



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ
ระหว่างมุม 0 ถึง 360 องศา สำหรับทดสอบอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ
โดย นายวัชชัย สิมมา

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตยั้งษ์)

21 พฤษภาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.สมพร สิริสำราญกุล)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศราวุฒิ คณิศสุวรรณ)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ธีรธรรม บุญยะกุล)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ธนพงศ์ สุวรรณศรี)

การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ
ระหว่างมุม 0 ถึง 360 องศา สำหรับทดสอบอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ

นายรัชชัย สิมมา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายรัชชัย สิมมา
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมทับซ้อนบนแรงดัน
กระแสสลับระหว่างมุม 0 ถึง 360 องศา สำหรับทดสอบอุปกรณ์ใน
ระบบไฟฟ้าแรงต่ำ
สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อาจารย์ ดร.สมพร สิริสำราญกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศราวุฒิ คลี่สุวรรณ
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมมาตรฐาน ขนาดแรงดัน
เปิดวงจร 6 kV รูปคลื่น 1.2/50 μ s และขนาดกระแสลัดวงจร 3 kA รูปคลื่น 8/20 μ s ทั้งรูปคลื่น
บวก (+) และลบ (-) รูปคลื่นผสมสามารถทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่ความถี่ 50 Hz และ
ควบคุมมุมทับซ้อนได้ตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS51
เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอก และอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ
ผลการทดสอบรูปคลื่นที่สร้างขึ้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน IEEE C62.41-1991 การทดสอบการ
ทับซ้อนของรูปคลื่นผสมบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุมต่างๆ มีค่าผิดพลาดไม่เกิน 3 องศา และ
สามารถทำการทดสอบต่อเนื่องได้ไม่น้อยกว่า 12 ครั้งต่อนาที ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5
(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 107 หน้า)

คำสำคัญ : รูปคลื่นผสม, แรงดันกระชอก, แรงดันทับซ้อน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr.Thawatchai Simma
Thesis Title : Design and Construction of a Combination Wave Generator Superimposed
on AC Voltage between 0° - 360° for Equipment Testing in Low-voltage
Systems
Major Field : Electrical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisors : Dr.Somporn Sirisumrannukul
Assistant Professor Sawut Kleesuwan
Academic Year : 2006

Abstract

This thesis presents the design and construction of a combination wave generator that can produce a voltage waveform of 6 kV, 1.2/50 μ s for open circuit condition and a current waveform of 3 kA, 8/50 μ s for short circuit condition. The voltage waveforms can be superimposed on the 50 Hz ac supply with a superimposed angle between 0 and 360 degrees for positive and negative directions. The combination wave generator is controlled by a microcontroller MCS51 for testing of surge protective devices and low-voltage equipment. Experimental results show a good agreement between the voltage waveforms obtained from the combination wave generator and the standard waveform defined by IEEE C62.41-1991. The results also indicate that mismatches on different superimposed angles are less than 3 degrees. The combination wave generator can be tested at least 12 times per minute, which meets standard IEC 61000-4-5.

(Total 107 pages)

Keywords : Combination Wave, Surge Voltage, Superimpose Voltage

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดีนั้นข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศราวุธ คลีสุวรรณ และ อาจารย์ ดร.สมพร สิริสำราญกุล ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางวิชาการ และ คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ตลอดจนให้การสนับสนุนในทุกด้านจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จได้ด้วยดี กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประวิช เปรียบเหมือน และอาจารย์สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ทุกท่านที่ได้ให้ คำแนะนำและช่วยเหลือสนับสนุนในทุกๆด้าน ขอขอบพระคุณ อาจารย์พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล ที่ได้ ให้ความช่วยเหลือทางวิชาการและคำแนะนำจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณ คุณวิระพล ฉันทเจริญศักดิ์ และบริษัท สตาบิล จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องกำเนิด รูปคลื่นผสม EMG PARTNER รุ่น MIG 0630 IN ในการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ ของเครื่องที่สร้างขึ้น ขอขอบพระคุณอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ตลอดจนเพื่อนๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำและสนับสนุน ทั้งทางตรงและทางอ้อมตลอดมา ตั้งแต่เริ่มต้นเข้าศึกษาจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสิ้น

ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสมบุญ สิมมา และคุณแม่ ลำไย สิมมา บิดา และมารดาของข้าพเจ้าที่ให้กำเนิด เลี้ยงดู อบรม สั่งสอน และสนับสนุนในทุกๆ ด้านจนข้าพเจ้ามีวันนี้ ขอขอบคุณ คุณวราพร สิมมา ภรรยาของข้าพเจ้า พร้อมทั้งพี่น้องทุกคน ที่เป็นกำลังใจในการศึกษา และการทำวิทยานิพนธ์จนทุกอย่างสำเร็จ ขอขอบพระคุณ คุณป้าอำนาจ ทองถิ่น และคุณลุงคำใบ ทองถิ่น ที่ช่วยดูแลบุตรสาวของข้าพเจ้าในขณะที่ทำวิทยานิพนธ์นี้ และขอ อุทิศส่วนกุศลที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้และกุศลผลบุญที่ข้าพเจ้าได้กระทำให้แก่ คุณแม่ลำไย สิมมา มารดาของข้าพเจ้าซึ่งเสียชีวิตในระหว่างที่รอความสำเร็จของข้าพเจ้าในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่สนับสนุน ทุนการศึกษาของข้าพเจ้า

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนบางส่วนจากทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ สำหรับ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ธวัชชัย สิมมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การเกิดแรงดันกระชาก (Surge Voltage)	5
2.2 ผลกระทบต่ออุปกรณ์เมื่อเกิดแรงดันกระชาก	5
2.3 เกณฑ์ในการแบ่งตำแหน่งที่ตั้งของอุปกรณ์เพื่อใช้ทดสอบการถูกรบกวนจากแรงดันภายนอก	7
2.4 ชนิดของรูปคลื่นที่ใช้ในการทดสอบ	7
2.5 รูปคลื่นผสม (Combination Wave)	8
2.6 เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม (Combination Wave Generator ; CWG) 1.2/50 μ s – 8/20 μ s	12
2.7 การทดสอบอุปกรณ์ (Equipment Under Testing ; EUT)	13
2.8 การวัดแรงดันกระแสตรงด้วยวิธีแบ่งแรงดันชนิดความต้านทาน	16
2.9 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์	17
2.10 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero Crossing Detector Circuit)	22
2.11 ไมโครคอนโทรลเลอร์	23
บทที่ 3 การออกแบบและสร้าง	25
3.1 การออกแบบวงจรสร้างรูปคลื่นแรงดัน และกระแส	26
3.2 การออกแบบวงจรอัดประจุ (Charging Circuit)	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การออกแบบสวิตช์แรงสูง (High Voltage Switch)	44
3.4 การออกแบบชุดควบคุมมุมเฟส (Phase Control)	49
3.5 การสร้างชุดควบคุมมุมเฟส	51
3.6 การสร้างสวิตช์แรงดันสูง	55
3.5 การสร้างวงจรสร้างรูปคลื่น	59
3.6 การสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม	62
บทที่ 4 การทดสอบ	63
4.1 การทดสอบรูปคลื่นเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE C62.41.1-1991	63
4.2 การทดสอบการทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ	67
4.3 การทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอกขณะต่อในระบบไฟฟ้า	68
4.4 การทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอกโดยตรง	74
4.5 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม MIG 0630 IN	77
4.6 สรุปผลการทดสอบ	84
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	85
5.1 สรุปผลการวิจัย	85
5.2 ข้อเสนอแนะ	86
เอกสารอ้างอิง	88
ภาคผนวก ก	
ส่วนประกอบและหน้าที่ของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมทับซ้อนบนแรงดัน	
กระแสสลับ ระหว่างมุม 0 ถึง 360 องศา	92
ผลการทดสอบการทับซ้อนที่มุม 0 ถึง 360 องศา	93
ภาคผนวก ข	
คู่มือการใช้งานชุดควบคุมมุมเฟส	98
คู่มือการใช้งานเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม	103
หลักการทำงานของวงจรควบคุมเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม	105
ประวัติผู้วิจัย	107

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 การทดสอบรูปคลื่นต่าง ๆ ในแต่ละเขตของอุปกรณ์	8
2-2 ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและกระแสตามเกณฑ์มาตรฐาน IEEE C62.41-1991	11
2-3 รูปคลื่นผสมกับการทดสอบในแต่ละตำแหน่งที่ตั้ง	11
2-4 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 1.2/50 μ s – 8/20 μ s ตามมาตรฐาน IEEE C62.41-1991	13
2-5 ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วยของระบบการวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994)	21
2-6 ข้อกำหนดคุณสมบัติของสเกลแฟกเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994)	21
3-1 ค่าแฟกเตอร์ k_1 และ k_2 สำหรับรูปคลื่นมาตรฐาน	28
3-2 ค่าองค์ประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์	29
3-3 ผลการวัดรูปคลื่นที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากภาพที่ 3-6 และ 3-7	32
3-4 ผลการวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	35
3-5 ผลการวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เมื่อปรับค่า $R = 1 \Omega$	36
3-6 การวัดค่ารูปคลื่นแรงดันจากการจำลองวงจรสร้างรูปคลื่นผสมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	38
3-7 การวัดค่ารูปคลื่นกระแสจากการจำลองวงจรสร้างรูปคลื่นผสมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	38
3-8 ค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	39
3-9 การวัดค่ารูปคลื่นแรงดันที่ออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	40
3-10 การวัดค่ารูปคลื่นกระแสที่ออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	40
3-11 ผลการทดสอบวงจรจุดชนวน	47
3-12 การทดสอบการเบรกดาวนซ์ของอิเล็กทรอนิกส์	57
3-13 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 1.2/50 μ s - 8/20 μ s	62

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-1 ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบรูปคลื่นแรงดัน 6 kV , 1.2/50 μ s ทั้งบวก (+) และลบ (-) จำนวน 10 ครั้ง	63
4-2 ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบรูปคลื่นกระแส 3 kA , 8/20 μ s ทั้งบวก (+) และลบ(-) จำนวน 10 ครั้ง	65
4-3 ผลการทดสอบ MOV เบอร์ S 20 k275	69
4-4 การเปรียบเทียบรูปคลื่นมาตรฐาน 6 kV 1.2/50 μ s , 3 kA 8/20 μ s ของเครื่อง MIG 0630 IN กับเครื่องที่สร้าง	80
4-5 การเปรียบเทียบค่าแรงดันและช่วงเวลาของเครื่อง MIG 0630 IN กับ เครื่องที่สร้างเมื่อทดสอบ MOV เบอร์ S 20 k275ด้วยรูปคลื่น1.2/50 μ s , 8/20 μ s	81
4-6 การเปรียบเทียบค่าแรงดันและช่วงเวลาของเครื่อง MIG 0630 IN กับ เครื่องที่สร้างเมื่อทดสอบ MOV เบอร์ S 20 k275ด้วยรูปคลื่นผสม 1.2/50 μ s - 8/20 μ s ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ	83
5-1 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ	85
ก-1 ผลการทดสอบการทับซ้อนที่มุม 0 - 360 องศา ครั้งละ 5 องศา	93

