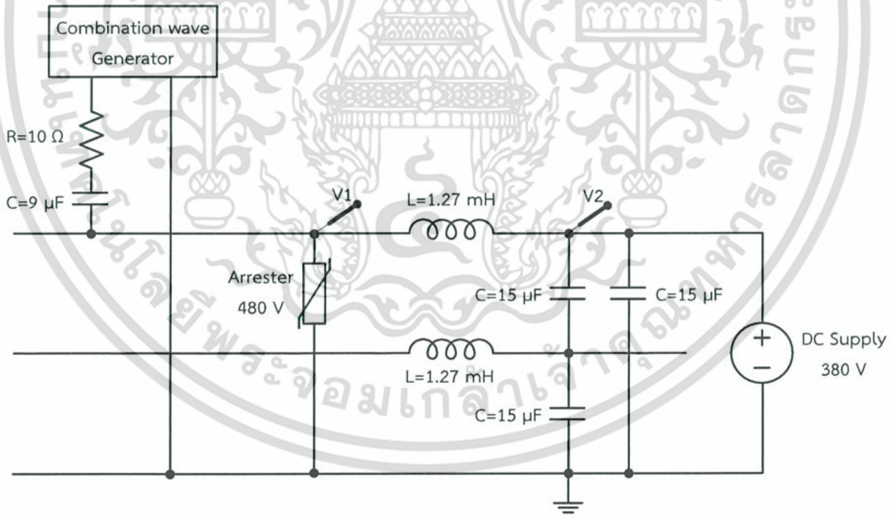


รูปที่ 4.45 วงจรสร้างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
1) หม้อแปลงปรับค่าได้ 2) หม้อแปลง 220/1000 V 3) ไดโอดเรียงกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



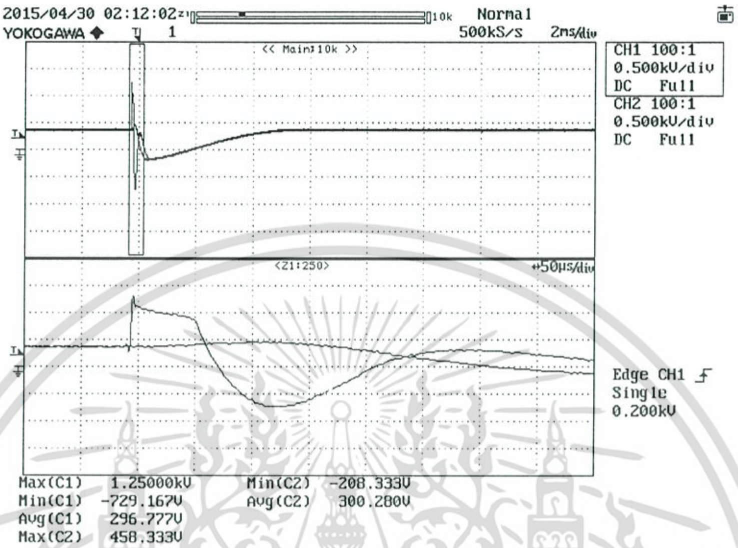
รูปที่ 4.46 วงจรการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล ในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground ซึ่งต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 380 V
1) ชุดหม้อแปลงอัดประจุ 2) เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม
3) ชุดวงจรกรอง 4) วงจรสร้างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



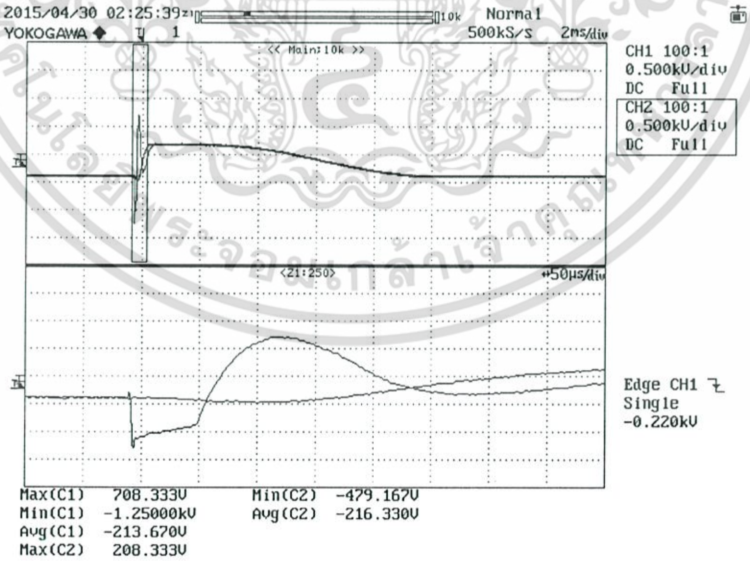
รูปที่ 4.47 วงจรสมมูลของการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัลในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground ซึ่งต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 380 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ด้วยการต่อวงจรแบบคอมมัล คือ จ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Ground โดยมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 380 V ต่ออยู่ ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.48 และ 4.49 ตามลำดับ



รูปที่ 4.48 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ต่อวงจรแบบคอมมัล ซึ่งต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 380 V เมื่อชาร์จแรงดันขั้วบวก โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Ground

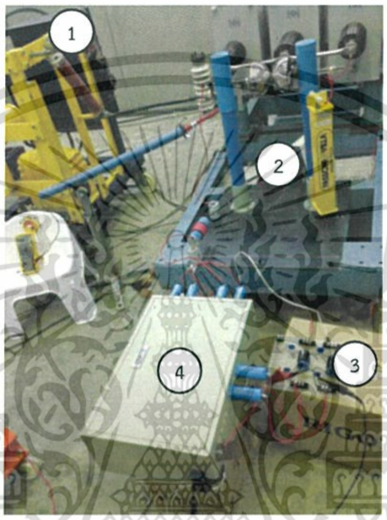


รูปที่ 4.49 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 480 V ต่อวงจรแบบคอมมัล ซึ่งต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 380 V เมื่อชาร์จแรงดันขั้วลบ โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Ground

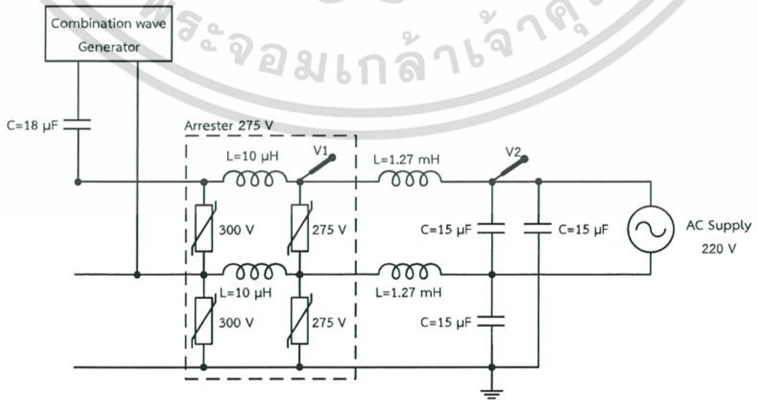
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2.2 ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V (Arrester 275 V) ด้วยการต่อวงจรแบบนอร์มัล กรณี Line – Neutral

ทดสอบโดยการจ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Neutral ซึ่งมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V ต่ออยู่ เพื่อเป็นการทดสอบในกรณีที่ร้ายแรงที่สุดจึงทำการทดสอบที่มุม 90 องศา ด้วยแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก และมุม 270 องศา ด้วยแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ มีวงจรการทดสอบและวงจรสมมูลของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.50 และ 4.51 ตามลำดับ



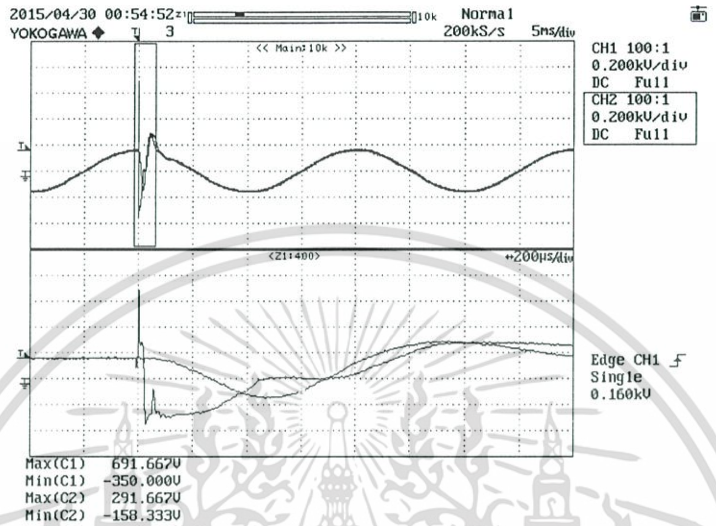
รูปที่ 4.50 วงจรการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบนอร์มัล ซึ่งต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V
1) ชุดหม้อแปลงอัดประจุ 2) เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม
3) อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V 4) ชุดวงจรกรอง



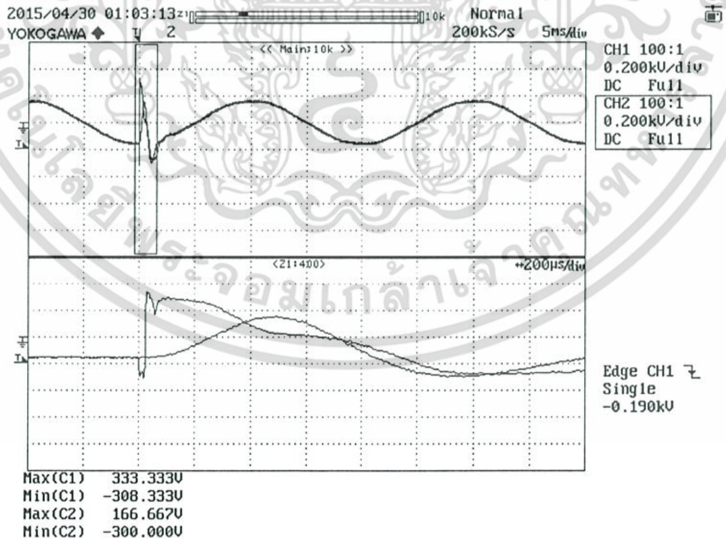
รูปที่ 4.51 วงจรสมมูลของการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบนอร์มัล ซึ่งต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ด้วยการต่อวงจรแบบนอร์มอล คือ จ่ายแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง Line – Neutral โดยมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V ต่ออยู่ ที่มุม 90 องศา และมุม 270 องศา ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.52 และ 4.53 ตามลำดับ



รูปที่ 4.52 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ต่อวงจรแบบนอร์มัล ซึ่งต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เมื่อชาร์จแรงดันขั้วบวก โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Neutral



รูปที่ 4.53 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V ต่อวงจรแบบนอร์มัล ซึ่งต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เมื่อชาร์จแรงดันขั้วลบ โดยจ่ายแรงดันระหว่าง Line – Neutral

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดสอบ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

ในระบบไฟฟ้านั้นโดยทั่วไปมีโอกาสเกิดแรงดันเกินขึ้นได้ ซึ่งอาจเกิดจากฟ้าผ่า หรือจากการตัดต่อวงจรของสวิตช์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ สามารถแบ่งชนิดของแรงดันเกินได้ 2 ชนิด คือ แรงดันเกินฟ้าผ่าและแรงดันเกินสวิตช์ชิ่ง ดังนั้นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งานในระบบไฟฟ้าอาจมีโอกาสที่จะได้รับแรงดันเกิน และอาจเกิดความเสียหายได้ จึงควรมีการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกิน และกระแสซึ่งเกิดจากแรงดันเกินก่อนนำไปใช้งาน เพื่อให้มั่นใจว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าของเรานั้นสามารถทนต่อแรงดันเกินได้ในระดับหนึ่ง การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าจะแบ่งการทดสอบออกเป็นหลายชนิด เช่น การทดสอบด้วยคลื่นแกว่ง การทดสอบระดับความคงทนได้ต่อแรงดัน และทดสอบด้วยรูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแส ในการทดสอบด้วยรูปคลื่นแรงดัน และรูปคลื่นกระแสนั้นยังแบ่งเป็น การทดสอบด้วยคลื่นแกว่ง การทดสอบด้วยรูปคลื่นผสมเป็นต้น ซึ่งขึ้นกับแต่ละมาตรฐานกำหนดด้วย

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการออกแบบและประกอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 10 kV 5 kA ที่สามารถนำไปทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินด้านระบบแรงดันต่ำด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/50 µs ตั้งแต่ระดับแรงดัน 0.5 kV ถึง 10 kV และกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20 µs ตั้งแต่ระดับกระแส 0.25 kA ถึง 5 kA ซึ่งสามารถทำการกำหนดมุมจุดชนวนได้ตามที่ต้องการโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมมุมจุดชนวน รวมทั้งนำเสนอวิธีการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมกรณีการสร้างรูปคลื่นมาตรฐานของแรงดันและกระแสอิมพัลส์ เพื่อยืนยันความสามารถในการจ่ายแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมที่พิกัดของเครื่องกำเนิด และนำเสนอวิธีการทดสอบวงจรกรองความถี่ซึ่งประกอบด้วยวงจรคัปลิงและดีคัปลิง เพื่อยืนยันความสามารถของวงจรกรองความถี่ตามที่มาตรฐานกำหนดในการป้องกันแรงดันเกินที่จะเข้าสู่ระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ ทั้งกรณีต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่พลังงาน (50 Hz) หรือกรณีต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และในการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน มาตรฐานได้กำหนดมุมของแรงดันกระแสสลับเอาไว้ ดังนั้นจึงได้นำเสนอวิธีการทดสอบการจ่ายแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ (Superimpose) เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน (Trigatron) ในการกำหนดมุมของการจุดชนวน และท้ายสุดคือการนำเสนอวิธีการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน โดยต่อเข้ากับระบบโดยรวม ซึ่งประกอบด้วย 1.วงจรกรองความถี่ 2.ชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานที่สามารถกำหนดมุมจุดชนวนได้ 3.แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่พลังงาน หรือแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อยืนยันประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมกรณีการสร้างรูปคลื่นมาตรฐานของแรงดันและกระแสอิมพัลส์ ผลการทดสอบพบว่ารูปคลื่นแรงดันและกระแสอิมพัลส์ มีค่าองค์ประกอบเวลาของรูปคลื่นตรงตามที่มาตรฐานกำหนด สามารถนำรูปคลื่นแรงดันและกระแสอิมพัลส์ที่ได้จากเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมไปใช้ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินได้ และในส่วนของการทดสอบวงจรกรองความถี่ ผลการทดสอบพบว่าสามารถลดแรงดันเกินที่ผ่านเข้าสู่แหล่งจ่ายให้อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดไว้ได้ และสามารถใช้วงจรกรองความถี่นี้เป็นวงจรกรองในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับได้อีกด้วย ซึ่งในส่วนของการทดสอบการจ่ายแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ผลการทดสอบพบว่าชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมที่ทำการออกแบบและประกอบสร้างขึ้นนั้น สามารถสั่งจุดชนวนลงบนมุมที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ และเมื่อทำการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินโดยต่อเข้ากับระบบโดยรวมแล้ว ผลการทดสอบพบว่าสามารถทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินด้านระบบแรงดันต่ำได้โดยไม่เกิดผลกระทบต่อระบบโดยรวม ทั้งเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม วงจรกรองความถี่ ชุดเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน และแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ หรือแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ยังคงมีประสิทธิภาพสามารถใช้งานได้ต่อไป