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 การแบ่งตำแหน่งที่ตั้งของอุปกรณ์ตามโอกาสถูกรบกวนจากแรงดันกระชอก	6
2-2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เปิดวงจร 1.2/50 μ s	8
2-3 ลักษณะเวลาน้ำกลืน (Front Time), หลังกลืน (Duration) และจุดเสมือนศูนย์ (Virtual Origin) ของรูปคลื่นอิมพัลส์	9
2-4 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ลัดวงจร 8/20 μ s	10
2-5 การวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ ตามมาตรฐาน IEEE C62.41-1991	10
2-6 การจำลองวงจรเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 1.2/50 μ s , 8/20 μ s	12
2-7 การทดสอบอุปกรณ์โดยตรง	13
2-8 รูปคลื่นแรงดันกระชอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90°	14
2-9 การทดสอบอุปกรณ์ขณะต่อในระบบไฟฟ้า ด้วยการเชื่อมต่อด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor Coupling)	14
2-10 การเชื่อมต่อด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Coupling)	15
2-11 การเชื่อมต่อด้วยกับดักฟ้าผ่า (Arrestors Coupling)	15
2-12 การวัดแรงดันกระแสตรงด้วยวิธีแบ่งแรงดันชนิดความต้านทาน	16
2-13 ข่ายวงจร 4 ขั้วแทนระบบวัดแรงดันอิมพัลส์	17
2-14 วงจรวัดผลตอบแทนรูปขึ้นสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์	19
2-15 ค่าองค์ประกอบผลตอบแทนรูปขึ้นตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994)	20
2-16 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_α/T_x	20
2-17 วงจร Zero Crossing Detect	22
2-18 สัญญาณแรงดันในวงจร Zero Crossing Detect	22
3-1 บล็อกไดอะแกรมของส่วนประกอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ	25
3-2 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์พื้นฐาน วงจร A และ B	
(ก) วงจร A	26
(ข) วงจร B	26
3-3 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์	27
3-4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-5 วงจรการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	31
3-6 ลักษณะหน้าคลื่นของแรงดันอินพุตส์ที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ตั้งค่า 2 kV/div และ 0.5 μ s /div	31
3-7 ลักษณะหลังคลื่นของแรงดันอินพุตส์ที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ตั้งค่า 2 kV/div และ 5 μ s /div	32
3-8 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า	33
3-9 การจำลองวงจรเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	34
3-10 รูปคลื่นกระแสที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (500 V/div , 5 μ s/div)	35
3-11 รูปคลื่นหลังจากการปรับปรุงองค์ประกอบแล้วได้ตามมาตรฐาน (500 V/div , 5 μ s/div)	36
3-12 วงจรเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม	37
3-13 การจำลองวงจรสร้างรูปคลื่นผสมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	37
3-14 รูปคลื่นแรงดันจากการจำลองวงจรสร้างรูปคลื่นผสมด้วยคอมพิวเตอร์	37
3-15 รูปคลื่นกระแสจากการจำลองวงจรสร้างรูปคลื่นผสมด้วยคอมพิวเตอร์	38
3-16 รูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μ s ที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	40
3-17 รูปคลื่นกระแส 8/20 μ s ที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	41
3-18 วงจร RC-Transient	41
3-19 แรงดันและเวลาอัดประจุที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	43
3-20 วงจรอัดประจุ	43
3-21 ปลายอิเล็กโทรดด้านที่มีตัวจุลชนวน	44
3-22 ขนาดและลักษณะของอิเล็กโทรด	45
3-23 บล็อกไดอะแกรมของวงจรจุลชนวน	46
3-24 วงจรจุลชนวน	47
3-25 เวลาหน่วงของวงจรจุลชนวนเมื่ออัดประจุ 5 s	48
3-26 เวลาหน่วงของวงจรจุลชนวนเมื่ออัดประจุ 10 s	48
3-27 เวลาหน่วงของวงจรจุลชนวนเมื่ออัดประจุ 15 s	49
3-28 บล็อกไดอะแกรมของชุดควบคุมมุมเฟส	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-29 Flowchart การทำงานของโปรแกรมควบคุมมุมเฟส	50
3-30 บอร์ด Microcontroller รุ่น CP-SPI/S8252 V1.0	51
3-31 วงจรและอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟฟ้า 15 V _{dc}	51
3-32 วงจรและอุปกรณ์วงจร ADC	52
3-33 วงจรและอุปกรณ์วงจร Zero Crossing	52
3-34 วงจรและอุปกรณ์ของวงจรควบคุมการอัดประจุ C _s , ชุดจุดชนวนและ วงจรอัดประจุชุดจุดชนวน	53
3-35 ชุดควบคุมมุมเฟส	53
3-36 เปรียบเทียบสัญญาณจุดชนวนกับสัญญาณ Sine Wave	
(ก) ที่มุม 0°	54
(ข) ที่มุม 45°	54
(ค) ที่มุม 90°	54
(ง) ที่มุม 135°	54
(จ) ที่มุม 180°	54
(ฉ) ที่มุม 270°	54
3-37 ลักษณะของข้อผิดพลาดด้านที่มีหัวเทียนอยู่ข้างใน	55
3-38 ลักษณะข้อผิดพลาดด้านที่ไม่มีหัวเทียนอยู่ด้านใน	55
3-39 ข้อผิดพลาดด้านที่มีหัวเทียน	56
3-40 ขนาดและลักษณะโครงสวิตช์แรงสูง ทำจากท่อ PVC	56
3-41 ส่วนประกอบของ สวิตช์แรงดันสูง	56
3-42 วงจรจุดชนวนสวิตช์แรงสูง	58
3-43 ผลการทดสอบวงจรจุดชนวนเมื่ออัดประจุ C 33 μ F เป็นเวลา 5 s	58
3-44 L= 12.3 μ H , R _c = 16.6 Ω และ R _d = 0.5 Ω ที่สร้างขึ้น	60
3-45 C _s = 4 μ F ที่สร้างขึ้น	61
3-46 รูปคลื่นแรงดันขณะใส่ C _b และ ไม่ใส่ C _b	
(ก) ใส่ C _b	61
(ข) ไม่ใส่ C _b	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-47 ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม	62
4-1 หน้าคลื่นรูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μs รูปคลื่นบวก (+) (1V/div , 200 ns/div)	64
4-2 หลังคลื่นรูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μs รูปคลื่นบวก (+) (1 V/div , 10 μs /div)	64
4-3 หน้าคลื่นรูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μs รูปคลื่นบวก (-) (1V/div , 200 ns/div)	64
4-4 หลังคลื่นรูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μs รูปคลื่นบวก (-) (1 V/div , 10 μs /div)	65
4-5 รูปคลื่นกระแส 8/20 μs รูปคลื่นบวก (+) (500mV/div ,5 μs /div)	66
4-6 รูปคลื่นกระแส 8/20 μs รูปคลื่นบวก (-) (500mV/div ,5 μs /div)	66
4-7 การทับซ้อนของรูปคลื่นผสม (+) บนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0° , 90° , 180° และ 270° (500mV/div ,5 ms /div ; 1° = 55.56 μs)	
(ก) ที่มุม 0° (0 ms)	67
(ข) ที่มุม 90° (5 ms)	67
(ค) ที่มุม 180° (10 ms)	67
(ง) ที่มุม 270° (15 ms)	67
4-8 การทับซ้อนของรูปคลื่นผสม (-) บนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0° , 90° , 180° และ 270° (500mV/div ,5 ms /div)	
(ก) ที่มุม 0° (0 ms)	68
(ข) ที่มุม 90° (5 ms)	68
(ค) ที่มุม 180° (10 ms)	68
(ง) ที่มุม 270° (15 ms)	68
4-9 รูปคลื่นแรงดันบวก (+)	
(ก) หลังคลื่น 50.2 μs (1V/div , 10 μs /div)	69
(ข) หน้าคลื่น 1.17 μs (1V/div , 200 ns/div)	69
4-10 รูปคลื่นกระแส หน้าคลื่น 6.5 μs และ หลังคลื่น 17 μs (500 mV/div ,5 μs /div)	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-11 ลักษณะรูปคลื่นเมื่อทดสอบ MOV ด้านบวก (+) จำนวน 5 ครั้ง (500mV/div , 5 μ s/div)	
(ก) ครั้งที่ 1	70
(ข) ครั้งที่ 2	70
(ค) ครั้งที่ 3	71
(ง) ครั้งที่ 4	71
(จ) ครั้งที่ 5	71
4-12 รูปคลื่นแรงดันลบ (-)	
(ก) หน้าคลื่น 1.17 μ s (1V/div , 200 ns/div)	72
(ข) หลังคลื่น 49.4 μ s (1V/div , 10 μ s/div)	72
4-13 รูปคลื่นกระแส (-) หน้าคลื่น 6.13 μ s และหลังคลื่น 17 μ s (500mV/div , 5 μ s/div)	72
4-14 ลักษณะรูปคลื่นเมื่อทดสอบ MOV ด้านลบ (-) จำนวน 5 ครั้ง (500mV/div , 5 μ s/div)	
(ก) ครั้งที่ 1	73
(ข) ครั้งที่ 2	73
(ค) ครั้งที่ 3	73
(ง) ครั้งที่ 4	73
(จ) ครั้งที่ 5	73
4-15 รูปคลื่นแรงดันบวก (+)	
(ก) หลังคลื่น 50.2 μ s (1V/div , 10 μ s/div)	74
(ข) หน้าคลื่น 1.33 μ s (1V/div , 200ns/div)	74
4-16 รูปคลื่นกระแส (+) หน้าคลื่น 6.13 μ s หลังคลื่น 17 μ s (500mV/div , 5 μ s/div)	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-17 ลักษณะรูปคลื่นเมื่อทดสอบ MOV ด้านบวก (+) จำนวน 4 ครั้ง (500mV/div , 5 μ s/div)	
(ก) ครั้งที่ 1	75
(ข) ครั้งที่ 2	75
(ค) ครั้งที่ 3	75
(ง) ครั้งที่ 4	75
4-18 รูปคลื่นแรงดันลบ (-)	
(ก) หน้าคลื่น 1.18 μ s (1V/div , 200 ns/div)	76
(ข) หลังคลื่น 49.4 μ s (1V/div , 10 μ s/div)	76
4-19 รูปคลื่นกระแส (-) หน้าคลื่น 6.13 μ s และหลังคลื่น 17 μ s (500mV/div , 5 μ s/div)	76
4-20 ลักษณะรูปคลื่นเมื่อทดสอบ MOV ด้านบวก (-) จำนวน 4 ครั้ง (500mV/div , 5 μ s/div)	
(ก) ครั้งที่ 1	77
(ข) ครั้งที่ 2	77
(ค) ครั้งที่ 3	77
(ง) ครั้งที่ 4	77
4-21 EMG PARTNER Combination Wave Generator MIG 0630 IN	78
4.22 การเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันมาตรฐาน 6 kV 1.2/50 μ s	
(ก) รูปคลื่นแรงดัน (+) ของเครื่อง MIG 0630 IN (1V/div , 10 μ s/div)	78
(ข) รูปคลื่นแรงดัน (+) ของเครื่อง ที่สร้าง (1V/div , 10 μ s/div)	78
(ค) รูปคลื่นแรงดัน (-) ของเครื่อง MIG 0630 IN (1V/div , 10 μ s/div)	79
(ง) รูปคลื่นแรงดัน (-) ของเครื่อง ที่สร้าง (1V/div , 5 μ s/div)	79
4-23 การเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันมาตรฐาน 3 kA 8/20 μ s	
(ก) รูปคลื่นกระแส (+) ของเครื่อง MIG 0630 IN (500mV/div , 5 μ s/div)	79
(ข) รูปคลื่นกระแส (+) ของเครื่อง ที่สร้าง (500mV/div , 5 μ s/div)	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-24 การเปรียบเทียบรูปคลื่นกระแส 8/20 μs	
(ก) รูปคลื่นกระแส (-) ของเครื่อง MIG 0630 IN (500mV/div , 5 μs /div)	80
(ข) รูปคลื่นกระแส (-) ของเครื่อง ที่สร้าง (500mV/div , 5 μs /div)	80
4-25 รูปคลื่นจากการทดสอบ MOV เบอร์ S 20 K275 โดยตรงด้วยรูปคลื่นบวก (+)	
(ก) รูปคลื่นจากเครื่อง MIG 0630 IN (500mV/div , 5 μs /div)	82
(ข) รูปคลื่นจากเครื่อง ที่สร้าง (500mV/div , 5 μs /div)	82
4-26 รูปคลื่นจากการทดสอบ MOV เบอร์ S 20 K275 โดยตรงด้วยรูปคลื่นบวก (-)	
(ก) รูปคลื่นจากเครื่อง MIG 0630 IN (500mV/div , 5 μs /div)	82
(ข) รูปคลื่นจากเครื่อง ที่สร้าง (500mV/div , 5 μs /div)	82
4-27 การทดสอบ MOV เบอร์ S 20 K275 ด้วยรูปคลื่นบวก (+) ทับซ้อนที่มุม 90°	
(ก) รูปคลื่นจากเครื่อง MIG 0630 IN (500mV/div , 5 μs /div)	83
(ข) รูปคลื่นจากเครื่อง ที่สร้าง (500mV/div , 5 μs /div)	83
4-28 การทดสอบ MOV เบอร์ S 20 K275 ด้วยรูปคลื่นบวก (-) ทับซ้อนที่มุม 270°	
(ก) รูปคลื่นจากเครื่อง MIG 0630 IN (500mV/div , 5 μs /div)	84
(ข) รูปคลื่นจากเครื่อง ที่สร้าง (500mV/div , 5 μs /div)	84
ก-1 ส่วนประกอบและหน้าที่ของส่วนประกอบ ของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมทับซ้อน บนแรงดันกระแสสลับระหว่างมุม 0° ถึง 360°	92
ข-1 ส่วนประกอบของชุดควบคุมมุมเฟส	98
ข-2 หน้าจอ LCD เมื่อเปิดเครื่อง	98
ข-3 โหมด[1] Set Time Delay	99
ข-4 โหมด[2] Set Time Error	99
ข-5 โหมด[3]Read Volt Charge	99
ข-6 โหมด[4] Set Time Charge	100
ข-7 โหมด[5] Set Volt Charge	100
ข-8 โหมด[6] Set N Loop	100
ข-9 โหมด[7] Set Time Space	101

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ข-10 โหมด[8] Set Degree	101
ข-11 ปุ่มบน Key Pad	101
ข-12 ตัวอย่างการป้อนค่า เมนู[1] Set Time Delay เมื่อกด #	102
ข-13 ตัวอย่างการป้อนค่า เมนู[1] Set Time Delay เมื่อบันทึกค่า	102
ข-14 ตัวอย่างการป้อนค่า เมนู[5] Set Voltage Charge	103
ข-15 ตำแหน่งอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม	104
ข-16 วงจรควบคุมของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม	106

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งานในปัจจุบัน จะมีตำแหน่งการติดตั้งสภาพแวดล้อม และการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป ตามมาตรฐาน IEEE C62.41-1991 [1] และ IEC 6100-4-5 [2] ได้กำหนดขนาดแรงดัน กระแส และรูปคลื่นของแรงดันกระชอก (Surge Voltage) ที่มีโอกาสเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าแรงต่ำต่างกัน สาเหตุหลัก ๆ ของการเกิดแรงดันกระชอกมีอยู่ 2 ประการ [3] คือเกิดจากฟ้าผ่า (Lightning) และ เกิดจากการสับสวิตช์ (Switching) อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีคุณภาพต้องสามารถทนแรงดันกระชอกได้ หากเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่สามารถทนแรงดันกระชอกได้ แต่มีความจำเป็นต้องใช้งานในบริเวณที่มีโอกาสเกิดแรงดันกระชอก จึงต้องติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอก (Surge Protector) เพื่อใช้ป้องกันมิให้อุปกรณ์ไฟฟ้านั้นเกิดความเสียหายจากแรงดันกระชอก จำเป็นต้องมีเครื่องกำเนิดแรงดันกระชอก เพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละชนิดว่าสามารถทนแรงดันกระชอกอย่างน้อยได้ตามมาตรฐานกำหนดหรือไม่ แต่ในปัจจุบันเครื่องกำเนิดแรงดันกระชอกต้องนำเข้าจากต่างประเทศเท่านั้น และ มีราคาสูงมาก การทดสอบการทนแรงดันกระชอกของอุปกรณ์ไฟฟ้าจึงยังไม่สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริง แรงดันกระชอกปกติจะเกิดขึ้นที่ขั้วบนบนแรงดันกระแสสลับ แต่ไม่สามารถระบุตำแหน่งของมุมและทิศทางที่เกิดที่แน่นอนได้ ดังนั้นจึงต้องทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยแรงดันกระชอก ให้เหมือนกับสภาพการใช้งานจริงด้วยเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมแบบที่ขั้วบนบนแรงดันกระแสสลับที่มุมต่างๆ ได้ตั้งแต่ 0° - 360° สำหรับทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าขณะที่ต้องใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงต่ำตามมาตรฐาน IEEE C62.41-1991 [1] และ IEC 61000-4-5 [2] ด้วยการสร้างเครื่องทดสอบจะใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่ผลิตภายในประเทศเป็นหลัก จะเป็นการลดการนำเข้าอุปกรณ์ และสามารถลดต้นทุนการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมมาตรฐานขนาดแรงดัน 6 kV รูปคลื่น $1.2/50 \mu s$, กระแสลัดวงจร 3 kA รูปคลื่น $8/20 \mu s$

1.2.2 เพื่อออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่สามารถควบคุมมุมทับซ้อนได้ตั้งแต่ 0° - 360° , ขั้วบวก (+) และ ขั้วลบ (-) ขั้นละ 5°

1.2.3 เพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้า และอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ ตามมาตรฐาน IEEE C62.41-1991

1.2.4 เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอก และการป้องกันแรงดันกระชอกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

สร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมแบบทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่สามารถควบคุมมุมทับซ้อนได้ตั้งแต่ 0° - 360° ขั้นละ 5° ที่มีแรงดันขณะเปิดวงจร 6 kV รูปคลื่น $1.2/50 \mu s$ สามารถจ่ายกระแสลัดวงจรได้ 3 kA รูปคลื่น $8/20 \mu s$ และเปรียบเทียบผลการทดสอบรูปคลื่นที่สร้างได้กับมาตรฐาน IEEE C62.41-1991 เพื่อนำไปทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้า และอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ

1.4 วิธีการวิจัย

1.4.1 ออกแบบสร้างวงจรอัดประจุ ขนาดแรงดัน 7000 V_{DC}

1.4.2 ออกแบบสร้างวงจรสร้างรูปคลื่นผสมทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

1.4.3 ออกแบบสร้างสวิตช์แรงดันสูง

1.4.4 ออกแบบสร้างชุดควบคุมมุมเฟส 0° - 360° ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

1.4.5 ทำการทดสอบรูปคลื่นแรงดันเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน

1.4.6 ทำการทดสอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมทับซ้อนบนไฟฟ้ากระแสสลับ ที่มุม 0° - 360° ขั้นละ 5°

1.4.7 ทำการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอกขณะต่อในระบบไฟฟ้าที่มุม 90° ขั้วบวก(+) และ 270° ขั้วลบ (-)

1.4.8 สรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม ขนาดแรงดันเปิดวงจร 6 kV ลักษณะรูปคลื่น $1.2/50 \mu s$ กระแสลัดวงจร 3 kA ลักษณะรูปคลื่น $8/20 \mu s$ แบบทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่สามารถ

ปรับมุมทดสอบที่มุม 90° และ 270° สำหรับทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอก ขณะต่อในระบบไฟฟ้าแรงต่ำเขต B (Category B) และ เขต C (Category C) ตามมาตรฐาน IEEE C62.41-1991 [1] ข้อ 9.2

1.5.2 ได้เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม ขนาดแรงดันเปิดวงจร 6 kV ลักษณะรูปคลื่น $1.2/50 \mu s$ กระแสลัดวงจร 3 kA ลักษณะรูปคลื่น $8/20 \mu s$ แบบทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 220 V, 50 Hz ที่สามารถปรับมุมการทดสอบได้ตั้งแต่ 0° - 360° ขั้นละ 5° เพื่อการศึกษาวิชาคุณสมบัติฉนวน

1.5.3 ได้เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม ขนาดแรงดันเปิดวงจร 6 kV ลักษณะรูปคลื่น $1.2/50 \mu s$ กระแสลัดวงจร 3 kA ลักษณะรูปคลื่น $8/20 \mu s$ ใช้ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอกตามมาตรฐานของ IEC 61000-4-5 [2] ข้อ 6.1

1.5.4 เป็นแนวทางในการศึกษาวิชาเกี่ยวกับอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอก และการป้องกันแรงดันกระชอกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม ต้องอาศัยทฤษฎีต่างๆ เพื่อเป็นสมมติฐานของการวิจัย เช่น ทฤษฎีเกี่ยวกับการเกิดแรงดันกระชอก ผลกระทบของแรงดันกระชอกที่มีต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบแรงต่ำ การสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม เกณฑ์มาตรฐานรูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสมาตรฐาน IEEE C62.41-1991 ดังจะได้กล่าวทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1 การเกิดแรงดันกระชอก (Surge Voltage)

การเกิดแรงดันกระชอกในระบบแรงต่ำ (Low-Voltage AC Power Circuits) เกิดขึ้นจากแหล่งใหญ่ 2 แหล่ง คือ [1]

2.1.1 การเกิดฟ้าผ่า (Lightning) ทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดแรงดันกระชอก

2.1.2 การสับสวิตช์ (Switching Transient) การเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ เปิด-ปิด สวิตช์ของอุปกรณ์

2.2 ผลกระทบต่ออุปกรณ์เมื่อเกิดแรงดันกระชอก [2]

ผลกระทบของแรงดันกระชอกที่มีต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า สามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภท

2.2.1 อุปกรณ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมี 2 ลักษณะ คือ อุปกรณ์นั้นไม่ได้รับผลกระทบใดๆ จากแรงดันกระชอกที่เกิด และอาจทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลงในระดับที่ไม่สามารถสังเกตได้แต่สามารถทำงานได้ตามปกติ

2.2.2 อุปกรณ์มีการทำงานที่ผิดปกติ แต่อุปกรณ์สามารถกลับคืนสู่สภาพการทำงานปกติได้ด้วยตัวเอง หรืออาจต้องใช้เครื่องมือพิเศษช่วย

2.2.3 อุปกรณ์เกิดความเสียหาย ในกรณีนี้ คือ อุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบเกิดการชำรุดเสียหายและไม่สามารถใช้งานได้

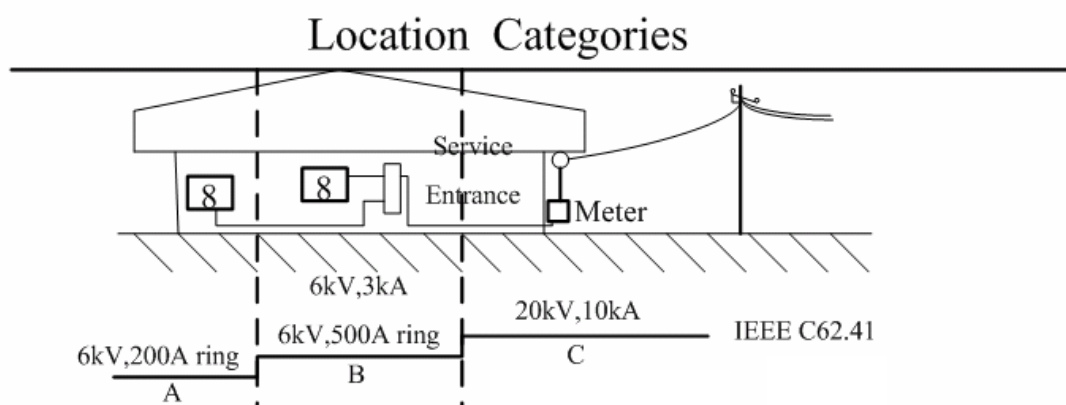
2.2.4 อุปกรณ์สร้างความเสียหายต่อเนื่องลุกลาม โดยอุปกรณ์ที่ได้รับความเสียหาย หรือเกิด