5.2 อุปสรรคและวิธีการแก้ไขในโครงงาน

อุปสรรคที่พบได้ในการดำเนินโครงงานและการแก้ปัญหาต่างๆ ดังนี้

1. ในการติดตั้งตัวต้านทาน R_{s1}, R_{s2}, R_m และตัวเหนี่ยวนำ L_r ที่มีลักษณะเป็นวงรอบปิด (loop) หากพื้นที่ภายในมีค่ามาก จะทำให้เป็นวงรอบปิดที่ก่อให้เกิดความเหนี่ยวนำแฝง (loop inductance) ซึ่งส่งผลต่อรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs ให้ผิดเพี้ยนไป สามารถแก้ไขโดยทำให้พื้นที่ภายในวงรอบปิดมีค่าน้อยที่สุดแต่ยังคงต้องคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าที่อาจจะทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้

2. สัญญาณรบกวนภายในกล่องควบคุมที่ประกอบด้วยไมโครคอนโทลเลอร์ควรจัดสายไฟแรงดันกระแสสลับ 220 V ให้เหมาะสม เพื่อป้องกันไม่ให้ส่งผลกระทบด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปรบกวนสายสัญญาณ ซึ่งอาจทำให้ไมโครคอนโทลเลอร์และส่วนแสดงผลต่างๆ ของกล่องควบคุมทำงานผิดพลาด

3. เนื่องจากวงจรสวิตซ์อิเล็กทรอกนิกส์และวงจรทวีแรงดันจะต้องใช้กราวด์ร่วมกัน ดังนั้นต้องกำหนดให้ด้านกราวด์ของวงจรทวีแรงดันต่อเข้ากับเส้น Neutral ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เพราะหากให้กราวด์ของวงจรทวีแรงดันต่อเข้ากับเส้น Line จะทำให้เกิดความเสียหายต่อสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์จนไม่สามารถใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในกรณีการทดสอบแบบ Line-Neutral ทั้งชุดหม้อแปลงอัดประจุ และเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมนั้นจะไม่ได้ถูกต่อลงหลักดินทำให้มีความอันตรายอย่างยิ่งต่อผู้ทำการทดสอบ และเครื่องควบคุมต่างๆ ดังนั้นควรให้ วงจรกรอง เครื่องควบคุมการจุดชนวน และเครื่องควบคุมการขึ้นแรงดันอัดประจุมีการต่อลงหลักดินอย่างแน่นหนา เพื่อป้องกันปัญหาแรงดันเกินที่จะเข้าสู่กล่องควบคุมต่างๆ ทางสายเคเบิ้ลซึ่งเป็นการนำไปสู่ความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับวงจรภายในกล่องควบคุม และกับผู้ทำการทดสอบเอง

ในอนาคตสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและพิกัดแรงดันของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม ด้วยการเพิ่มพิกัดแรงดันและกระแสของตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทานทั้งสามตัว เพราะตัวเก็บประจุอัดแรงดันมีพิกัดสูงสุดถึง 75 kV

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, มีนาคม 2549.

[2] กิตติชัย แก้วคำ และคณะ, เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับพิกัด 6 kV, **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551

[3] IEC 60060-1, **High-voltage test techniques**, Part 1, General definitions and test requirements. 2010-09

[4] นวคุณ ไตรรัตนาภิรักษ์ และคณะ, เครื่องกาเนิดกระแสอิมพัลส์, **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554

[5] IEC 61000-4-5, **Electromagnetic compatibility (EMC)** , Part 4-5, Testing and measurement techniques surge immunity test. 2005-11

[6] IEC 62475, **High-current test techniques** , Definition and requirements for test currents and measuring systems. 2010-09

[7] กมล กำธรเจริญ, การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม 6 กิโลโวลต์ 3 กิโลแอมป์, **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544

[8] Go Portrait, 2557, สรุปวงจรทวีแรงดัน (Voltage Multiplier Circuit Summary), (ออนไลน์), แหล่งที่มา : http://electronicspocketbook.blogspot.com/2014/02/voltage-multiplier-circuit-summary.html (28 ตุลาคม 2557)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

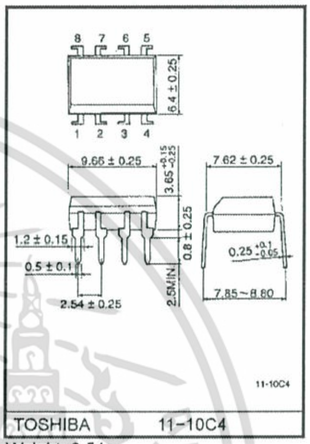
ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250

TOSHIBA PHOTOCOUPLER GaAlAs IRED & PHOTO-IC

TLP250(INV)

TRANSISTOR INVERTER
INVERTERS FOR AIR CONDITIONER
IGBT GATE DRIVE
POWER MOS FET GATE DRIVE

Unit in mm



Weight: 0.54 g

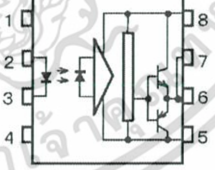
The TOSHIBA TLP250(INV) consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.
This unit is 8-lead DIP.
TLP250(INV) is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input Threshold Current : I_F=5mA(MAX)
- Supply Current(ICC) : 11mA(MAX)
- Supply Voltage(VCC) : 10~35V
- Output Current(IO) : ±2.0A(MAX)
- Switching Time(tpLH/tpHL) : 0.5μs(MAX)
- Isolation Voltage : 2500Vrms
- UL Recognized : UL1577,File No.E67349
- Option(D4)
  - VDE Approved : DIN VDE0884/06.92 Certificate No.76823
  - Maximum Operating Insulation Voltage : 630V_{PK}
  - Highest Permissible Over Voltage : 4000V_{PK}
  - **(Note):When a VDE0884 approved type is needed, Please designate the "Option(D4)"**
- Creepage Distance : 6.4mm(MIN)
  Clearance : 6.4mm(MIN)

TRUTH TABLE

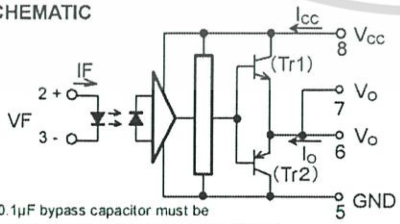
		Tr 1	Tr 2
INPUT LED	ON	ON	OFF
	OFF	OFF	ON

PIN CONFIGURATION(TOP VIEW)



1:N.C.
2: ANODE
3:CATHODE
4:N.C.
5:GND
6:VO(OUTPUT)
7:VO
8:VCC

SCHEMATIC



A 0.1μF bypass capacitor must be
Connected between pin 8 and 5(See Note 5).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

MAXIMUM RATINGS (Ta=25°C)

	CHARACTERISTIC	SYMBOL	RATING	UNIT
LED	Forward Current	I_F	20	mA
LED	Forward Current Derating (Ta≥70°C)	$\Delta I_F / \Delta Ta$	−0.36	mA /°C
LED	Peak Transient Forward Current (Note 1)	I_{FPT}	1	A
LED	Reverse Voltage	V_R	5	V
LED	Junction Temperature	Tj	125	°C
DETECTOR	"H" Peak Output Current, PW ≤2.5μs , f≤15 kHz (Note 2)	I_{OPH}	−1.5	A
DETECTOR	"H" Peak Output Current, PW≤1.0μs , f≤15 kHz (Note 2)	I_{OPH}	−2.0	A
DETECTOR	"L" Peak Output Current, PW≤2.5μs , f≤15 kHz (Note 2)	I_{OPL}	+1.5	A
DETECTOR	"L" Peak Output Current, PW ≤1.0μs , f≤15 kHz (Note 2)	I_{OPL}	+2.0	A
DETECTOR	Output Voltage (Ta≤70°C)	V_O	35	V
DETECTOR	Output Voltage (Ta=85°C)	V_O	24	V
DETECTOR	Supply Voltage (Ta≤70°C)	V_{CC}	35	V
DETECTOR	Supply Voltage (Ta=85°C)	V_{CC}	24	V
DETECTOR	Output Voltage Derating (Ta≥70°C)	$\Delta V_O / \Delta Ta$	−0.73	V /°C
DETECTOR	Supply Voltage Derating (Ta≥70°C)	$\Delta V_{CC} / \Delta Ta$	−0.73	V /°C
DETECTOR	Junction Temperature	T_j	125	°C
Operating Frequency (Note 3)		f	25	kHz
Operating Temperature Range		T_{opr}	−20~85	°C
Storage Temperature Range		T_{stg}	−55~125	°C
Lead Soldering Temperature(10s)		T_{sol}	260	°C
Isolation Voltage (AC,1min., R.H. ≤60%,Ta=25°C) (Note 4)		BV_S	2500	Vrms

(Note 1) : Pulse width PW≤1μs,300pps
(Note 2) : Exporenential Waveform
(Note 3) : Exporenential Waveform I_{OPH}≤−1.0A (≤2.5μs) , I_{OPL}≤+1.0A (≤2.5μs)
(Note 4) : Device considerd a two terminal device : pins 1,2,3 and 4 shorted together and pins 5,6,7 and 8 shorted together.
(Note 5) : A ceramic capacitor(0.1μF) should be connected from pin 8 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain linear amplifier.Failure to provide the bypassing may impair the switching proparty.The total lead length between capacitor and coupler should not exceed 1cm.

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

CHARACTERISTIC	SYMBOL	MIN	TYP.	MAX		UNIT
Input Current, ON	$I_{F(ON)}$	7	8	10		mA
Input Voltage, OFF	$V_{F(OFF)}$	0	—	0.8		V
Supply Voltage	V_{CC}	15	—	30	20	V
Peak Output Current	I_{OPH} / I_{OPL}	—	—	±0.5		A
Operating Temperature	T_{opr}	−20	25	70	85	°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

TOSHIBA TLP250(INV)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Ta = −20~70°C, Unless otherwise specified)

CHARACTERISTIC		SYMBOL	TEST CIRCUIT	TEST CONDITION		MIN	TYP.	MAX	UNIT
Input Forward Voltage		V_F	—	I_F = 10 mA, Ta = 25°C		—	1.6	1.8	V
Temperature Coefficient of Forward Voltage		$\Delta V_F / \Delta Ta$	—	I_F = 10 mA		—	−2.0	—	mV / °C
Input Reverse Current		I_R	—	V_R = 5 V, Ta = 25°C		—	—	10	μA
Input Capacitance		C_T	—	V = 0, f = 1 MHz, Ta = 25°C		—	45	250	pF
Output Current	"H" Level	I_{OPH}	2	V_{CC} = 30 V (*1)	I_F = 10 mA, V_{8-6} = 4 V	−1.0	−1.5	—	A
	"L" Level	I_{OPL}	1		I_F = 0, V_{6-5} = 2.5 V	1.0	2	—	
Output Voltage	"H" Level	V_{OH}	3	V_{CC1} = +15 V, V_{EE1} = −15 V, R_L = 200Ω, I_F = 5 mA		11	12.8	—	V
	"L" Level	V_{OL}	4	V_{CC1} = +15 V, V_{EE1} = −15 V, R_L = 200Ω, V_F = 0.8 V		—	−14.2	−12.5	
Supply Current	"H" Level	I_{CCH}	—	V_{CC} = 30 V	I_F = 10 mA, Ta = 25°C	—	7	—	mA
					I_F = 10 mA	—	—	11	
	"L" Level	I_{CCL}	—		I_F = 0 mA, Ta = 25°C	—	7.5	—	mA
					I_F = 0 mA	—	—	11	
Threshold Input Current	L→H	I_{FLH}	—	V_{CC1} = +15 V, V_{EE1} = −15 V, R_L = 200Ω, V_O > 0V		—	1.2	5	mA
Threshold Input Voltage	H→L	V_{FHL}		V_{CC1} = +15 V, V_{EE1} = −15 V, R_L = 200Ω, V_O < 0V		0.8	—	—	V
Supply Voltage		V_{CC}	—	—		10	—	35	V
Capacitance (Input-Output)		C_S	—	V_S = 0, f = 1 MHz, Ta = 25°C		—	1.0	2.0	pF
Resistance (Input-Output)		R_S	—	V_S = 500 V, Ta = 25°C, R.H.≤60%		1×10^{12}	10^{14}	—	Ω

(*) : All typical values are at Ta=25°C
(*1) : Duration of IO time ≤ 50μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

TOSHIBA TLP250(INV)

SWITCHING CHARACTERISTICS (Ta = −20~70°C,Unless otherwise specified)

CHARACTERISTIC		SYMBOL	TEST CIRCUIT	TEST CONDITION	MIN	TYP.	MAX	UNIT
Propagation	L→H	t_{pLH}	5	I_F = 8 mA, V_{CC} = 15 V, R_L = 20Ω, C_L = 10nF	0.05	0.15	0.5	μs
Delay Time	H→L	t_{pHL}			0.05	0.15	0.5	
Switching Time Dispersion between ON and OFF		|tpHL-tpLH|			—	—	0.45	
Output Rise Time		t_r			—		—	
Output Fall Time		t_f			—		—	
Common Mode Transient Immunity at High Level Output		CM_H	6	V_{CM} = 1000 V, I_F = 8 mA, V_{CC} = 30 V, Ta = 25°C	−15000	—	—	V /μs
Common Mode Transient Immunity at Low Level Output		CM_L		V_{CM} = 1000 V, I_F = 0 mA, V_{CC} = 30 V, Ta = 25°C	15000	—	—	V /μs

Fig.1 I_{OPL} TEST CIRCUIT

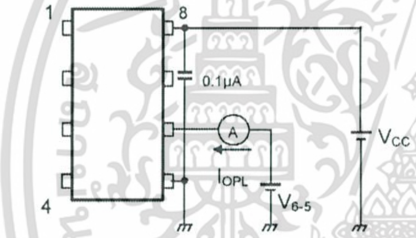


Fig.2 I_{OPH} TEST CIRCUIT

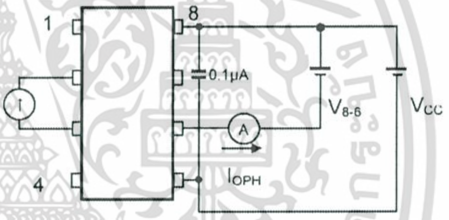


Fig.3 V_{OH} TEST CIRCUIT

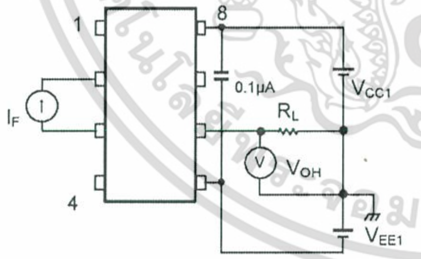
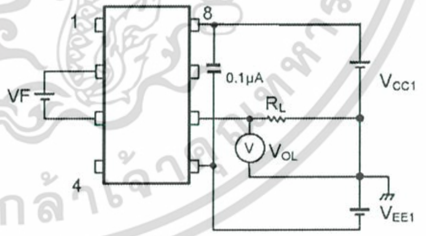