การทำงานที่ผิดปกติเป็นต้นเหตุก่อให้เกิดความเสียหายต่อไปยังอุปกรณ์รอบข้าง อาจก่อให้เกิดการระเบิดหรือลุกไหม้ได้

ดังนั้นจึงมีการทดสอบอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า ให้แน่ใจว่าทำงานได้ตามปกติเมื่ออุปกรณ์ได้รับแรงดันกระชอกจริง ๆ ในระบบ โดยใช้รูปคลื่นที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติในด้านต่างๆ คล้ายกับแรงดันกระชอกเพื่อจำลองสภาพแวดล้อมในการทดสอบ ให้เหมือนกับที่เกิดขึ้นในระบบจริงดังที่กล่าวข้างต้นแล้ว และยังคงคำนึงถึงขนาดแรงดันตกคร่อม และกระแสไหลผ่านตัวอุปกรณ์ที่เหมาะสม เพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริงเมื่อเกิดแรงดันกระชอกในระบบ โดยบอกเป็นอัตราส่วนแรงดันเปิดวงจรต่อกระแสลัดวงจร หรือที่เรียกว่า ความต้านทานแหล่งจ่าย (Source Impedance)

อุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอกควรจะทนต่อกระแสที่ไหลผ่านได้ เมื่อเกิดแรงดันกระชอก ดังนั้น เครื่องกำเนิดที่ใช้ทดสอบควรมีความต้านทานแหล่งจ่ายที่เหมาะสม หากความต้านทานแหล่งจ่ายสูงเกินไปก็จะไม่สามารถทดสอบอุปกรณ์ภายใต้ความเครียดที่เพียงพอได้ หรือถ้ามีความต้านทานแหล่งจ่ายน้อยเกินไปก็อาจเกิดความเครียดกับอุปกรณ์ในขณะที่ทดสอบมากเกินไป

การเลือกค่าความต้านทานแหล่งจ่าย ที่เหมาะสม เพื่อทดสอบอุปกรณ์ จึงมีการแบ่งตำแหน่งที่ตั้ง (Location Category) อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ได้รับผลกระทบจากแรงดันกระชอก ออกเป็น 3 ตำแหน่งที่ตั้ง ตามมาตรฐาน IEEE C62.41-1991 โดยพิจารณาจากจุดจ่ายไฟเข้าสู่อาคาร (Service Entrance) เป็นหลัก ดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 การแบ่งตำแหน่งที่ตั้งของอุปกรณ์ตามโอกาสการถูกรบกวนจากแรงดันกระชอก [1]

1. ตำแหน่งที่ตั้ง เอ (Category A) มีโอกาสถูกรบกวนและรับผลกระทบจากแรงดันกระชอกต่ำ

2. กลุ่มที่ตั้ง บี (Category B) มีโอกาสถูกรบกวน และรับผลกระทบจากแรงดันกระชากปานกลาง

3. กลุ่มที่ตั้ง ซี (Category C) มีโอกาสถูกรบกวนและรับผลกระทบจากแรงดันกระชากสูง

2.3 เกณฑ์ในการแบ่งตำแหน่งที่ตั้งของอุปกรณ์เพื่อใช้ทดสอบการถูกรบกวนจากแรงดันภายนอก

2.3.1 ตำแหน่งที่ตั้ง เอ (Category A)

2.3.1.1 อุปกรณ์และวงจรที่มีสาขายาว

2.3.1.2 อุปกรณ์ทั้งหมดที่มีระยะทางมากกว่า 10 เมตร (30 ฟุต) จากเขต บี (Category B)

2.3.1.3 อุปกรณ์ทั้งหมดที่มีระยะทางมากกว่า 20 เมตร (60 ฟุต) จากเขต บี (Category C)

2.3.2 ตำแหน่งที่ตั้ง บี (Category B)

2.3.2.1 ฟีดเดอร์ (Feeder) และวงจรสาขาสั้น ๆ

2.3.2.2 อุปกรณ์บนแผงวงจรจ่าย (Distribution Panel)

2.3.2.3 อุปกรณ์ขนาดใหญ่ที่อยู่ใกล้กับจุดเข้าสู่อาคาร

2.3.2.4 วงจรแสงสว่างในอาคารทั้งหมด

2.3.3 ตำแหน่งที่ตั้ง ซี (Category C)

2.3.3.1 บริเวณด้านนอกและจุดเข้าสู่อาคาร

2.3.3.2 ระยะตั้งแต่จุดแยกสายจากเสาเข้าสู่อาคาร

2.3.3.3 สายส่งที่เชื่อมโยงกับอาคารอื่นโดยรอบ

2.3.3.4 สายส่งใต้ดินไปจนถึงปั๊มน้ำใต้ดิน

2.4 ชนิดของรูปคลื่นที่ใช้ในการทดสอบ

รูปคลื่นที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย 5 ชนิด โดยแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักที่เป็นมาตรฐานในการทดสอบ และอีก 3 ชนิดเป็นรูปคลื่นเพิ่มเติม ได้แก่

1. รูปคลื่นแกว่ง 100 kHz (100 kHz ring Wave) – รูปคลื่นมาตรฐาน
2. รูปคลื่นผสม (Combination Wave) – รูปคลื่นมาตรฐาน
3. รูปคลื่น 5/50 ns EFT Burst – รูปคลื่นเพิ่มเติม
4. รูปคลื่น 10 /1000 μ s –รูปคลื่นเพิ่มเติม
5. รูปคลื่นแกว่ง 5 kHz (5 kHz ring Wave) – รูปคลื่นเพิ่มเติม

โดยแต่ละรูปคลื่นใช้ในการทดสอบดังตารางที่ 2-1 รายละเอียดของรูปคลื่นจะเป็นดังนี้

ตารางที่ 2-1 การทดสอบรูปคลื่นต่าง ๆ ในแต่ละเขตของอุปกรณ์ [1]

Location Category	100 kHz ring Wave	Combination Wave	5/50 ns EFT Burst	10/1000 μ s	5 kHz ring Wave
A	Standard	None	Additional	Additional	Additional
B	Standard	Standard	Additional	Additional	Additional
C	None	Standard	None	Additional	Additional

เนื่องจากงานวิจัยนี้เกี่ยวกับการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม จึงขอกล่าวรายละเอียดเฉพาะรูปคลื่นผสมเท่านั้น

2.5 รูปคลื่นผสม (Combination Wave) [3]

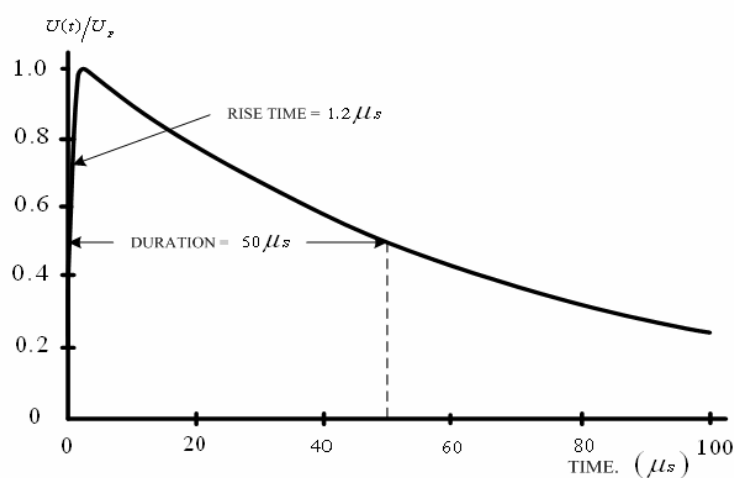
เป็นรูปคลื่นที่จัดอยู่ในกลุ่มที่มีพลังงานสูง คือ มีทั้งแรงดัน และกระแส เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน เช่น รูปคลื่นฟ้าผ่า ประกอบด้วยรูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μ s และรูปคลื่นกระแส 8/20 μ s

2.5.1 รูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μ s [3]

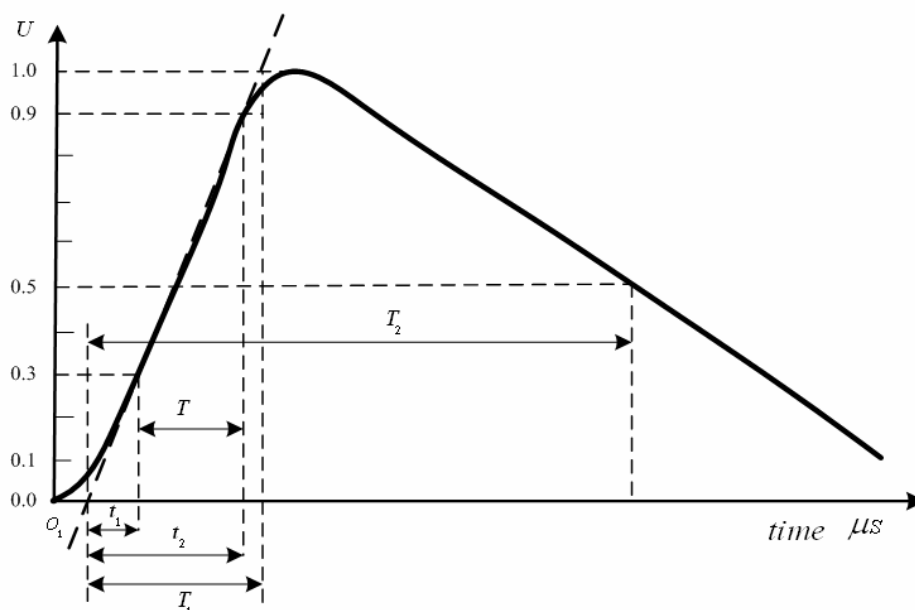
รูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μ s (ดังภาพที่ 2-2) ตามมาตรฐาน IEEE C62.41-1991 กำหนดไว้ดังนี้

หน้าคลื่น (T_1) : 1.2 μ s $\pm$ 0.36 μ s

หลังคลื่น (T_2) : 50 μ s $\pm$ 10 μ s



ภาพที่ 2-2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เปิดวงจร 1.2/50 μ s



ภาพที่ 2-3 ลักษณะเวลาหน้าคลื่น (Front Time), หลังคลื่น (Duration) และจุดเสมือนศูนย์ (Virtual Origin) ของรูปคลื่นอิมพัลส์ [2]

เวลาหน้าคลื่นของรูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μs สามารถหาได้จากการลากเส้นตรงผ่านช่วงที่รูปคลื่นด้านหน้ามีค่าแรงดัน 90 % และ 30 % ของค่าแรงดันสูงสุดตามลำดับ แล้วลากตัดแกนเวลา จุดตัดแกนเรียกว่าจุดเสมือนศูนย์ของแรงดันการวัดเวลาโดยวัดตั้งแต่ จุดเสมือนศูนย์ไปเทียบกับเวลาที่เส้นตรงที่ขนาดแรงดันเท่ากับแรงดันสูงสุดจะเป็นเวลาหน้าคลื่น (T_1) ส่วนเวลาหลังคลื่น (T_2) ให้เริ่มวัดตั้งแต่ จุดเสมือนศูนย์ O_1 จนถึงเวลาที่หลังคลื่นมีค่าแรงดัน 50 % ของค่าแรงดันสูงสุด

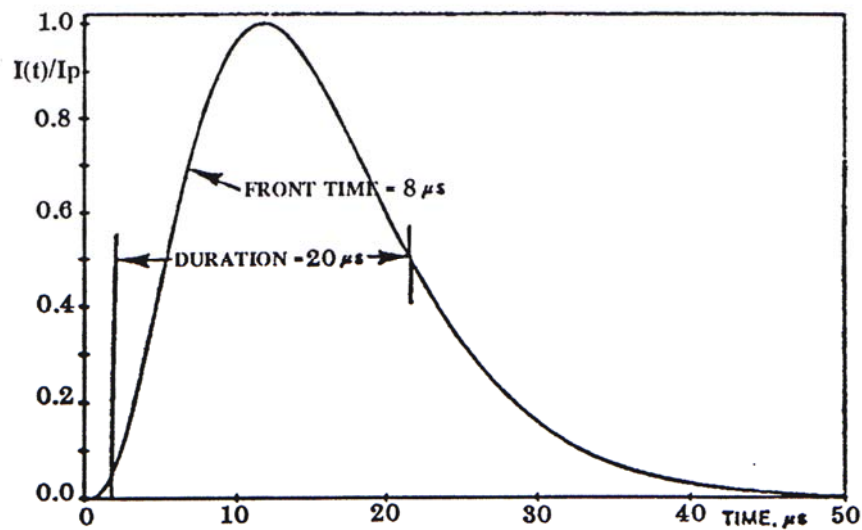
2.5.2 รูปคลื่นกระแส 8/20 μs [3]

รูปคลื่นแรงดัน 8/20 μs (ดังภาพที่ 2-4) ตามมาตรฐาน IEEE C62.41-1991 กำหนดไว้ดังนี้

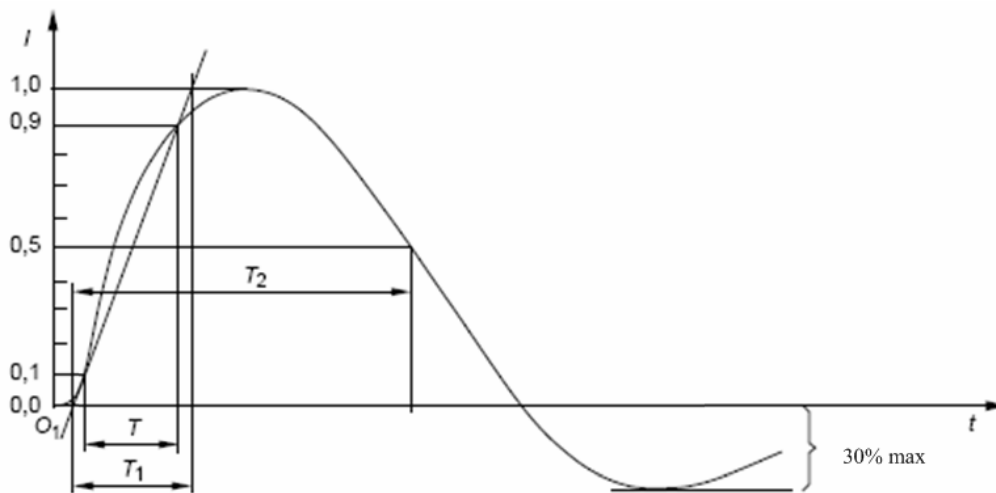
หน้าคลื่น (T_1) : 8 μs (+1.0, -2.5) μs

หลังคลื่น (T_2) : 20 μs (+8, -4) μs

เวลาหน้าคลื่น คือ 1.25 เท่าของเวลา $t_2 - t_1$ หรือ $1.25(t_2 - t_1)$ โดยที่ t_2 และ t_1 คือ เวลาที่หน้าคลื่นมีค่า 90 % และ 10 % ของค่ายอด ตามลำดับ ตำแหน่งของต่างๆที่ใช้ในการวัดได้กำหนดไว้ในภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-4 รูปคลื่นกระแสिमพัลส์ด้วงจร 8/20 μs



ภาพที่ 2-5 การวัดรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ ตามมาตรฐาน IEEE C62.41-1991

เวลาหลังคลื่น กำหนดโดยระยะเวลาระหว่างจุดเสมือนศูนย์ถึงจุดที่หางคลื่นมีค่า 50% ของค่ายอด โดยจุดเสมือน O_1 (Virtual Origin) สำหรับรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ก็คล้ายกับของรูปคลื่นแรงดัน แตต่างกันคือ เป็นจุดที่เส้นผ่านค่าที่ 10 % และ 90 % ของค่ากระแสสูงสุดที่หน้าคลื่นตัดกับเส้นแรงดัน $I = 0$ A โดยยอมให้เกิดกระแสชั่วตรงข้ามได้ไม่เกิน 30 % ของกระแสสูงสุด โดยที่เครื่องกำเนิดจะต้องมีอัตราส่วนระหว่างแรงดันสูงสุดต่อกระแสสูงสุด (U_{pk}/I_{pk}) เท่ากับ $2.0 \Omega \pm 0.25 \Omega$

การวัดรูปคลื่นกระแสมัลส์ในภาพที่ 2-5 กำหนดตำแหน่งต่าง ๆ ไว้โดยละเอียด ตามมาตรฐาน IEEE C62.41-1991 และยังได้กำหนดความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ (Tolerances) ของรูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μs และรูปคลื่นกระแส 8/20 μs ไว้ในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและกระแสตามเกณฑ์มาตรฐาน IEEE C62.41-1991 [3]

	ลักษณะรูปคลื่น	รูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μs	รูปคลื่นกระแส 8/20 μs
1	เวลาหน้าคลื่น T_1 (μs)	1.2 μs ($\pm 0.36 \mu\text{s}$)	8 μs (+1.0,-2.5) μs
2	เวลาหางคลื่น T_2 (μs)	50 μs ($\pm 10 \mu\text{s}$)	20 μs (+8,-4)
3	ค่ายอด (%)	$\pm 3 \%$	$\pm 10 \%$
4	ค่ากระแสสูงสุดชั่วตรงข้าม	-	ไม่เกิน 30 % ของสูงสุด

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบ 1.2/50 μs นั้น โดยทั่วไปจะใช้ในการทดสอบ BIL (Basic Impulse Insulation Level) ของฉนวน ส่วนรูปคลื่นกระแสมัลส์ 8/20 μs ใช้ในการทดสอบความคงทนของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอกต่อกระแสปริมาณมาก ๆ แรงดันและกระแสทั้งสองลักษณะนี้ก็สามารถเกิดขึ้นพร้อมกันในปรากฏการณ์เดียวกัน เช่น จากฟ้าผ่า และมีความจำเป็นที่ต้องรวมเอารูปคลื่นทั้งสองเอาไว้ในรูปคลื่นเดียวในกรณีที่ไม่ทราบว่าอุปกรณ์ทดสอบเป็นอุปกรณ์อะไร

รูปคลื่นผสมใช้ทดสอบในตำแหน่งที่ตั้ง บี (B) และ ซี(C) ซึ่งมีโอกาสได้รับผลกระทบจากฟ้าผ่ามากกว่าตำแหน่งที่ตั้ง เอ (A) โดยมีสูงสุดของรูปคลื่นทดสอบแตกต่างกันตามโอกาสการเกิดผลกระทบในแต่ละตำแหน่งที่ตั้ง ดังแสดงในตารางที่ 2-3

งานวิจัยนี้จะใช้แรงดัน 6 kV กระแส 3 kA ทดสอบอุปกรณ์ที่อยู่ในตำแหน่งติดตั้ง B3และC1

ตารางที่ 2-3 รูปคลื่นผสมกับการทดสอบในแต่ละตำแหน่งที่ตั้ง

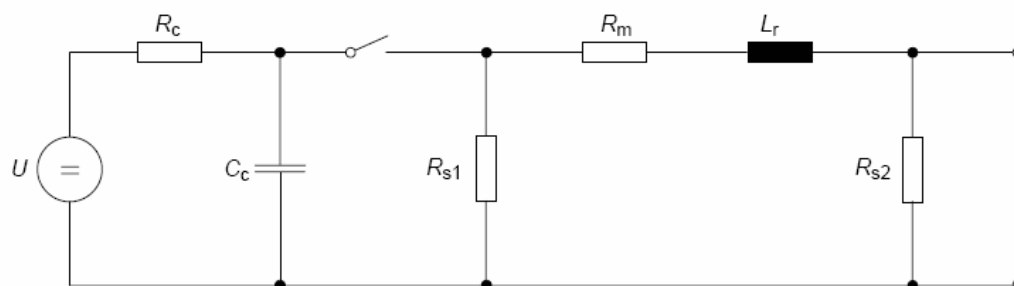
Location Category	System Exposure	Peak Values		Effective Impedance (Ω)
		Voltage (kV)	Current (kA)	
B1	Low	2	1	2
B2	Medium	4	2	2
B3	High	6	3	2

ตารางที่ 2-3 (ต่อ)

Location Category	System Exposure	Peak Values		Effective Impedance (Ω)
		Voltage (kV)	Current (kA)	
C1	Low	6	3	2
C2	Medium	10	5	2
C3	High	20	10	2

2.6 เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม (Combination Wave Generator ; CWG) 1.2/50 μ s – 8/20 μ s [2]

เป็นเครื่องกำเนิดที่มีลักษณะรูปคลื่นขณะเปิดวงจรเป็นรูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μ s และขณะลัดวงจรเป็นรูปคลื่นกระแส 8/20 μ s ลักษณะวงจรของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 1.2/50 μ s, 8/20 μ s ดังแสดงในภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 การจำลองวงจรเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 1.2/50 μ s , 8/20 μ s [2]

เมื่อ	U	คือ	แรงดันอัดประจุ
	R_c	คือ	ตัวต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ
	C_c	คือ	ตัวเก็บประจุหลัก
	R_s	คือ	ตัวต้านทานปรับหลังรูปคลื่น
	R_m	คือ	ตัวต้านทานปรับความเหมาะสมของ อิมพีแดนซ์
	L_r	คือ	ตัวเหนี่ยวนำปรับหน้ารูปคลื่น

คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 1.2/50 μ s – 8/20 μ s ตามมาตรฐาน IEEE C62.41-1991 ดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 1.2/50 μ s – 8/20 μ s ตามมาตรฐาน IEEE C62.41-1991

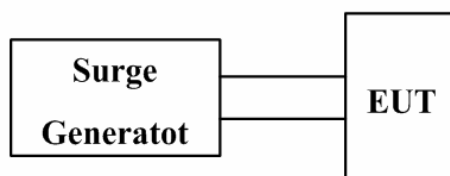
ข้อกำหนด	รายละเอียด
ขั้ว (Polarity)	บวก (+) และ ลบ (-)
มุมเฟส (Phase angle)	อยู่ระหว่าง 0°-360°
ค่ายอดของแรงดันเปิดวงจร	ปรับค่าได้ตั้งแต่ 1 kV จนถึงแรงดันทดสอบ
ลักษณะรูปคลื่นแรงดัน	ดังตารางที่ 2-2 และรูปที่ 2-3
ความคลาดเคลื่อนยอมรับได้ ของแรงดัน	ดังตารางที่ 2-2
ค่ายอดของกระแสลัดวงจร	ดังตารางที่ 2-2 และรูปที่ 2-5
ลักษณะรูปคลื่นกระแส	ดังตารางที่ 2-2 และรูปที่ 2-5
ความคลาดเคลื่อนยอมรับได้ของกระแส	ดังตารางที่ 2-2
อิมพีแดนซ์ (Impedance)	2 Ω ($\pm$ 0.25 Ω)

2.7 การทดสอบอุปกรณ์ (Equipment Under Testing ; EUT) [3]

การทดสอบอุปกรณ์ด้วยแรงดันกระชอกรูปคลื่นผสม แรงดันขณะเปิดวงจร 1.2/50 μ s กระแสลัดวงจร 8/20 μ s จะทำการทดสอบอุปกรณ์อยู่ 2 วิธี

2.7.1 การทดสอบโดยตรง (EUT Direct Coupling or Unpowered Tests) [3]

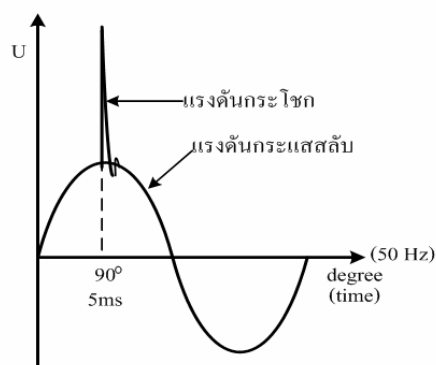
การทดสอบวิธีนี้จะต่อเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม (CWG) กับอุปกรณ์ที่จะทำการทดสอบโดยไม่จ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ที่จะทำการทดสอบดังภาพที่ 2-7 ก่อนทำการทดสอบจะต้องทำการทดสอบรูปคลื่นแรงดันและกระแสให้ได้ตามมาตรฐานจึงสามารถทำการทดสอบอุปกรณ์ได้



ภาพที่ 2-7 การทดสอบอุปกรณ์โดยตรง

2.7.2 การทดสอบอุปกรณ์ขณะต่อในระบบไฟฟ้า (EUT Connected to AC Power System) [3]

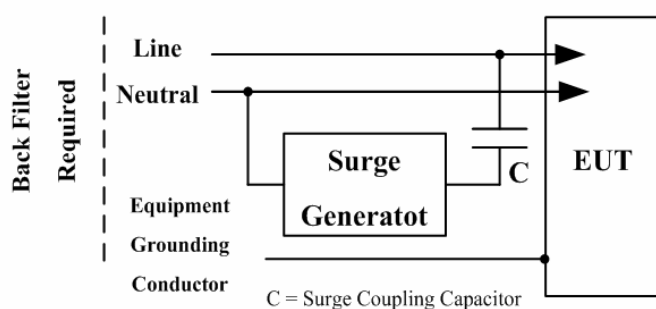
การทดสอบวิธีนี้ อุปกรณ์ที่จะทดสอบต้องต่อกับระบบไฟฟ้า แล้วปล่อยแรงดันกระชอกไปทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุมต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 2-8



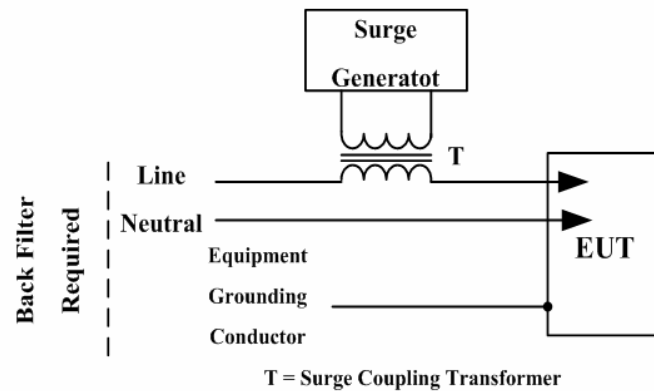
ภาพที่ 2-8 รูปคลื่นแรงดันกระชอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90°

การเชื่อมต่อของเครื่องกำเนิดกระชอกรูปคลื่นผสมกับระบบไฟฟ้ามีวิธีการต่างๆดังนี้

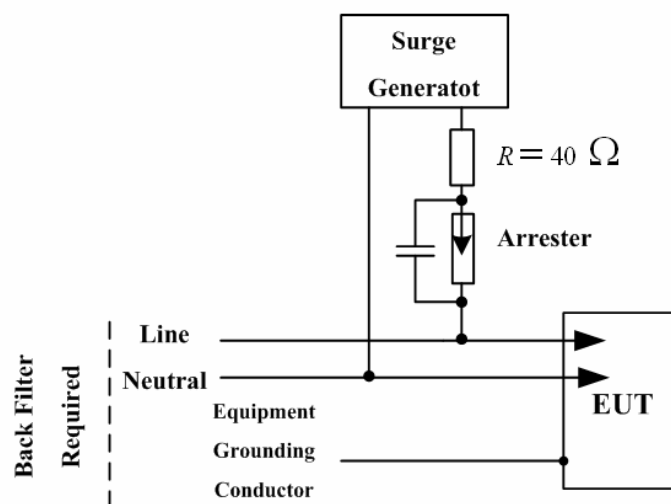
1. การเชื่อมต่อด้วยช่องว่างอากาศ (Coupling Gap)
2. การเชื่อมต่อด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor Coupling) ดังแสดงในภาพที่ 2-9
3. การเชื่อมต่อด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Coupling) ดังแสดงในภาพที่ 2-10
4. การเชื่อมต่อด้วยกับดักฟ้าผ่า (Arrestors Coupling) ดังแสดงในภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-9 การทดสอบอุปกรณ์ขณะต่อในระบบไฟฟ้า ด้วยการเชื่อมต่อด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor Coupling)



ภาพที่ 2-10 การเชื่อมต่อด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Coupling)



ภาพที่ 2-11 การเชื่อมต่อด้วยกับดักฟ้าผ่า (Arrestors Coupling) [2]

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการควบคุมมุมทับซ้อนของแรงดันไฟกระชากจึงจำเป็นต้องสร้างอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Coupler) ชนิดช่องว่างอากาศ ซึ่งได้ออกแบบรูปทรงเป็นทรงกลมกับทรงกลม เนื่องจากมีข้อดีดังนี้

1. สนามไฟฟ้าระหว่างทรงกลมที่เท่ากันจะมีลักษณะเกือบสม่ำเสมอถ้า $d < D/2$
2. สามารถควบคุมระยะการเบรกดาวนได้
3. ทนต่อแรงดันและกระแสได้สูง
4. ไม่มีค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อรูปคลื่นแรงดันไฟกระชากขณะทับซ้อน

2.8 การวัดแรงดันกระแสตรงด้วยวิธีแบ่งแรงดันชนิดความต้านทาน [4]

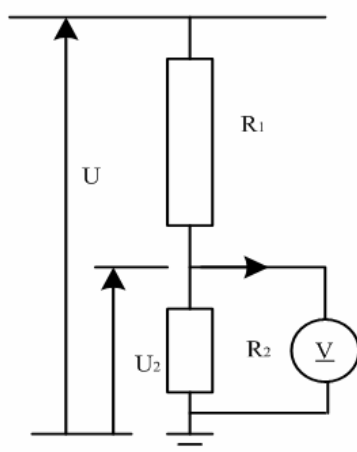
การวัดแรงดันกระแสตรงในงานวิจัยนี้ นำมาใช้ในส่วนของการควบคุมการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุหลักของวงจรสร้างรูปคลื่น จึงเลือกวิธีวัดด้วยความต้านทานแบ่งแรงดัน ซึ่งวงจรการวัดจะนำความต้านทานมาต่ออนุกรมกัน และแบ่งความต้านทานเป็น 2 ภาค คือ ความต้านทานภาคแรงสูง คือ R_1 และความต้านทานภาคแรงต่ำ คือ R_2 ดังภาพที่ 2-12 แรงดันที่วัดได้ทางด้านแรงต่ำสามารถหาค่าแรงดันสูงดังสมการที่ 2-2 [4]

$$U = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_2 \quad (2-2)$$

โดยที่ U คือ แรงดันสูงที่ต้องการวัด

U_2 คือ แรงดันคร่อมอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ

ความถูกต้องของการวัดจะขึ้นอยู่กับ ความต้านทาน และความเที่ยงตรงของเครื่องวัดแรงดันตกคร่อม R_2 ซึ่งจะเป็นโวลต์มิเตอร์



ภาพที่ 2-12 การวัดแรงดันกระแสตรงด้วยวิธีแบ่งแรงดันชนิดความต้านทาน

สิ่งที่คำนึงถึง คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวเนื่องจากแรงสูง ฉะนั้นฉนวนหุ้มความต้านทานต้องทนต่อแรงดันสูงได้ ในขณะเดียวกันกระแสที่รั่วไหลตามผิว อาจทำให้การวัดผิดพลาดได้ หากความต้านทานที่ใช้วัดแรงดันนั้นสูงเกินไป ฉะนั้นค่าความต้านทานจึงมีขีดจำกัดบน คือ ค่า R จะต้องไม่สูงมากเกินไป กระแสที่วัดจะไม่ต่ำมากเกินไป ($I \geq 0.1mA, R \leq 10M\Omega/kV$)

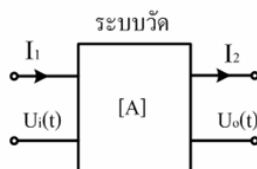
2.9 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์ [4]

การวัดแรงดันอิมพัลส์จะต้องวัดได้ทั้งขนาดและลักษณะของรูปคลื่นของแรงดัน เพื่อให้การวัดมีความถูกต้อง จะต้องมียุทธวิธีที่ดี ซึ่งคุณสมบัติของระบบวัดจะพิจารณาจากลักษณะที่สำคัญ

2 ประการคือ

2.9.1 ผลตอบสนองรูปขั้น (Step Response)

โวลเตจดีไวเดอร์ถือว่าเป็นองค์ประกอบเชิงเส้นแบบพาสซีฟ ซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วย ข่ายวงจร 4 ขั้วดังแสดงในภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 ข่ายวงจร 4 ขั้วแทนระบบวัดแรงดันอิมพัลส์

ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ขาเข้าและขาออกในเชิงความถี่ สามารถเขียนได้ด้วย สมการที่ 2-3

$$\begin{bmatrix} U_i(s) \\ I_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(s) & A_{12}(s) \\ A_{21}(s) & A_{22}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_o(s) \\ I_o(s) \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

เมื่อ s คือ ตัวแปรลาปลาซ

ในกรณีที่ $I_2 = 0$ จะสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ได้ดังสมการที่ 2-4

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{A_{11}(s)} \quad (2-4)$$

ค่า $H(s)$ จะแทนผลตอบสนองแอมพลิจูดและเฟสของระบบในเชิงความถี่ ที่ความถี่ต่างๆ แอมพลิจูดจะมีค่าคงที่ เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น แอมพลิจูดจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง ความถี่ที่แอมพลิจูดมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ± 3 dB เรียกว่าความถี่จำกัด ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ (Normalized) ได้ดังสมการที่ 2-5

$$h(s) = \frac{A_{11}(0)}{A_{11}(s)} \quad (2-5)$$

เนื่องจากโวลเตจดีไวเดอร์มีค่าสเกลแฟกเตอร์ค่อนข้างสูง การหาผลตอบสนองแอมพลิจูด/ความถี่ จึงทำได้ยาก วิธีที่นิยมใช้คือ การหาผลตอบสนองรูปขึ้น $G(t)$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ 2-6

$$G(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{s} H(s) \right] \quad (2-6)$$