Fig.4 V_{OL} TEST CIRCUIT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

TOSHIBA TLP250(INV)

Fig.5 tpLH、tpHL、tr、tf TEST CIRCUIT

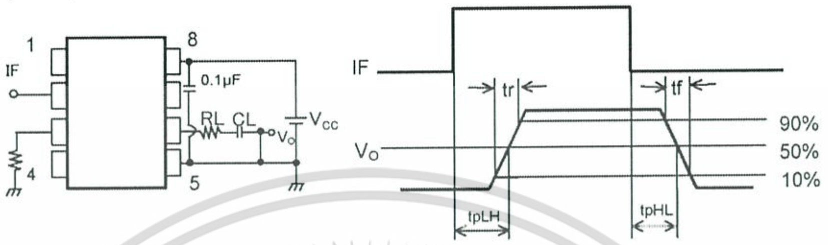
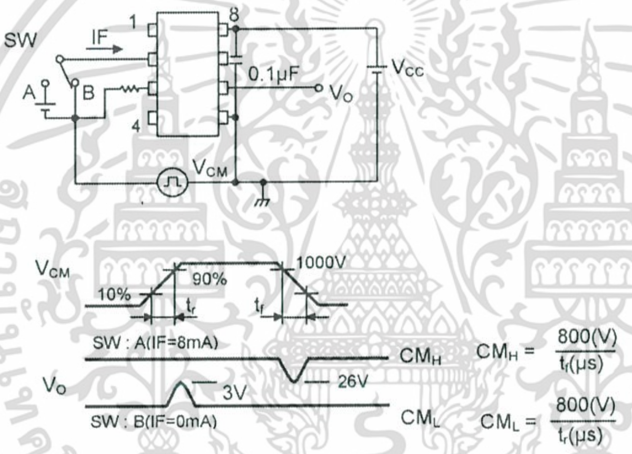


Fig.6 CM_H, CM_L TEST CIRCUIT



$$CM_H = \frac{800(V)}{t_f(\mu s)}$$

$$CM_L = \frac{800(V)}{t_r(\mu s)}$$

CML(CMH) is the maximum rate of rise(fall) of the common mode voltage that can be sustained with the output voltage in the low(high)state.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

000707EBC

- TOSHIBA is continually working to improve the quality and reliability of its products. Nevertheless, semiconductor devices in general can malfunction or fail due to their inherent electrical sensitivity and vulnerability to physical stress. It is the responsibility of the buyer, when utilizing TOSHIBA products, to comply with the standards of safety in making a safe design for the entire system, and to avoid situations in which a malfunction or failure of such TOSHIBA products could cause loss of human life, bodily injury or damage to property.
  In developing your designs, please ensure that TOSHIBA products are used within specified operating ranges as set forth in the most recent TOSHIBA products specifications. Also, please keep in mind the precautions and conditions set forth in the "Handling Guide for Semiconductor Devices," or "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" etc..
- The TOSHIBA products listed in this document are intended for usage in general electronics applications (computer, personal equipment, office equipment, measuring equipment, industrial robotics, domestic appliances, etc.). These TOSHIBA products are neither intended nor warranted for usage in equipment that requires extraordinarily high quality and/or reliability or a malfunction or failure of which may cause loss of human life or bodily injury ("Unintended Usage"). Unintended Usage include atomic energy control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, combustion control instruments, medical instruments, all types of safety devices, etc.. Unintended Usage of TOSHIBA products listed in this document shall be made at the customer's own risk.
- Gallium arsenide (GaAs) is a substance used in the products described in this document. GaAs dust and fumes are toxic. Do not break, cut or pulverize the product, or use chemicals to dissolve them. When disposing of the products, follow the appropriate regulations. Do not dispose of the products with other industrial waste or with domestic garbage.
- The products described in this document are subject to the foreign exchange and foreign trade laws.
- The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA CORPORATION for any infringements of intellectual property or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any intellectual property or other rights of TOSHIBA CORPORATION or others.
- The information contained herein is subject to change without notice.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงงาน

```
//------------------------------------------------------------------------------------------------------:Include &
Config clock
#include <p30fxxxx.h>   // generic header file for dsPIC
#include <adc10.h>             // Analog to Digital module
#include <stdio.h>             // for sprintf();
#include <incap.h>      // Input Capture module
#include <timer.h>      // Timer module
_FOSC(CSW_FSCM_OFF & XT_PLL4);  // Sw Disabled, Mon Disabled,XT w/PLL 1x
_FWDT(WDT_OFF);                 // Watchdog timer off

//------------------------------------------------------------------------------------------------------:Defines
#define TRUE                1
#define StartTIMER1         T1CONbits.TON=1
#define StopTIMER1          T1CONbits.TON=0
#define StartTIMER2         T2CONbits.TON=1
#define StopTIMER2          T2CONbits.TON=0

//------------------------------------------------------------------------------------------------------:Function
Prototype
void Setup_ADC10(void);
void Delay_MS(unsigned int ms);
void Setup_IC7(void);
void Setup_TIMER1(void);
void Setup_TIMER2(void);

//------------------------------------------------------------------------------------------------------:Library
#include "LCD16x2.c"
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงงาน (ต่อ)

```
//-------------------------------------------------------------------------------------------------------:Global
Variable
char buf[16];
unsigned int pot = 0;
unsigned int degree;
unsigned int period;
unsigned int update_lcd=0;
unsigned START;

//-------------------------------------------------------------------------------------------------------:IC7 ISR
void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _IC7Interrupt(void)
{
        DisableIntIC7;
        PR2 = 1+(degree*5*27.777777778);
        TMR2 = 0;
        _T2IF = 0;
        StartTIMER2;
        _IC7IF = 0;          // Clear Interrupt flag
}
//-------------------------------------------------------------------------------------------------------:Timer1
Interrupt
void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _T1Interrupt(void)
{
        update_lcd = 1;
   _T1IF = 0;  // Clear Timer1 Interrupt flag
}
//-------------------------------------------------------------------------------------------------------:Timer2
Interrupt
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงงาน (ต่อ)

```
void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _T2Interrupt(void)
{
        StopTIMER2;
        _LATE0 = 1;
    _T2IF = 0;  // Clear Timer1 Interrupt flag
}
//-----------------------------------------------------------------------------------------------:Main
int main(void)
{
        ADPCFG = 0xFFFD;
        _TRISB2 = 1;    //RB2 to START/STOP button
        _TRISB4 = 1;    //IC7 to Zero crossing
        _LATE0 = 0;             //Clear RE0
        _TRISE0 = 0;    //RE0 to Relay control

        LCDInit();
        //                      1234567890123456
        LCDPrintxy(1,1,0,"Degree:      0  ");
        LCDPrintxy(1,2,0,"status:   STOP   ");

        Setup_ADC10();
        Setup_TIMER1();
        Setup_TIMER2();
        Setup_IC7();

  while(TRUE)
  {
        _T1IF = 0;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงงาน (ต่อ)