จากผลตอบสนองรูปขึ้นที่ได้ สามารถคำนวณหาค่าแรงดันขาออกจากแรงดันขาเข้า $U_i(t)$ ใดๆ ได้ดังสมการที่ 2-7

$$U_o(t) = \int_0^t U_i'(t-\tau) \cdot G(\tau) \cdot d\tau \quad (2-7)$$

เมื่อ $U_i'(t-\tau)$ คือ อนุพันธ์ของ $U_i(t-\tau)$ เมื่อเทียบกับ τ

เวลาตอบสนองของระบบวัดสามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ ดังสมการที่ 2-8

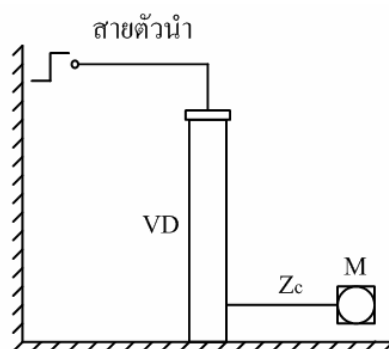
$$T_N = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{1-h(s)}{s} \right] \quad (2-8)$$

วงจรที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองรูปขึ้นตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) [5] ดังภาพที่ 2-14

ตามมาตรฐานได้กำหนดพารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปขึ้นที่วัดได้ดังนี้

1. จุดเริ่มต้นเสมือนของผลตอบสนองรูปขึ้น O_1 หมายถึง จุดตัดบนแกนเวลาของเส้นตรงที่ลากทาบส่วนที่ชันที่สุดของหน้าคลื่นของผลตอบสนองรูปขึ้น

2. ผลตอบสนองรูปขึ้นนอร์มัลไลซ์ $g(t)$ หมายถึง ผลตอบสนองนอร์มัลไลซ์ให้ระดับอ้างอิงมีค่าเป็นหนึ่งหน่วย ดังภาพที่ 2-15



ภาพที่ 2-14 วงจรวัดผลตอบสนองรูปขั้นสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์

3. อินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้น $T(t)$ หมายถึง อินทิกรัลจาก O_1 ถึง t ของ 1 ลบด้วยผลตอบสนองรูปขั้น $g(t)$ ดังสมการที่ 2-9 และภาพที่ 2-15

$$T(t) = \int_{O_1}^t (1 - g(t)) dt \quad (2-9)$$

4. เวลาตอบสนองบางส่วนจากการทดสอบ T_N หมายถึง ค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่ $t_{\max}$

$$T_N = T(t_{\max})$$

5. เวลาตอบสนองบางส่วน T_α หมายถึง ค่าสูงสุดของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้น

6. เวลาตอบสนองที่เหลือ $T_R(t_i)$ (Response Time) หมายถึง เวลาตอบสนองลบด้วยค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่เวลาที่กำหนด t_i โดย $t_i < t_{\max}$

$$T_R(t_i) = T_N - T(t_i) \quad (2-10)$$

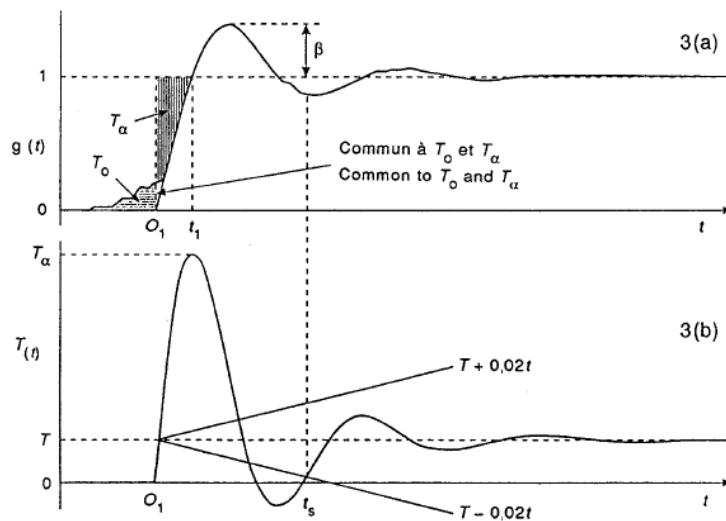
7. ส่วนพุ่งเกิน β (Overshoot) หมายถึง ค่าสูงสุดของผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ $g(t)$ ที่เกินหนึ่งหน่วย

8. เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้น T_0 หมายถึง พื้นที่รอบด้วยเส้นศูนย์ ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ $g(t)$ และเส้นตรงที่ใช้หา O_1

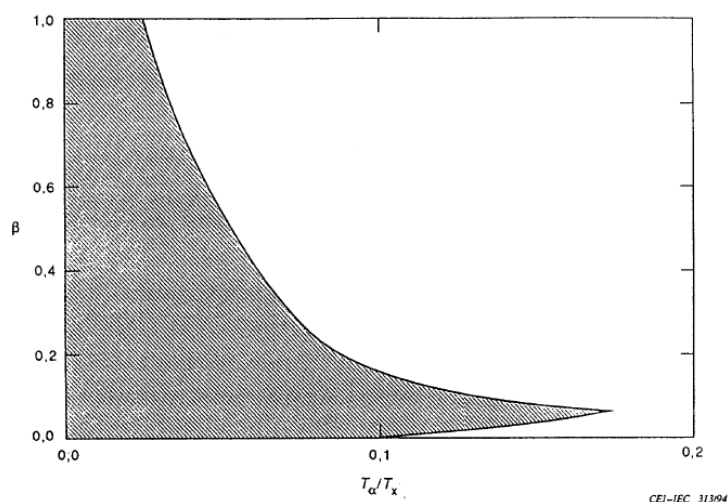
9. เวลาเข้าสู่ภาวะอยู่ตัว t_s หมายถึง เวลาที่สั้นที่สุดที่เวลาตอบสนองที่เหลือ $T_R(t_i)$ มีค่าน้อยกว่า 2 % ของ t

$$|T_N - T(t)| < 0.02t_s \quad (2-11)$$

สำหรับทุกๆ ค่าของ t ในช่วงจาก t_s ถึง $t_{\max}$



ภาพที่ 2-15 ค่าองค์ประกอบผลตอบสนองรูปขึ้นตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) [5]



ภาพที่ 2-16 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_α/T_x

การประเมินแรงดันแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม และรูปคลื่นตัดหางคลื่นของรูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่น T_x ค่าพารามิเตอร์ควรอยู่ในเงื่อนไข $\beta - T_\alpha/T_x$ จะต้องอยู่บริเวณส่วนที่เรเงา ดังภาพที่ 2-16 และมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) ได้กำหนดองค์ประกอบผลตอบแทนของรูปขึ้นหนึ่งหน่วยของระบบการวัดแรงดันอิมพัลส์ ไว้ดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 ผลตอบแทนของรูปขึ้นหนึ่งหน่วยของระบบการวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม
ตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) [5]

เวลาตอบสนอง (T_N)	เวลาเข้าสู่ภาวะอยู่ตัว (t_s)	เวลาตอบสนองบางส่วน (T_α)
≤ 15 ns	≤ 200 ns	≤ 30 ns

2.9.2 สเกลแฟกเตอร์

ตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) [5] ได้กำหนดคุณสมบัติของสเกลแฟกเตอร์ที่สำคัญ 2 ประการ คือ ความแม่นยำและความมีเสถียรภาพ ดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 ข้อกำหนดคุณสมบัติของสเกลแฟกเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) [5]

คุณสมบัติ	แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม
ความไม่แน่นอนในการวัดค่าขอด (Uncertainty)	$\pm 3\%$
ความมีเสถียรภาพ (Stability)	$\pm 1\%$

ในการหาสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์สามารถหาได้จากวิธีการใดวิธีหนึ่งดังต่อไปนี้

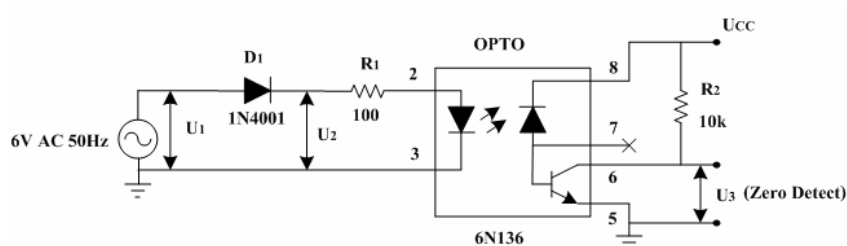
1. การวัดค่าแรงดันขาเข้า และขาออกพร้อมกัน
2. ใช้วงจรบริดจ์
3. คำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการวัดค่าแรงดันขาเข้าและขาออกพร้อมกัน

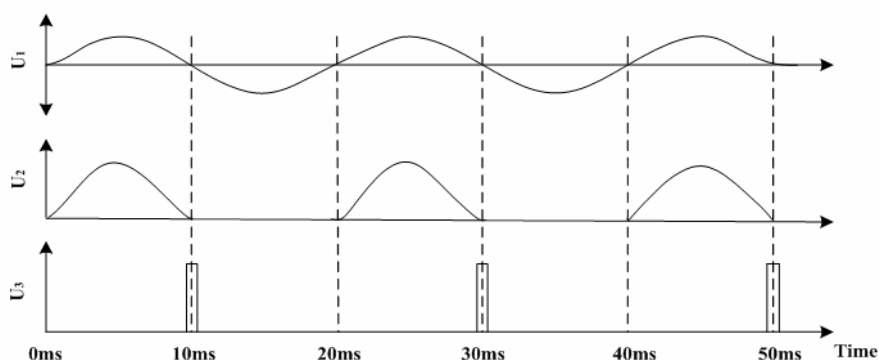
2.10 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero Crossing Detector Circuit) [6]

วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณแรงดันที่ตำแหน่งศูนย์โวลต์ จากวงจรตามภาพที่ 2-17 สามารถอธิบายหลักการทำงานของวงจรได้ว่า เมื่อป้อนแรงดัน U_1 สัญญาณ Sine เข้ามา

จะผ่าน D_1 (1N4001) ได้แรงดัน U_2 ซึ่งสัญญาณจะมีเฉพาะซีกบวก ส่งมายัง OPTO (6N136) ทำให้ OPTO “ON” เป็นผลให้ Transistor ที่อยู่ใน OPTO “ON” ด้วย จึงจะทำให้แรงดัน U_3 (Zero Detect) มีค่าเป็น 0 V และส่งไปยัง MCU (Micro controller Unit) แต่หากเป็นสัญญาณซีกลบ แรงดันจะไม่สามารถผ่าน D_1 ได้จึงเป็นผลให้ OPTO “OFF” แรงดัน U_3 จึงมีค่าเท่ากับ V_{CC} จึงสามารถ นำสัญญาณขอบขาลง ไป Detect เวลาที่เกิด Zero Crossing ได้ ดังภาพที่ 2-18



ภาพที่ 2-17 วงจร Zero Crossing Detect



ภาพที่ 2-18 สัญญาณแรงดันในวงจร Zero Crossing Detect

งานวิจัยนี้จึงใช้วงจรตรวจจับผ่านศูนย์สำหรับการควบคุมมุมทับซ้อนของแรงดันกระโชก กับแรงดันกระแสสลับ ด้วยชุดควบคุมมุมเฟส (Phase Controller) ซึ่งใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

2.11 ไมโครคอนโทรลเลอร์ [7]

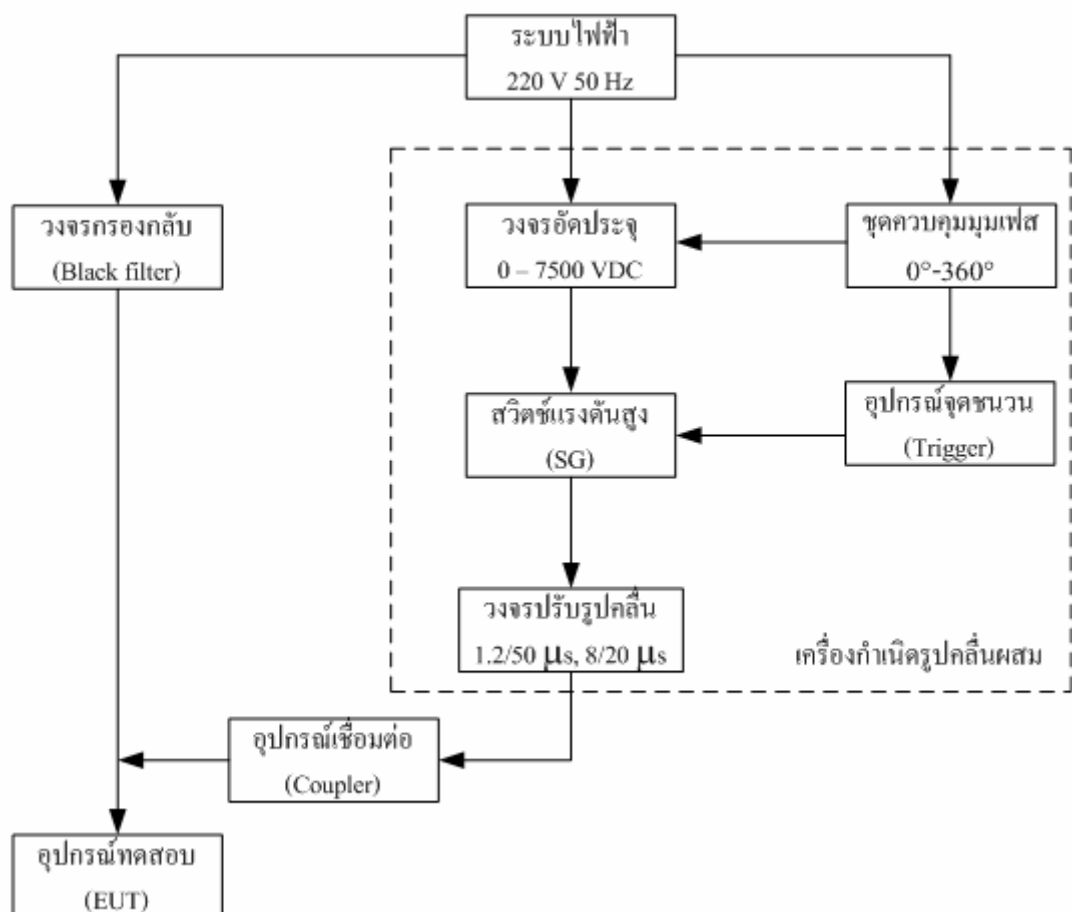
ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์ไอซี ที่สามารถสั่งการการทำงานได้หลายครั้ง สามารถรับข้อมูลในรูปสัญญาณดิจิทัล เพื่อทำการประมวลผลแล้วส่งผลลัพธ์ในรูปแบบของข้อมูลดิจิทัลออกมาเพื่อนำไปใช้งานตามที่ต้องการได้ ไมโครคอนโทรลเลอร์หรืออาจจะเรียกได้ว่า ไมโครโพรเซสเซอร์ชิปเดียวเป็นไมโครโพรเซสเซอร์ชนิดหนึ่ง มีลักษณะเช่นเดียวกับหน่วยประมวลผลกลางที่ใช้ในคอมพิวเตอร์ แต่ได้รับการพัฒนาแยกออกมาภายหลังเพื่อนำไปใช้งานวงจรที่เกี่ยวกับงานควบคุม คือสามารถใช้แทนที่ในการใช้งานโดยจะต้องวงจรภายนอกต่าง ๆ เพิ่มเติมเช่นเดียวกับไมโครโพรเซสเซอร์ ไมโครโพรเซสเซอร์จะทำการรวมวงจรที่จำเป็นเข้าด้วยกัน เช่น หน่วยความจำ ส่วนอินพุต/เอาต์พุต บางส่วนเข้าไปในตัวไอซีเดียวกัน สามารถเพิ่มวงจรบางอย่างเข้าไปเพื่อให้มีความสามารถเหมาะกับการใช้งานควบคุม เช่นวงจรตั้งเวลา วงจรการสื่อสารอนุกรม เป็นต้น ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จึงสามารถทำงานได้เสมือนกับคอมพิวเตอร์เล็ก ๆ เครื่องหนึ่ง ปัจจุบันไมโครคอนโทรลเลอร์ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง เพื่อใช้ควบคุมการทำงานบางอย่าง เช่น ใช้ในรถยนต์ เครื่องปรับอากาศและเครื่องซักผ้าอัตโนมัติ เป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS51 บอร์ดรุ่น CP-SPI/S8252 V1.0 และใช้ CPU รุ่น P89V51RD2 มีคุณสมบัติเป็นรุ่นที่มีความเร็วในการประมวลผลสูง และมีหน่วยความจำถึง 64 kB Flash เพื่อใช้ในการควบคุมการทับซ้อนของแรงดันกระชอกกับแรงดันกระแสสลับที่มุมต่างๆ

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

บทนี้จะอธิบายการออกแบบ และสร้างส่วนประกอบของสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม แบบทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่สามารถควบคุมมุมทับซ้อนได้ตั้งแต่ 0° - 360° มีแรงดันขณะเปิดวงจร 6 kV รูปคลื่น 1.2/50 μ s สามารถจ่ายกระแสลัดวงจรได้ 3 kA รูปคลื่น 8/20 μ s ส่วนประกอบของเครื่องดังแสดงในภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 บล็อกไดอะแกรมของส่วนประกอบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม
ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

การออกแบบ และสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมให้รูปคลื่นแรงดัน และกระแสได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน IEEE C62.41-1991 ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2-2 และให้ได้ขนาดแรงดันเท่ากับ 6 kV และกระแส 3 kA เพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งในตำแหน่งติดตั้ง B3 และ C1 ดังตารางที่ 2-3

ข้อกำหนดของการสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

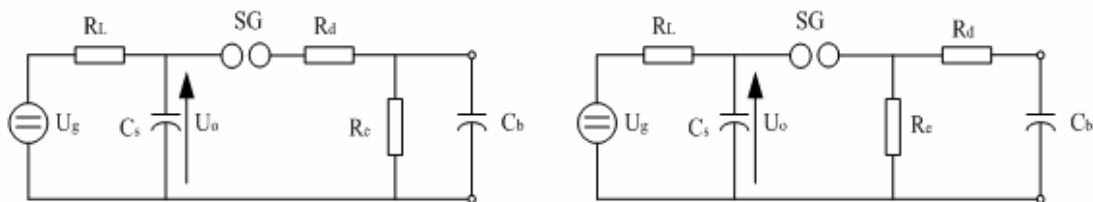
1. แรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิด U_n (kV) เท่ากับ 6 kV ตามมาตรฐาน IEEE
2. กระแสที่กำหนดของเครื่องกำเนิด เท่ากับ 3 kA ตามมาตรฐาน IEEE
3. แรงดันอัดประจุรวมทั้งหมด U_0 (kV) เท่ากับ 7 kV
4. ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด C_s (μ F) เท่ากับ 4 μ F
5. พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด W_e (kJ) จากสมการที่ 3-1[4]

$$W_e = \frac{1}{2} C_s U_0^2 \quad (3-1)$$

6. ลักษณะรูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μ s และรูปคลื่นกระแส 8/20 μ s
7. มุมทับซ้อน 0° - 360° ขั้นละ 5°

3.1 การออกแบบวงจรสร้างรูปคลื่นแรงดัน และกระแส

การออกแบบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยอาศัยข้อกำหนดทางด้านเทคนิค แรงดันที่ต้องการสร้างคือ แรงดัน 6 kV รูปคลื่นฟ้าผ่า 1.2/50 μ s ตามมาตรฐาน IEEE และ IEC การออกแบบใช้วงจรพื้นฐานดังแสดงในภาพที่ 3-2 [4]

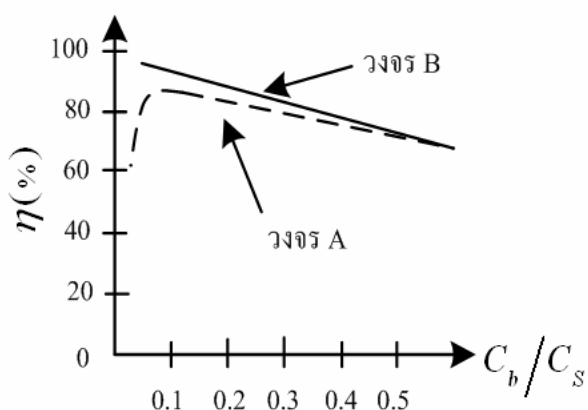


(ก) วงจร A

(ข) วงจร B

ภาพที่ 3-2 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์พื้นฐาน วงจร A และ B

ในการพิจารณาเลือกวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ ได้ทำการพิจารณาจากวงจร A และ B โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจร เมื่อทำการเปรียบเทียบกันแล้วพบว่าวงจร B มีประสิทธิภาพที่สูงกว่า ดังภาพที่ 3-3 จึงเลือกวงจร B ในการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์



ภาพที่ 3-3 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ [4]

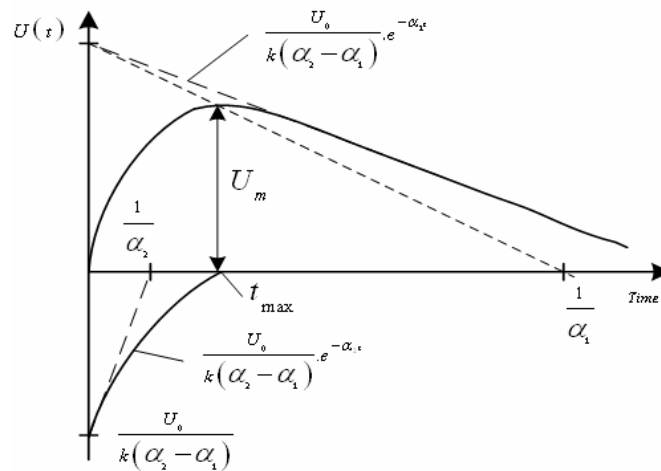
ในการออกแบบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์นั้นจะเริ่มจากการวิเคราะห์วงจรโดยใช้ ลาปลาซทรานฟอร์ม [4] และเมื่อจัดรูปสมการให้อยู่ในเทอมของเวลาจะได้สมการแรงดันอิมพัลส์ในเทอมของเวลา ดังสมการที่ 3-2 [4]

$$U(t) = \frac{U_0}{k} \cdot \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \cdot (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}) \quad (3-2)$$

เมื่อ	$U(t)$	คือ	แรงดันอิมพัลส์เปลี่ยนแปลงตามเวลา
	U_0	คือ	แรงดันอิมพัลส์กระแสตรง
	k	คือ	ค่าคงตัวของรูปคลื่นแรงดัน
	α_1, α_2	คือ	ค่าคงตัวเวลา (Time Constant)
	t	คือ	เวลาที่เปลี่ยนแปลง

จากสมการแรงดันที่ได้จากวงจรอิมพัลส์จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในเทอมของเวลาประกอบด้วยเทอมเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม ซึ่งมีค่าคงตัวเวลา (Time Constant) เท่ากับ

$\frac{1}{\alpha_1}$ และ $\frac{1}{\alpha_2}$ ดังแสดงในภาพที่ 3-4 [4]



ภาพที่ 3-4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม

จากสมการของแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานจะมีช่วงเวลาน้ำคลื่น และหลังคลื่น T_1 และ T_2 โดยมีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลา $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ T_1/T_2 อันเป็นตัวแสดงลักษณะของรูปคลื่น การหาค่า T_1 และ T_2 ได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3-3 และ 3-4 [4]

$$T_1 = \frac{k_2}{\alpha_2} \quad (3-3)$$

$$T_2 = \frac{k_1}{\alpha_1} \quad (3-4)$$

ค่า k_1 และ k_2 เป็นค่าคงตัวขึ้นอยู่กับรูปคลื่นดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ค่าแฟกเตอร์ k_1 และ k_2 สำหรับรูปคลื่นมาตรฐาน [4]

T_1 / T_2	k_1	k_2	$\frac{1}{\alpha_1}(\mu s)$	$\frac{1}{\alpha_2}(\mu s)$
1.2/5	1.44	1.49	3.47	0.805
1.2/50	0.73	2.96	68.5	0.405
1.2/200	0.70	3.15	286	0.381
250/2500	0.87	2.41	2875	104.0

3.1.1 การคำนวณหาค่าองค์ประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

การหาองค์ประกอบของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ จะหาได้จากสมการในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ค่าองค์ประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ [4]

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

การหาองค์ประกอบของวงจรเริ่มจากการหาค่า C_s เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลักของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์จะต้องมีการสะสมพลังงานได้มากพอควร และต้องคำนึงถึงขนาดของแรงดันด้วย และที่สำคัญการหาตัวเก็บประจุที่มีขนาดตั้งแต่ $1 \mu F$ ขึ้นไป ที่ทนแรงดันได้มากนั้นหายากมาก นอกจากจะนำตัวเก็บประจุที่ทนแรงดันต่ำมาต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้แรงดันเท่ากับที่ต้องการ แล้วนำมาขนานกันหลายๆชุด จึงจะได้ตัวเก็บประจุ ที่ได้ทั้งขนาดความจุมากๆ และทนแรงดันได้สูง แต่การนำตัวเก็บประจุขนาดเล็กๆมาต่อกันจำนวนมากๆนั้นเมื่อเกิดมีตัวใดตัวหนึ่งเสียก็จะทำให้ค่าของความจุรวมเปลี่ยนไป และอีกประการหนึ่งคือ คุณภาพของตัวเก็บประจุที่ใช้ในงานแรงต่ำเมื่อเทียบแรงสูงต่างกันมาก ถ้าเป็นไปได้จึงควรเลือกประเภทตัวเก็บประจุที่ทนแรงดันสูง ดังนั้นผู้ออกแบบจึง เลือกค่า $C_s = 4 \mu F$ เนื่องจากมีตัวเก็บประจุขนาด $8 \mu F$ แรงดัน $4000 V$ จำนวน 2 ตัว ถ้านำมาต่ออนุกรมกันจะได้ความจุเท่ากับ $4 \mu F$ ทนแรงดันได้ $8000 V$ เมื่อนำมาคำนวณหาพลังงาน จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จากสมการพลังงาน} \quad W_e &= \frac{1}{2} C_s U_0^2 \\ W_e &= \frac{1}{2} \cdot (4 \times 10^{-6}) \cdot (6000)^2 = 72 J \end{aligned}$$

การหาค่า C_b โดยใช้สมการประสิทธิภาพดังสมการที่ 3-5 [4]

$$\eta = \frac{\hat{U}}{U_0} \leq \frac{C_s}{C_s + C_b} \quad (3-5)$$

เมื่อ $\hat{U}$ คือแรงดันค่ายอดที่จ่ายออก

จากสมการประสิทธิภาพพบว่าถ้าหากต้องการให้ประสิทธิภาพของแรงดันมีค่าสูงๆ ควรให้ค่า C_s มีค่ามากกว่า C_b โดยใช้ค่า $C_b = 10 \text{ nF}$ เนื่องจาก C_b เป็นโหลดของวงจรอิมพัลส์ซึ่งแทนค่าด้วยค่าคาปาซิแตนซ์ของระบบการวัดมีค่าเท่ากับ 10 nF เมื่อนำมาแทนค่าในสมการประสิทธิภาพแล้วคำนวณหาได้ค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{C_s}{C_s + C_b} \\ &= \frac{4 \times 10^{-6}}{(4 \times 10^{-6} + 10 \times 10^{-9})} \\ &= 0.9975 \\ &= 99.75 \% \end{aligned}$$

เมื่อได้ค่า $C_s = 4 \text{ }\mu\text{F}$ และ $C_b = 10 \text{ nF}$ นำมาแทนค่าหาค่า R_d และ R_c ดังนี้

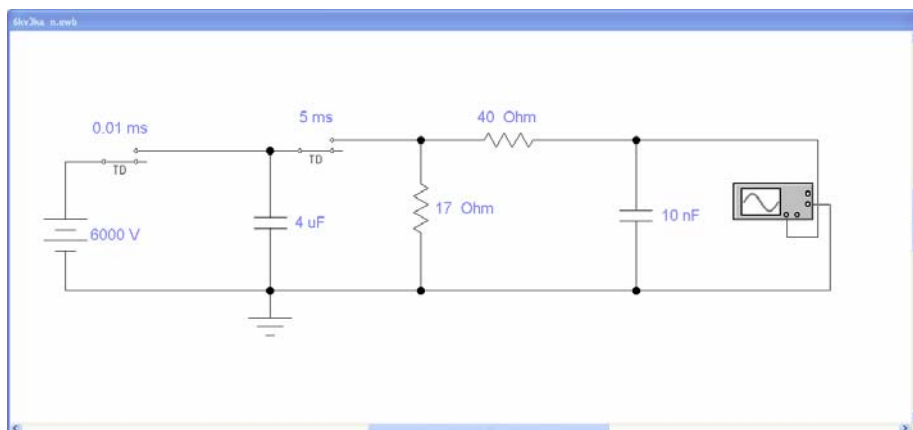
หาค่า R_d จากสมการ

$$\begin{aligned} T_1 &= k_2 R_d \cdot \frac{C_b C_s}{(C_b + C_s)} \\ R_d &= \frac{1.2 \times 10^{-6}}{(2.96 \times 10 \times 10^{-9})} \\ &= 40.64 \text{ }\Omega \end{aligned}$$

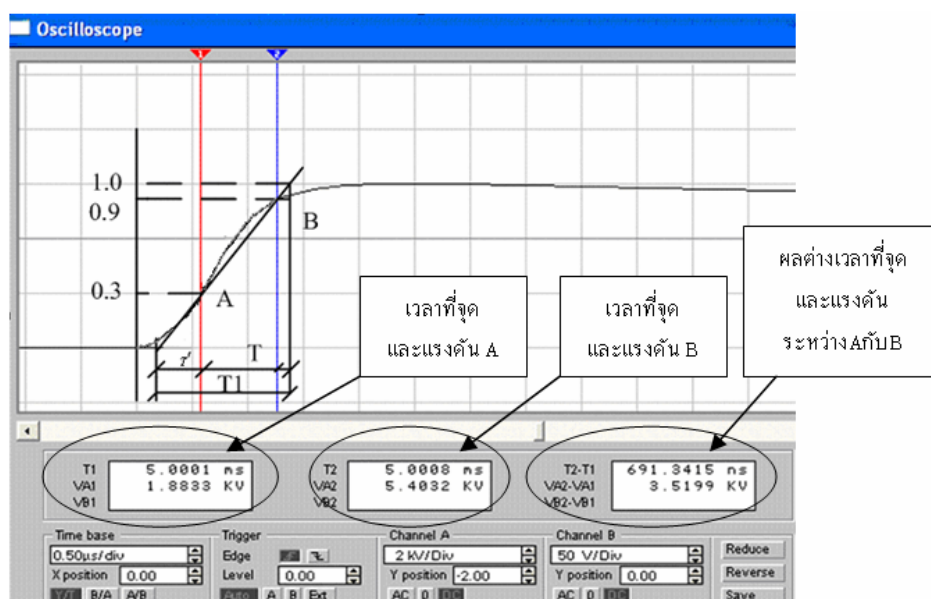
หาค่า R_c จากสมการ

$$\begin{aligned} T_2 &= k_1 R_c \cdot (C_b + C_s) \\ R_c &= \frac{50 \times 10^{-6}}{(0.73 \times 4.01 \times 10^{-6})} \\ &= 17.08 \text{ }\Omega \end{aligned}$$

เมื่อคำนวณหาองค์ประกอบของวงจรได้แล้วนำค่าที่ได้ไปจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ได้ใช้โปรแกรม Electronics Work Bench ซึ่งเป็นโปรแกรม สำเร็จรูปใช้งานง่ายและมีความเชื่อถือได้ วงจรการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ดังภาพที่ 3-5

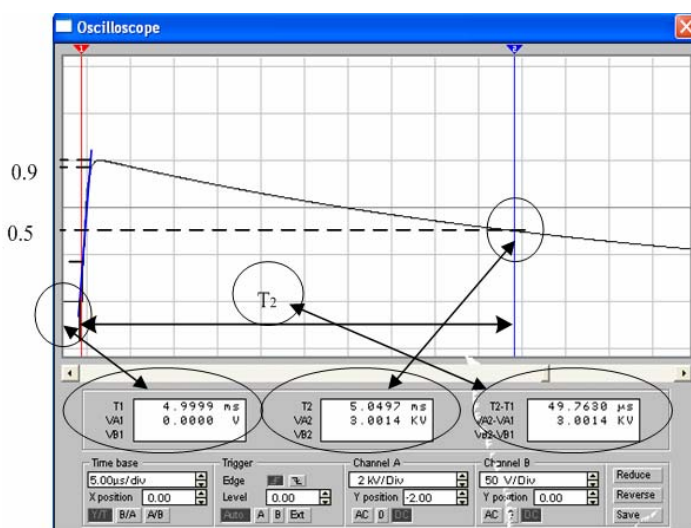


ภาพที่ 3-5 วงจรการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3-6 ลักษณะหน้าคลื่นของแรงแรงดันอิมพัลส์ที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
ตั้งค่า 2 kV/div และ 0.5 μ s /div

จากภาพที่ 3-6 ค่าความแตกต่างระหว่างจุด A กับ B (T) มีค่าเท่ากับ 691.34 ns หรือ 0.69 μ s เมื่อนำมาคำนวณหาค่าช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1) จากสมการ $T_1 = 1.67(T)$ จะได้ค่า $T_1 = 1.15 \mu$ s



ภาพที่ 3-7 ลักษณะหลังคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
ตั้งค่า 2 kV/div และ 5 μ s /div

จากภาพที่ 3-7 จะได้ค่าช่วงเวลาหลังคลื่นของแรงดันเท่ากับ 49.76 μ s โดยวัดจากตำแหน่ง 0 Virtual ถึง เวลาหลังคลื่นที่แรงดันเป็น 50 % ของแรงดันสูงสุด

จากภาพที่ 3-6 และ 3-7 นำค่าที่ได้มาคำนวณหาช่วงเวลาของหน้าคลื่น และหลังคลื่น ผลที่ได้ดังตารางที่ 3-3

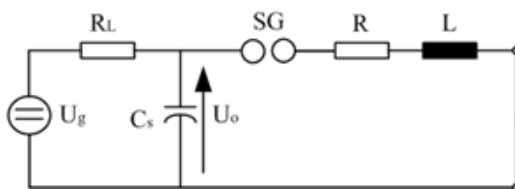
ตารางที่ 3-3 ผลการวัดรูปคลื่นที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากภาพที่ 3-6 และ 3-7