```
TMR1  = 0;
StartTIMER1;
START = 0;
_LATE0 = 0;

while(!_RB2)    //wait for START
{
        if(update_lcd)
        {
                _DONE = 0;
                while(!_DONE);
                unsigned int pot1=ADCBUF0;
                pot=pot+pot1;
                pot=pot>>1;
                degree=pot/14.1666667;
                //                      1234567890123456
                sprintf(buf,"Degree:    %4d",degree*5);
                LCDPrintxy(1,1,0,buf);
                LCDPrintxy(1,2,0,"status:    STOP   ");
        }
}
StopTIMER1;
//                              1234567890123456
LCDPrintxy(1,2,0,"status: RUNNING ");
_IC7IF = 0;
EnableIntIC7;
START = 1;
while(START)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงงาน (ต่อ)

```
        {
                if(_RB2==0)
                        START=0;
        }
        Delay_MS(50);
  }
  return 0;
}
//-----------------------------------------------------------------------------------------------:Initialize
ADC 10bit
void Setup_ADC10(void)
{
  unsigned int config1, config2, config3;
  unsigned int configport, configscan;
  unsigned int channel;

  CloseADC10();   // Turn off A/D

  // Configure ADCON1 register
  config1 = ADC_MODULE_OFF &              // A/D Converter off
          ADC_IDLE_CONTINUE &             // A/D Operate in Idle mode
          ADC_FORMAT_INTG &               // A/D data format integer
          ADC_CLK_AUTO &                  // sampling/conversion (Auto convert)
          ADC_SAMPLE_INDIVIDUAL &         // sequence sampling
          ADC_AUTO_SAMPLING_ON &          // Auto sampling Select
          ADC_SAMP_ON;                    // sample / hold amplifiers are sampling
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงงาน (ต่อ)

```
// Configure ADCON2 register

config2 = ADC_VREF_AVDD_AVSS &          // Vref+ is AVdd and Vref- is AVss
        ADC_SCAN_OFF &                  // Do notScan Input
        ADC_CONVERT_CH_0ABC &           // A/D channels utilised
        ADC_SAMPLES_PER_INT_1 &         // interrupt at 4th sample
        ADC_ALT_BUF_OFF &               // Buffer 16-word buffer
        ADC_ALT_INPUT_OFF;              // use MUXA only

// Configure ADCON2 register
config3 = ADC_SAMPLE_TIME_3 &    // A/D Auto Sample Time 3 Tad
        ADC_CONV_CLK_SYSTEM &   // Clock Source Clock derived from system clock
        ADC_CONV_CLK_3Tcy2;     // A/D Conversion Clock Select bits

// Configure ADCHS register
channel = ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN1 &       // A/D Chan 0 pos i/p sel for SAMPLE A
is AN3
        ADC_CH0_NEG_SAMPLEA_NVREF &     // A/D Chan 0 neg i/p sel for SAMPLE A is -
Vref
        ADC_CHX_POS_SAMPLEA_AN0AN1AN2 & // A/D Chan A B C pos i/p sel for
SAMPLE A are AN0, 1 and 2
        ADC_CHX_NEG_SAMPLEA_NVREF;      // A/D CHA, CHB, CHC neg input is VREF-

// RB0, RB1, RB2 & RB3 = analog
configport = 0xFFFD;  // ADPCFG register //RB1

// Configure ADCSSL register
configscan = SCAN_NONE;           // Skip AN0-AN15 for Input Scan
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงงาน (ต่อ)

```
  // configures the ADC
  OpenADC10(config1, config2, config3, configport, configscan);
  // sets the positive and negative inputs for the sample multiplexers
  SetChanADC10(channel);
  //IFS0bits.ADIF = 0;
  //IEC0bits.ADIE = 0;
  _ADON                    = 1;
}
//-------------------------------------------------------------------------------------------:Initialize
Input Capture7
void Setup_IC7(void)
{
  unsigned int config;

  CloseCapture7();          // CloseCapture 1

  // ConfigIntCapture1
  //ConfigIntCapture7(IC_INT_ON); // Input Capture Enable

  // OpenCapture1
  config = IC_IDLE_CON &        // IC operate in sleep mode
         IC_INT_1CAPTURE &    // Interrupt on first Capture
         IC_EVERY_RISE_EDGE;  // Every rising edge

  OpenCapture7(config);
  //DisableIntIC7;
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงงาน (ต่อ)

```
//-------------------------------------------------------------------------------------------------------:Setup
Timer1
void Setup_TIMER1(void)
{
  unsigned int config, period;

  CloseTimer1();                                            // Close Timer1

  ConfigIntTimer1(T1_INT_ON);                    // Config Int Timer1

  // Timer1 Control Register (T1CON) Bit Defines
  config = T1_OFF &                              // Timer1 ON
         T1_IDLE_STOP &                                 // stop operation during sleep
         T1_GATE_OFF &                                  // Timer Gate time accumulation
disabled
         T1_PS_1_8 &                                    // Prescaler 1:8
         T1_SYNC_EXT_OFF &                              // Do not synch external clk input
         T1_SOURCE_INT;                                 // Internal clock source

  period = 10000;                                         // Set PR1 Register = 20ms