ตำแหน่ง	เวลา	แรงดัน	ค่ามาตรฐาน	ค่าผิดพลาด	Tolerance
1.0 (100 %)	-	6.01 kV	6.0 kV	0.17 %	$\pm 3 \%$
0.9 (t_{90})	0.8 μ s	5.46 kV	5.4 kV	0.06 kV	-
0.5 (t_{50})	50.6 μ s	3.01 kV	3.0 kV	0.01 kV	-
0.3 (t_{30})	0.1 μ s	1.84 kV	1.8 kV	0.04 kV	-
T (t_{90} - t_{30})	0.7 μ s	-	-	-	-
T_1 (1.67.T)	1.0 μ s	-	1.2 μ s	0.2 μ s	$\pm 0.36 \mu$ s
T_2	50.6 μ s	-	50 μ s	0.6 μ s	$\pm 10 \mu$ s

จากผลที่ได้ตามตาราง ค่า T_1 และ T_2 อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน จึงสามารถนำค่าที่คำนวณได้ไปสร้างวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้ การสร้างและผลการสร้างจะนำเสนอต่อไป

3.1.2 การคำนวณหาค่าองค์ประกอบวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์

การออกแบบวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์ โดยอาศัยวงจรพื้นฐานดังภาพที่ 3-8 ซึ่งการทำงานของวงจรจะคล้ายกับวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ เมื่อ C_s ปล่อยแรงดันที่อัดไว้ให้ดิสชาร์จผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ก็เกิดการอสซิลเลตแบบหน่วง เพราะในตัวเหนี่ยวนำ L จะมีความต้านทานโดยธรรมชาติ และถ้ามีความต้านทานมากก็จะเกิดการหน่วงมากขึ้น



ภาพที่ 3-8 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ [4]

การคำนวณหาองค์ประกอบของวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์จากสมการที่ 3-6 [4]

$$I = \frac{U}{L} \cdot \frac{2T_s}{\sqrt{(4\lambda^2 - 1)}} \cdot e^{\left(-\frac{t}{2T_s}\right)} \sin \sqrt{(4\lambda^2 - 1)} \cdot \frac{1}{2T_s} \quad (3-6)$$

เมื่อ U คือ แรงดันที่ป้อน

T_s คือ เวลาคงตัวของวงจรอันดับ $T_s = \frac{L}{R}$

λ คือ ดัชนีหน่วงของวงจรอันดับ $\lambda = \frac{Z}{R} = \frac{(\sqrt{L/C})}{R}$

การออกแบบวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์เมื่อทราบแรงดันที่อัดประจุให้กับ C_s เท่ากับ 6 kV และกระแสที่ต้องการสร้างคือ 3 kA จึงสามารถคำนวณหาค่าของตัวเหนี่ยวนำ L โดยประมาณได้ดังสมการที่ 3-7 [4]

$$I \approx \frac{U_0}{\sqrt{L/C}} \quad \text{และ} \quad \left(\frac{di}{dt}\right)_{\max} \approx \frac{U_0}{L} \quad (3-7)$$

แทนค่าในสมการ 3-6 เพื่อหาค่า L

$$\sqrt{L/C} \approx \frac{6 \times 10^3}{3 \times 10^3}$$

เมื่อเลือกให้ $C_s = 4 \mu F$ จะได้

$$L \approx 2^2 \times 4 \times 10^{-6} \approx 16 \mu H$$

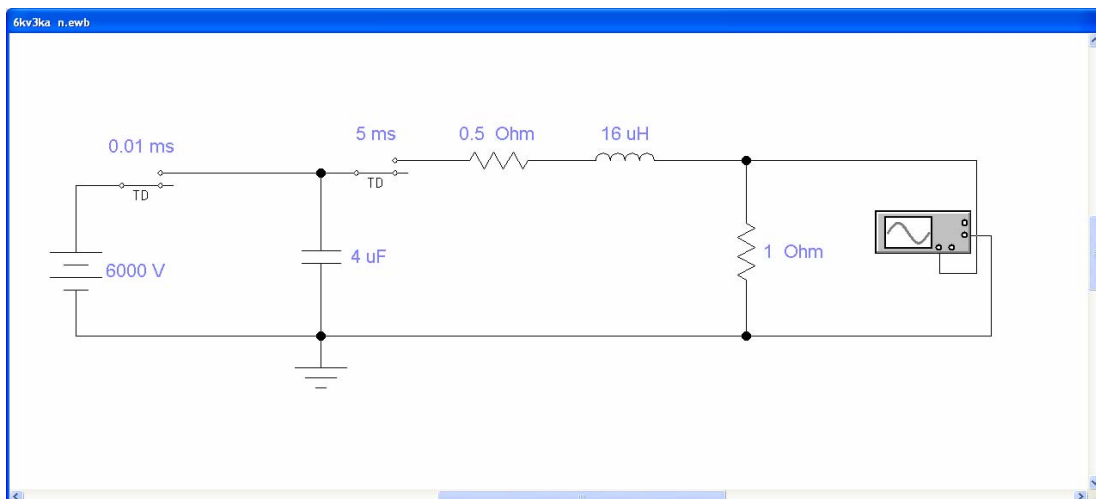
ดัชนีห้วงของวงจรกระแสอิมพัลส์โดยประมาณ

$$\lambda = \frac{(\sqrt{L/C})}{R} > \frac{1}{2}$$

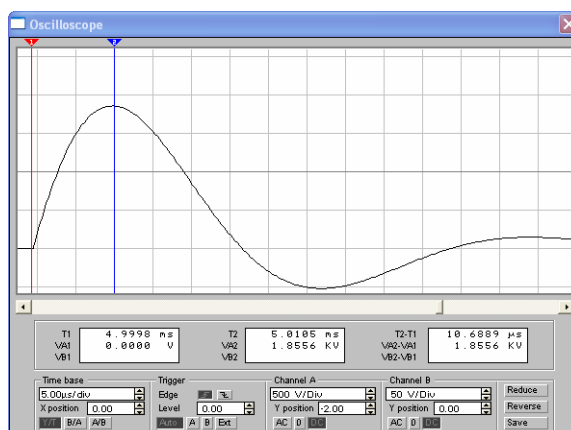
สามารถหาค่าความต้านทานห้วงได้โดยประมาณด้วยวิธีนอมัลไลซ์สัมพันธ์กับเวลา T_1/T_2 เมื่อได้องค์ประกอบของวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ดังนี้

$$C_s = 4 \mu F, L = 16 \mu H, R = 0.5 \Omega, U_0 = 6 \text{ kV} \text{ และ } I = 3 \text{ kA}$$

นำค่าที่ได้จากการคำนวณไปจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังภาพที่ 3-9 และ 3-10



ภาพที่ 3-9 การจำลองวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3-10 รูปคลื่นกระแสที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (500 V/div , 5 μs/div)

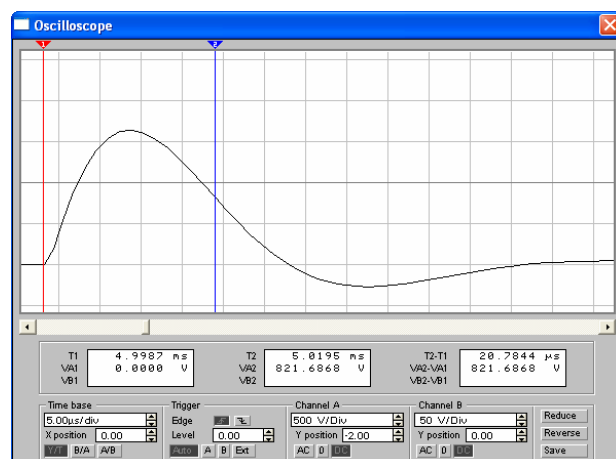
จากการนำค่าที่ได้จากการคำนวณไปจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะได้ดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 ผลการวัดรูปคลื่นกระแสฮิลล์จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ค่าที่ทำการวัด	มาตรฐาน	ค่าที่วัดได้	ค่าผิดพลาด	ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ
T_1	8 μs	8.05 μs	+0.05 μs	+1.0 μs, -2.5 μs
T_2	20 μs	20.09 μs	+0.09 μs	+8 μs, -4 μs
$\hat{I}$	3 kA	3.7 kA	23 %	± 10 %
$-\hat{I}$	0.6 kA	1.04 kA	34.6 %	ไม่เกิน 30 %

T_1 คือ ช่วงเวลาน้ำคลื่น
 T_2 คือ ช่วงเวลาหลังคลื่น
 $\hat{I}$ คือ กระแสสูงสุด
 $-\hat{I}$ คือ กระแสสูงสุดชั่วตรงข้าม

จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์รูปคลื่นที่ได้ยังไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานดังนั้นจึงต้องทำการปรับค่าองค์ประกอบเพื่อให้ได้ค่าตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน IEEE C62.41-1991



ภาพที่ 3-11 รูปคลื่นหลังจากการปรับปรุองค์ประกอบแล้วได้ตามมาตรฐาน (500 V/div , 5 μ s/div)

การปรับปรุค่าองค์ประกอบของวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์โดยปรับค่าความต้านทาน จาก 0.5 Ω เป็น 1 Ω จะได้รูปคลื่นกระแสดังแสดงในตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 ผลการวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เมื่อปรับค่า R = 1 Ω

ค่าที่ทำการวัด	มาตรฐาน	ค่าที่วัดได้	ค่าผิดพลาด	ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ
T_1	8 μ s	8.19 μ s	+0.19 μ s	+1.0 μ s, -2.5 μ s
T_2	20 μ s	20.78 μ s	+0.78 μ s	+8 μ s, -4 μ s
$\hat{I}$	3 kA	3.275 kA	9.17 %	± 10 %
$-\hat{I}$	0.6 kA	0.538 kA	17.93 %	ไม่เกิน 30 %

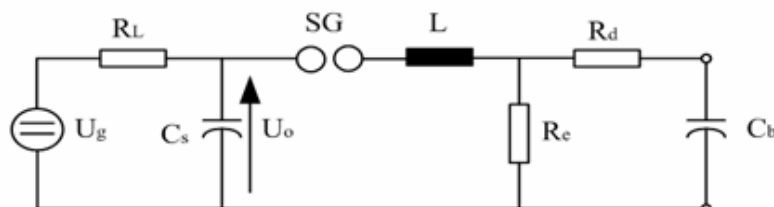
จากผลการปรับค่าองค์ประกอบในวงจรจนได้รูปคลื่นตามมาตรฐาน จึงนำค่าที่ได้ไปสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ s ขนาด 3 kA ต่อไป

3.1.3 การหาค่าองค์ประกอบของวงจรรูปคลื่นผสม

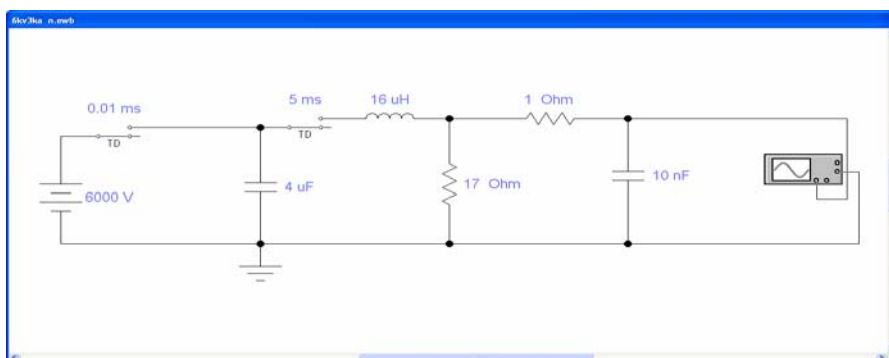
การหาค่าองค์ประกอบของวงจรสร้างรูปคลื่นผสมนี้ จะนำเอาวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ และวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์มารวมเป็นวงจรเดียวกันดังภาพที่ 3-12

เนื่องจากวงจรสร้างรูปคลื่นผสม เป็นวงจรที่สามารถสร้างได้ทั้งรูปคลื่นแรงดัน (ขณะเปิดวงจร) และรูปคลื่นกระแส (ขณะลัดวงจร)ได้ ในการออกแบบครั้งนี้ จะต้องสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมขนาดแรงดัน 6 kV ลักษณะรูปคลื่น 1.2/50 μ s (ขณะเปิดวงจร) และขนาดกระแส

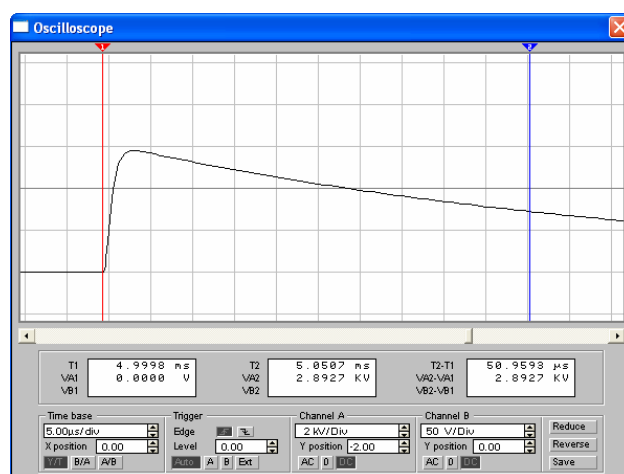
3 kA ลักษณะรูปคลื่น 8/20 μ s (ขณะลัดวงจร)แล้วจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังภาพที่ 3-13
ผลของการจำลองดังภาพที่ 3-14 และภาพที่ 3-15



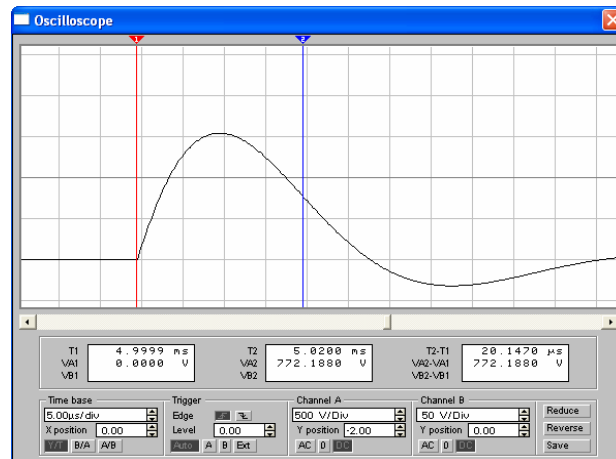
ภาพที่ 3-12 วงจรเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม [8]



ภาพที่ 3-13 การจำลองวงจรสร้างรูปคลื่นผสมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3-14 รูปคลื่นแรงดันจากการจำลองวงจรสร้างรูปคลื่นผสมด้วยคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3-15 รูปคลื่นกระแสจากการจำลองวงจรสร้างรูปคลื่นผสมด้วยคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 3-6 การวัดค่ารูปคลื่นแรงดันจากการจำลองวงจรสร้างรูปคลื่นผสมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ค่าที่ทำการวัด	มาตรฐาน	ค่าที่วัดได้	ค่าผิดพลาด	ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ
T_1	1.2 μs	2.0 μs	+0.8 μs	$\pm 0.36 \mu\text{s}$
T_2	50.0 μs	50.19 μs	+0.19 μs	$\pm 10 \mu\text{s}$
U	6.0 kA	5.78 kA	4.17 %	$\pm 3 \%$

ตารางที่ 3-7 การวัดค่ารูปคลื่นกระแสจากการจำลองวงจรสร้างรูปคลื่นผสมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ค่าที่ทำการวัด	มาตรฐาน	ค่าที่วัดได้	ค่าผิดพลาด	ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ
T_1	8.0 μs	7.9 μs	-0.1 μs	+1.0 μs , -2.5 μs
T_2	20.0 μs	20.15 μs	+0.15 μs	+8 μs , -4 μs
$\hat{I}$	3.0 kA	3.08 kA	2.67 %	$\pm 10 \%$
$-\hat{I}$	0.6 kA	0.32 kA	10.67 %	ไม่เกิน 30 %

จากผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ยังยอมรับไม่ได้เนื่องจากค่าของแรงดัน และเวลา T_1 ของรูปคลื่นแรงดันมีค่าเกินที่มาตรฐานกำหนดไว้ จึงจำเป็นต้องปรับปรุงองค์ประกอบของวงจรยกเว้น C_s คงที่ (เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ถูกจำกัด)

โดยมีเกณฑ์ในการปรับค่าองค์ประกอบดังนี้

1. การปรับค่าหน้าคลื่นของแรงดันและกระแสจะปรับค่า L
2. การปรับค่าหลังคลื่นของแรงดันและกระแสจะปรับค่า R_e
3. การปรับค่ายอดของแรงดันจะปรับ R_e
4. การหน่วง (Duration) ของรูปคลื่นกระแสจะปรับ R_d และ L

เมื่อทำการปรับองค์ประกอบต่างๆของวงจรจนมีค่าดังแสดงในตารางที่ 3-8 จนผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้รูปคลื่นแรงดันและกระแสมีค่าต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3-9 และ 3-10 และลักษณะรูปคลื่นดังแสดงในภาพที่ 3-16 และ 3-17