  OpenTimer1(config,period);                     // Open Timer1
}
//-------------------------------------------------------------------------------------------------------:Setup
Timer2
void Setup_TIMER2(void)
{
  unsigned int config, period;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงงาน (ต่อ)

```
  CloseTimer2();                                        // Close Timer2

  ConfigIntTimer2(T2_INT_ON);                           // Config Int Timer2

  // Timer2 Control Register (T2CON) Bit Defines
  config = T2_OFF &                                // Timer2 ON
          T2_IDLE_STOP &                           // stop operation during sleep
          T2_GATE_OFF &                            // Timer Gate time accumulation
disabled
          T2_PS_1_8 &                              // Prescaler 1:8
          T2_32BIT_MODE_OFF &                      // Do not synch external clk input
          T2_SOURCE_INT;                           // Internal clock source

  period = 0xFFFF;                                 // Set PR2 Register = Max

  OpenTimer2(config,period);                       // Open Timer2
}
//------------------------------------------------------------------------------------------------:Delay MS
void Delay_MS(unsigned int ms)
{
  unsigned  int i;
  for(; ms>0; ms--)
         for(i=0; i<728; i++)
                   Nop();
}
//------------------------------------------------------------------------------------------------:End
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

Design and Construction Combination Wave Generator

ณัฐคนัย โตนชัยภูมิ[1] ณัฐพล มฤคทัต[1] และณัฐวัตร สร้อยสุวรรณ์[1]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอยฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail : apscroll@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมพิกัด 10 kV 5 kA ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5 สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (1.2/50 μs) ขณะเปิดวงจร และรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า (8/20 μs) ขณะลัดวงจร สำหรับทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่ใช้กับระบบแรงดันต่ำ โดยทดสอบการป้องกันแรงดันเกินทับซ้อนบนระบบจ่ายแรงดันกระแสตรง และระบบจ่ายแรงดันกระแสสลับความถี่ 50 Hz ที่มุม 90 และ 270 องศา ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมพบว่าใช้ทดสอบระบบป้องกันแรงดันเกินได้ทั้งระบบจ่ายแรงดันกระแสตรง และระบบจ่ายแรงดันกระแสสลับได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม, อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน

Abstract

This paper presents design and construction of a combination wave generator with rating of 10 kV, 5kA. According to IEC 61000-4-5, the generator applies a lightning impulse voltage of 1.2/50-μs waveform in the condition of open circuit, and lightning impulse current of 8/20-μs waveform in the condition of short circuit. The generator can be used for testing surge suppression devices in the low-voltage system. In the tests, the generator can apply the impulse on the DC and AC voltage with selecting phase angle of 90°and 270°. From the test results, it can be confirmed that the generator can be used for the test efficienly.

Keywords : Combination wave generator, Surge protection Device

1. บทนำ

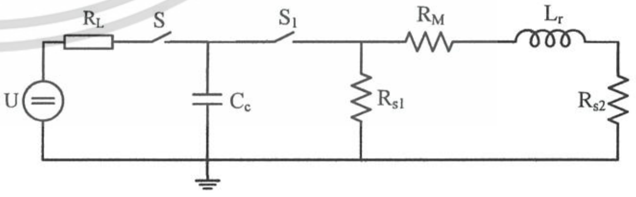
ในระบบไฟฟ้านั้นโดยทั่วไปมีโอกาสเกิดแรงดันเกินขึ้นได้ ซึ่งอาจเกิดจากฟ้าผ่าตามธรรมชาติ หรือการตัดต่อวงจรของสวิตช์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์[1] โดยจะแบ่งตามชนิดของแรงดันเกินได้ 2 ชนิด คือ แรงดันเกินฟ้าผ่า และแรงดันเกินสวิตช์ชิ่ง ดังนั้นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งานในระบบไฟฟ้าอาจมีโอกาสที่จะได้รับแรงดันเกิน และเกิดความเสียหายได้ จึงควรมีการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกิน และกระแสซึ่งเกิดจากแรงดันเกินก่อนนำไปใช้งาน เพื่อให้มั่นใจว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าของเรานั้นสามารถทนแรงดันเกินได้ในระดับหนึ่ง

อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าให้มีค่าต่ำกว่าที่อุปกรณ์ไฟฟ้าจะสามารถทนได้ ดังนั้นอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่นำมาใช้ในระบบไฟฟ้าจะต้องมีการทดสอบเพื่อยืนยันว่าสามารถใช้ป้องกันแรงดันเกินได้จริง ซึ่งการทดสอบจะต้องถูกทดสอบด้วยรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ถูกสร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดตามที่มาตรฐานกำหนด บทความฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม ซึ่งสามารถสร้างแรงดันกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μs และกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 8/20 μs โดยคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมได้ถูกกำหนดไว้ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม[2]

มาตรฐาน IEC 61000-4-5 ได้กำหนดคุณลักษณะและวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

U คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง R_s คือ ตัวต้านทานปรับรูปคลื่น

R_L คือ ตัวต้านทานกระแสอัดประจุ R_m คือ ตัวต้านทานแมทชิ่ง

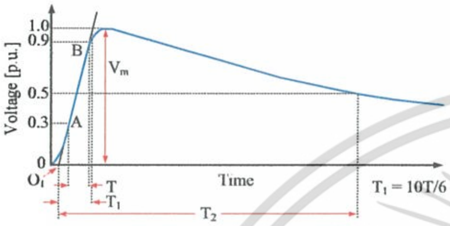
C_C คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ L_r คือ ตัวเหนี่ยวนำปรับช่วงเวลาขาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐาน IEC 61000-4-5 อ้างอิงคุณลักษณะรูปคลื่นแรงดันและกระแสอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินตามมาตรฐาน IEC 60060-1 ดังหัวข้อที่ 2.2 และ 2.3

2.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามีช่วงเวลาหน้าคลื่น 1.2 ± 30% μs และมีช่วงเวลาหลังคลื่น 50 ± 20% μs ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน

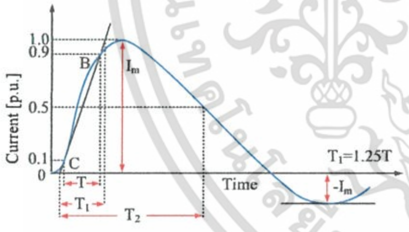
V_m คือ แรงดันค่ายอด

T_1 คือ ช่วงเวลาหน้าคลื่น T_A คือ เวลาที่แรงดันมีค่า 30 % ของค่ายอด

T_2 คือ ช่วงเวลาหลังคลื่น T_B คือ เวลาที่แรงดันมีค่า 90 % ของค่ายอด

2.3 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน

รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มีช่วงเวลาหน้าคลื่น 8 ± 20% μs และมีช่วงเวลาหลังคลื่น 20 ± 20% μs ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน

I_m คือ กระแสค่ายอด $-I_m$ คือ กระแสค่ายอดขั้วตรงข้าม

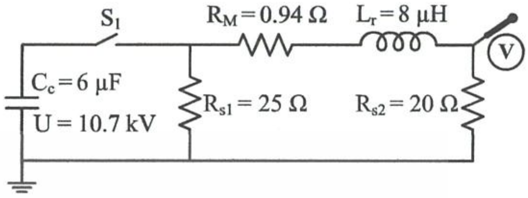
T_1 คือ ช่วงเวลาหน้าคลื่น T_A คือ เวลาที่แรงดันมีค่า 10 % ของค่ายอด

T_2 คือ ช่วงเวลาหลังคลื่น T_B คือ เวลาที่แรงดันมีค่า 90 % ของค่ายอด

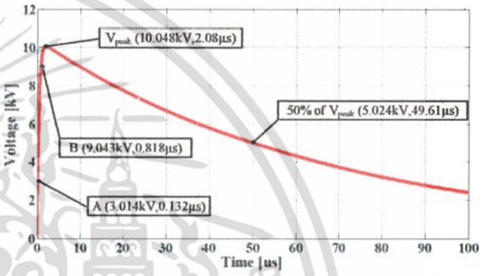
3.การออกแบบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

การหาค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมสามารถทำได้โดยจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยในการจำลองการทำงานแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมขณะเปิดวงจรเพื่อสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (1.2/50 μs) และกรณีเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมขณะลัดวงจรเพื่อสร้างกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า (8/20 μs) โดยกระแสอิมพัลส์จะต้องมีขนาดครึ่งหนึ่งของแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นในกรณีแรก เมื่อทำการกำหนดแรงดันอัดประจุให้มีค่าเท่ากันทั้งสองกรณี

วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม และค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดแสดงดังรูปที่ 4 ผลจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 5 โดยกำหนดให้แรงดันอัดประจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_C) มีค่า 10.7 kV

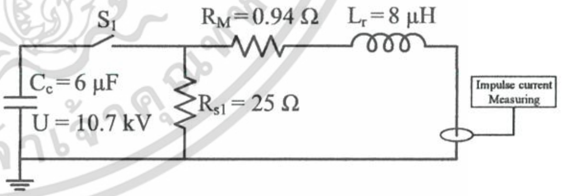


รูปที่ 4 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมขณะเปิดวงจร

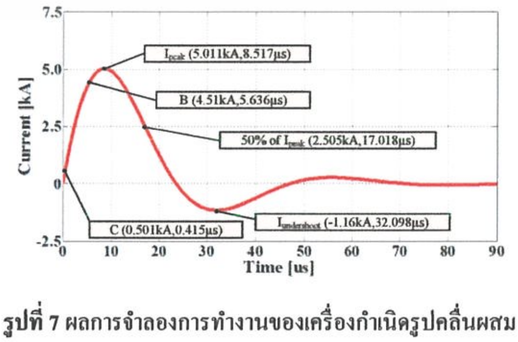


รูปที่ 5 ผลการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

วงจรสมมูลจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมในกรณีสร้างรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ โดยใช้ตัวต้านทานชั้นท์ (Shunt Resistor) เป็นตัววัดกระแส และค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดแสดงดังรูปที่ 6 ผลจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 7 โดยกำหนดให้แรงดันอัดประจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_C) มีค่า 10.7 kV



รูปที่ 6 วงจรสมมูลจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม



รูปที่ 7 ผลการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

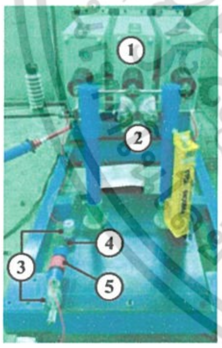
ตารางที่ 1 ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันและกระแสอิมพัลส์ที่ได้จากการจำลองการทำงาน

ลักษณะของรูปคลื่น	1.2/50 μs	8/20 μs
เวลาหน้าคลื่น	1.14 μs	6.525 μs
เวลาหลังคลื่น	49.62 μs	17.006 μs
ค่ายอด	10.048 kV	5.011 kA
ค่ายอดขั้วตรงข้าม	-	-8.69 kA

จากตารางที่ 1 พบว่าช่วงเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นของรูปคลื่นแรงดันและกระแสอิมพัลส์อยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด

4.การประกอบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

จากการหาค่าองค์ทางไฟฟ้าในวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมดังรูปที่ 1 นำมาประกอบสร้างเป็นเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม ดังรูปที่ 8 โดยเลือกอุปกรณ์สำหรับประกอบสร้างดังนี้ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ความจุไฟฟ้า 2 μF พิกัด 75 kV_{DC} ต่อขนานกันจำนวน 3 ตัว ตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ (R_{S1}, R_{S2} และ R_m) สร้างจากลวดนิกเกิ้ล-โครเมียม เบอร์ 28 AWG ตัวเหนี่ยวนำ (L_r) สร้างจากลวดทองแดงหุ้มฉนวนพื้นที่หน้าตัด 2.5 mm^2 พันบนท่อ PVC เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว และสวิตซ์ถ่ายโอนประจุ (S_1) ใช้ช่องว่างทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว ประกอบไกสวิตซ์สำหรับจุดชนวนด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน



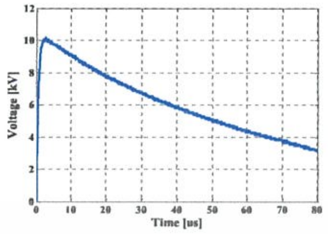
รูปที่ 8 เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

1) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_C) 2) ช่องว่างทรงกลม
3) ตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำสำหรับปรับรูปคลื่น (R_{S1}, R_{S2})
4) ตัวต้านทานแมทชิ่ง (R_m) 5) ตัวเหนี่ยวนำปรับช่วงเวลาขาขึ้น (L_r)

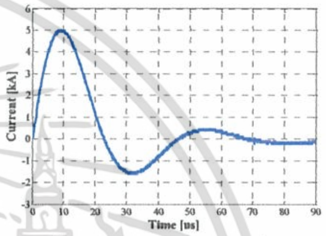
5.การทดสอบ

5.1 การทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

จากการออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมทดสอบสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขณะเปิดวงจร และกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าขณะลัดวงจร วัดรูปคลื่นด้วยโวลต์เตจดิไวเดอร์ และขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรเตอร์ตามลำดับ บันทึกผลการวัดด้วยดิจิตอลออสซิลโลสโคป ได้ผลการทดสอบ ดังรูปที่ 9



ก) รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่บันทึกได้



ข) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่บันทึกได้

รูปที่ 9 รูปคลื่นที่สร้างได้จากเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมที่ออกแบบและประกอบสร้าง

จากผลการทดสอบ ค่าองค์ประกอบของแรงดันและกระแสอิมพัลส์เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด ดังตารางที่ 2 สามารถนำเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมไปทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงดันต่ำได้

ตารางที่ 2 ค่าองค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันและกระแสอิมพัลส์ที่ได้จากการทดสอบ

ลักษณะของรูปคลื่นมาตรฐาน	1.2/50 μs	8/20 μs
เวลาหน้าคลื่น	1.516 μs	7.01 μs
เวลาหลังคลื่น	48.77 μs	17.25 μs
ค่ายอด	10.17 kV	5.02 kA
เปอร์เซ็นต์ค่ายอดขั้วตรงข้าม	-	29.88 %

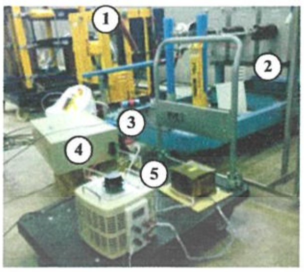
5.2 การทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงดันต่ำ

อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงดันต่ำที่นำมาทดสอบมีดังนี้ อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบ 480 V 10 kA ติดตั้งในระบบจ่ายแรงดันกระแสตรง และอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบ 275 V ติดตั้งในระบบจ่ายแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ดังนี้

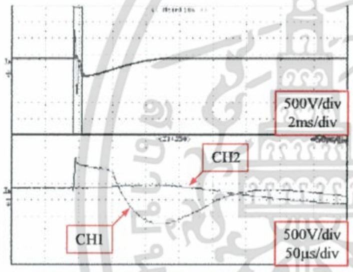
1) ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบ 480 V ในระบบจ่ายแรงดันกระแสตรง 380 V กรณีการทดสอบแบบคอมมัล จ่ายแรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 10 kV ระหว่าง Line – Ground ดังรูปที่ 10 วัดรูปคลื่นแรงดันตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คร่อมอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน (CH1) และแรงดันที่ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (CH2) ผลการวัดรูปคลื่น ดังรูปที่ 11

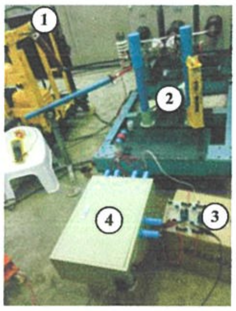


รูปที่ 10 วงจรทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบ 480 V ติดตั้งในระบบจ่ายแรงดันกระแสตรง
1) ชุดหม้อแปลงอัดประจุ 2) เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม
3) อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบ 480 V
4) ชุดวงจรกรอง 5) ชุดสร้างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

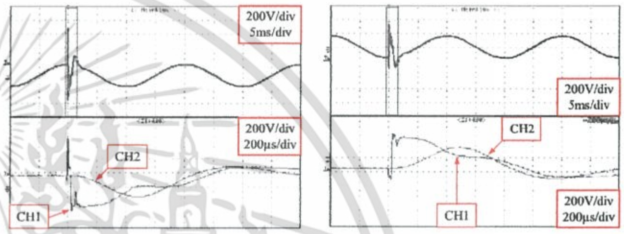


รูปที่ 11 รูปคลื่นแรงดันที่บันทึกด้วยดิจิตอลออสซิลโลสโคป
CH1 คือ รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน
CH2 คือ รูปคลื่นแรงดันที่ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

2) ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบ 275 V ในระบบจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz กรณีการทดสอบแบบนอร์มัล จ่ายแรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 10 kV ขั้วบวกที่มุม 90 องศา และขั้วลบที่มุม 270 องศา ระหว่าง Line – Neutral ดังรูปที่ 12 วัดรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน (CH1) และแรงดันที่ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (CH2) ผลการวัดรูปคลื่น ดังรูปที่ 13



รูปที่ 12 วงจรการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบแรงต่ำ 275 V
1) ชุดหม้อแปลงอัดประจุ 2) เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม
3) อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบ 275 V 4) ชุดวงจรกรอง



ก) จุดชนวนที่มุม 90 องศา ข) จุดชนวนที่มุม 270 องศา

รูปที่ 13 รูปคลื่นแรงดันการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินระบบ 275 V

6.สรุป

เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมที่ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างขึ้นสามารถนำไปทดสอบระบบป้องกันแรงดันเกินได้ทั้งระบบจ่ายแรงดันกระแสตรง และระบบจ่ายแรงดันกระแสสลับได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานชิ้นนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารอ้างอิง

[1] สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, มีนาคม 2549.

[2] IEC 61000-4-5, **Electromagnetic compatibility (EMC)**, Part 4-5, Testing and measurement techniques surge immunity test. 2005-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายณัฐดนัย โตนชัยภูมิ เกิดวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2535 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบุญวัฒนา เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2554

ฝึกงานที่ : การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 3 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (นครราชสีมา)

นายณัฐพล มฤคทัต เกิดวันที่ 16 สิงหาคม พ.ศ. 2535 ที่จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสตรีสมุทรปราการ เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2554

ฝึกงานที่ : โรงไฟฟ้าพระนครใต้

นายณัฐวัตร สร้อยสุวรรณ์ เกิดวันที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2536 ที่จังหวัดอุตรดิตถ์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย พิษณุโลก เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2554

ฝึกงานที่ : บริษัท ท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้