จากผลของการจำลองวงจรสร้างรูปคลื่นผสมขนาด 6 kV, 1.2/50 μ s - 3 kA , 8/20 μ s ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สรุปได้ว่าค่าองค์ประกอบที่ทำการปรับปรุง และผลของลักษณะรูปคลื่นแรงดันและกระแสได้ตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน IEEE C62.41-1991 ทุกประการ และมีประสิทธิภาพของแรงดันจากสมการ $\eta = U/U_g$ (ค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน ต่อ แรงดันอัดประจุ C_s) มีค่าเท่ากับ 96.3 % ถือว่าวงจรนี้มีประสิทธิภาพสูง

ตารางที่ 3-8 ค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

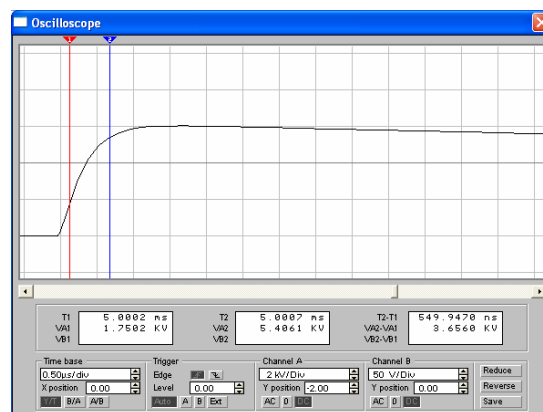
อุปกรณ์	ค่าของอุปกรณ์
C_s	4 μ F
C_b	9 nF
L	12.5 μ H
R_e	19 Ω
R_d	0.65 Ω

ตารางที่ 3-9 การวัดค่ารูปคลื่นแรงดันที่ออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

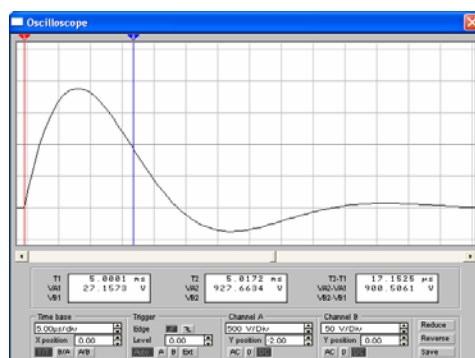
ค่าที่ทำการวัด	มาตรฐาน	ค่าที่วัดได้	ค่าผิดพลาด	ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ
T_1	1.2 μ s	0.937 μ s	-0.563 μ s	$\pm 0.36 \mu$ s
T_2	50.0 μ s	45.5 μ s	- 4.5 μ s	$\pm 10 \mu$ s
U	6.0 kA	6.03 kA	+1.0 %	$\pm 3 \%$

ตารางที่ 3-10 การวัดค่ารูปคลื่นกระแสที่ออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ค่าที่ทำการวัด	มาตรฐาน	ค่าที่วัดได้	ค่าผิดพลาด	ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ
T_1	8.0 μ s	6.325 μ s	-1.67 μ s	+10 μ s , -2.5 μ s
T_2	20.0 μ s	17.15 μ s	-2.85 μ s	+8 μ s , -4 μ s
$\hat{I}$	3.0 kA	2.805 kA	6.5 %	$\pm 10 \%$
$-\hat{I}$	0.6 kA	0.534 kA	11 %	ไม่เกิน 30 %



ภาพที่ 3-16 รูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μ s ที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3-17 รูปคลื่นกระแส 8/20 μ s ที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.2 การออกแบบวงจรอัดประจุ (Charging Circuit)

การออกแบบวงจรอัดประจุโดยอาศัยหลักการของวงจร RC-Transient ดังภาพที่ 3-18 โดยมีสมการแรงดันและสมการกระแสดังสมการที่ 3-8 และ 3-9 ตามลำดับ[8]

สมการแรงดันอัดประจุ

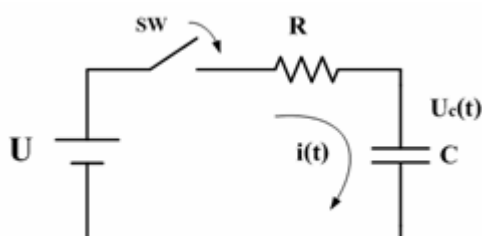
$$U_c(t) = U \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (3-8)$$

สมการกระแส

$$i(t) = \frac{E}{R} \left(e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (3.9)$$

ค่าคงที่ของเวลาในการอัดประจุ

$$\tau = RC \quad (3-10)$$



ภาพที่ 3-18 วงจร RC-Transient

ในการออกแบบวงจรอัดประจุต้องคำนึงถึงกระแสสูงสุดในขณะที่สับสวิตช์ (เมื่อเวลา $t=0$) จะทำให้มีกระแสไหลในวงจรสูงที่สุดมีขนาดเท่ากับ U/R ดังนั้นจำเป็นต้องคำนวณหาความต้านทานที่มีค่าเหมาะสมโดยต้องคำนึงถึงกระแสสูงสุดที่หม้อแปลงจ่ายได้ โดยคำนวณจาก กำลังฟักัดของ หม้อแปลง (VA) หารด้วยแรงดันสูงสุด (V) ของหม้อแปลงที่จ่ายออก จากภาพที่ 3-20 หม้อแปลง Tr₂ ขนาดกำลังฟักัด 300 VA แรงดันสูงสุด 7000 V เป็นตัวจ่ายแรงดันให้กับวงจรอัดประจุ ดังนั้นต้องทำการคำนวณหากระแสสูงสุดที่หม้อแปลงตัวที่จ่ายได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} I_{\max} &= \frac{S}{U} \\ &= \frac{300VA}{7000V} \\ &= 42.85 \text{ mA} \end{aligned}$$

เมื่อทราบขนาดกระแสสูงสุดที่ไหลในวงจรอัดประจุจึงมาคำนวณหาค่าความต้านทานเพื่อ จำกัดกระแสในการอัดประจุ ดังนี้

$$\begin{aligned} R &= \frac{U}{I_{\max}} \\ &= \frac{7000V}{42.85mA} \\ &= 163.36 \approx 163 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

เวลาที่ใช้ในการประจุหาได้จากสมการที่ 3-9

$$\tau = RC = 163000 \times 4 \times 10^{-6} = 0.652 \text{ s} = 652 \text{ ms}$$

เมื่อนำค่าที่ได้ไปจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะได้ผลดังภาพที่ 3-19 ผลที่ได้ถ้า ต้องการอัดประจุให้ตัวเก็บประจุให้มีแรงดัน 6000 V จะใช้เวลาอัดประจุ 1.297 s หรือ ประมาณ 2τ ต้องการอัดประจุให้เร็วขึ้นจะต้องลดค่าความต้านทานลง

ประสิทธิภาพของวงจรอัดประจุ หาได้จากสมการที่ 3-11

$$\eta = \frac{U_c}{U} \quad (3-11)$$

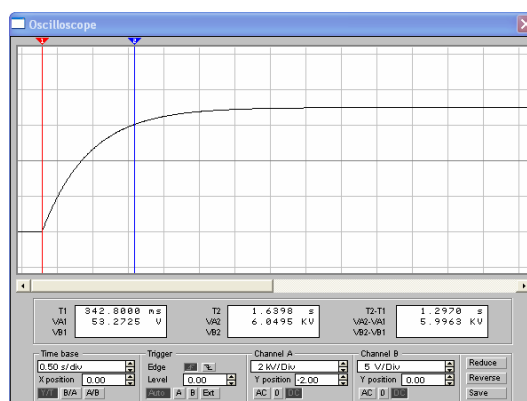
เมื่อ U_c คือ แรงดันที่ตกคร่อม C_s มีค่าเท่ากับ 6000 V_{dc}

U คือ แรงดันของแหล่งจ่าย มีค่าเท่ากับ 7000 V_{ac} หรือ เท่ากับ

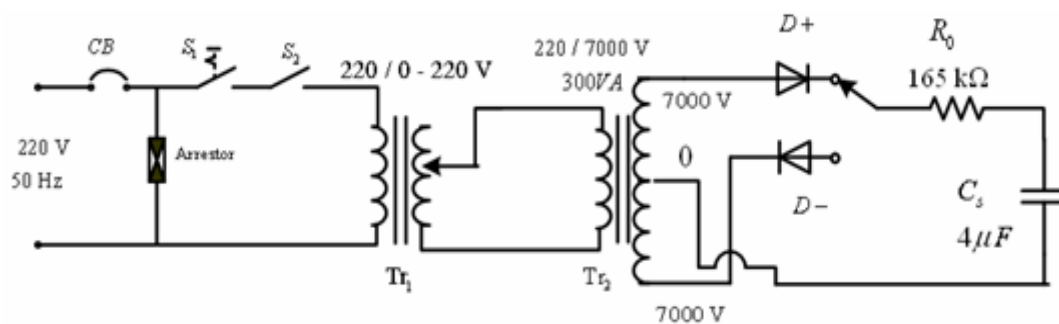
$$\sqrt{2} \times 7000 = 9899.49 \text{ V}_{pk}$$

เมื่อกำหนดค่าประสิทธิภาพของวงจรได้เท่ากับ

$$\eta = \frac{6000}{9899.49} = 0.606 \text{ หรือ } 60.6 \%$$



ภาพที่ 3-19 แรงดันและเวลาอัดประจุที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3-20 วงจรอัดประจุ

จากวงจรตามภาพที่ 3-20 มีรายละเอียดของสัญลักษณ์ต่างๆดังนี้

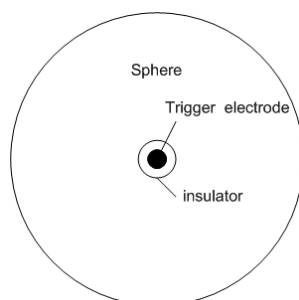
1. CB คือ Circuit Breaker - ขนาด 10 A
2. S_1 คือ สวิตช์เปิด-ปิด (ON-OFF) วงจรอัดประจุ
3. S_2 คือ หน้าสัมผัสของรีเลย์ (Relay) แบบปกติเปิด (NO ; Normal Open)
4. Tr_1 คือ หม้อแปลงแบบปรับแรงดันได้อัตราส่วนแรงดัน 220 / 0-220 V , 300 VA
5. Tr_2 คือ หม้อแปลงแรงสูงอัตราส่วนแรงดัน 220 / 7000 V , 300 VA
6. D+ คือ ไดโอดเรียงกระแสอัดประจุด้านบวก (+) 12 kV
7. D- คือ ไดโอดเรียงกระแสอัดประจุด้านลบ (-) 12 kV
8. R_0 คือ ความต้านทานจำกัดกระแสขนาด 165 k Ω ใช้ R 20 k Ω , 5 W 8 ตัว ,
และ R 5 k Ω , 5 W 1 ตัว
9. C_s คือ ตัวเก็บประจุหลักขนาด 4 μ F , 8000 V โดยใช้ 8 μ F 4000 V_{DC} 2 ตัวต่อ
อนุกรมกัน

3.3 การออกแบบสวิตช์แรงดันสูง (High Voltage Switch)

การออกแบบสวิตช์แรงดันสูง จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สปาร์กแกป (Spark Gap) และ วงจรจุดชนวน (Trigger) ซึ่งในแต่ละส่วนมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

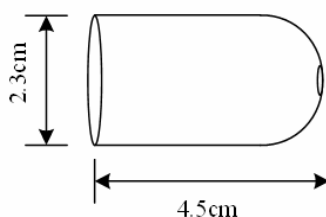
3.3.1 การออกแบบสปาร์กแกป

สปาร์กแกปจะประกอบไปด้วยขั้วอิเล็กโทรดคือ อิเล็กโทรดแรงสูง อิเล็กโทรดดิน และ อิเล็กโทรดจุดชนวน ซึ่งอิเล็กโทรดจุดชนวนจะใช้หัวเทียนในการจุดชนวน โดยที่อิเล็กโทรดจุดชนวนจะถูกนำไปใส่ไว้ตรงกลางขั้วอิเล็กโทรดแรงสูง ซึ่งขั้วอิเล็กโทรดจะมีลักษณะเป็นทรงกลม ก็เพื่อให้ได้ผลการทดลองเป็นไปตามทฤษฎีซึ่งได้กล่าวไว้ในข้างต้นแล้ว และรูปลักษณะของ สปาร์กแกปได้ดังแสดงในภาพที่ 3-21



ภาพที่ 3-21 ปลายอิเล็กโทรดด้านที่มีตัวจุดชนวน

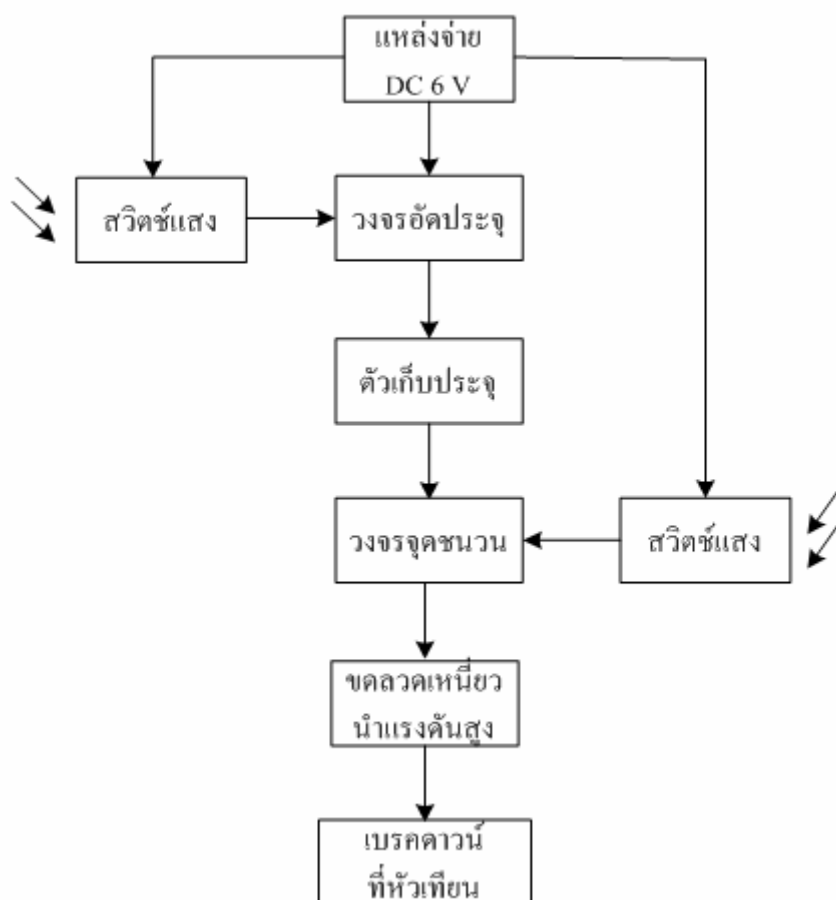
ในการออกแบบสปาร์กเกปได้คำนึงถึงขนาดที่เหมาะสมสำหรับบรรจุไว้ในกล่อง ที่มีพื้นที่จำกัด จึงได้ออกแบบให้อิเล็กโตรดทั้ง 2 ด้านมีลักษณะหัวทรงกลมครึ่งซีกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.3 cm ยาว 4.5 cm ทั้งสองด้าน อิเล็กโตรดด้านหนึ่งจะเจาะรูไว้สำหรับตัวจุดชนวน (Trigger) ซึ่งใช้หัวเทียนจุดระเบิดในห้องเผาไหม้ของรถยนต์และรถจักรยานยนต์ ดังภาพที่ 3-21 แล้วนำอิเล็กโตรดทั้งสองบรรจุเข้าท่อ PVC ขนาด 3.5 cm และวัสดุที่นำสร้างอิเล็กโตรดคือทองแดง



ภาพที่ 3-22 ขนาดและลักษณะของอิเล็กโตรด

3.3.2 การออกแบบวงจรจุดชนวน

ในการออกแบบวงจรจุดชนวนเพื่อให้สวิทช์แรงดันสูงทำงานนั้นต้องคำนึงถึง ความเร็วในการจุดชนวน หรือเกิดการหน่วงเวลาเนื่องจากการทำงานน้อยที่สุด เพราะต้องการควบคุมการสวิทช์เพื่อสร้างแรงดันอิมพัลส์ให้ไปทับบัชนวนบนแรงดันกระแสสลับ การทดลองหลายวงจรเมื่อนำมาใช้งานมีการหน่วงเวลามากเกินไป และการทำงานไม่แน่นอนทำให้การทับบัชนวนของแรงดัน ไม่มีความแม่นยำ แต่วางจรที่นำมาใช้นี้เป็นวงจรที่มีการหน่วงเวลาน้อย และการทำงานแม่นยำกว่าวงจรอื่นๆ วงจรดังแสดงในภาพที่ 3-23 ในวงจรนี้จะใช้สัญญาณแสงควบคุมการทำงานสองส่วน เป็นตัวสวิทช์ให้วงจรอัดประจุทำงาน เมื่อตัวเก็บประจุอัดประจุเต็มแล้ว สัญญาณแสงอีกส่วนก็จะสวิทช์ให้วงจรจุดชนวนทำงาน เพื่อให้ตัวเก็บประจุทำการคายประจุให้กับขอลวดเหนี่ยวนำแรงดันสูง ทำให้เกิดแรงดันสูงส่งไปที่หัวเทียนและเกิดการเบรกดาวนที่เชิ้วหัวเทียน แรงดันที่เกิดการเบรกดาวนจะขึ้นอยู่กับระยะห่างของเชิ้วหัวเทียน

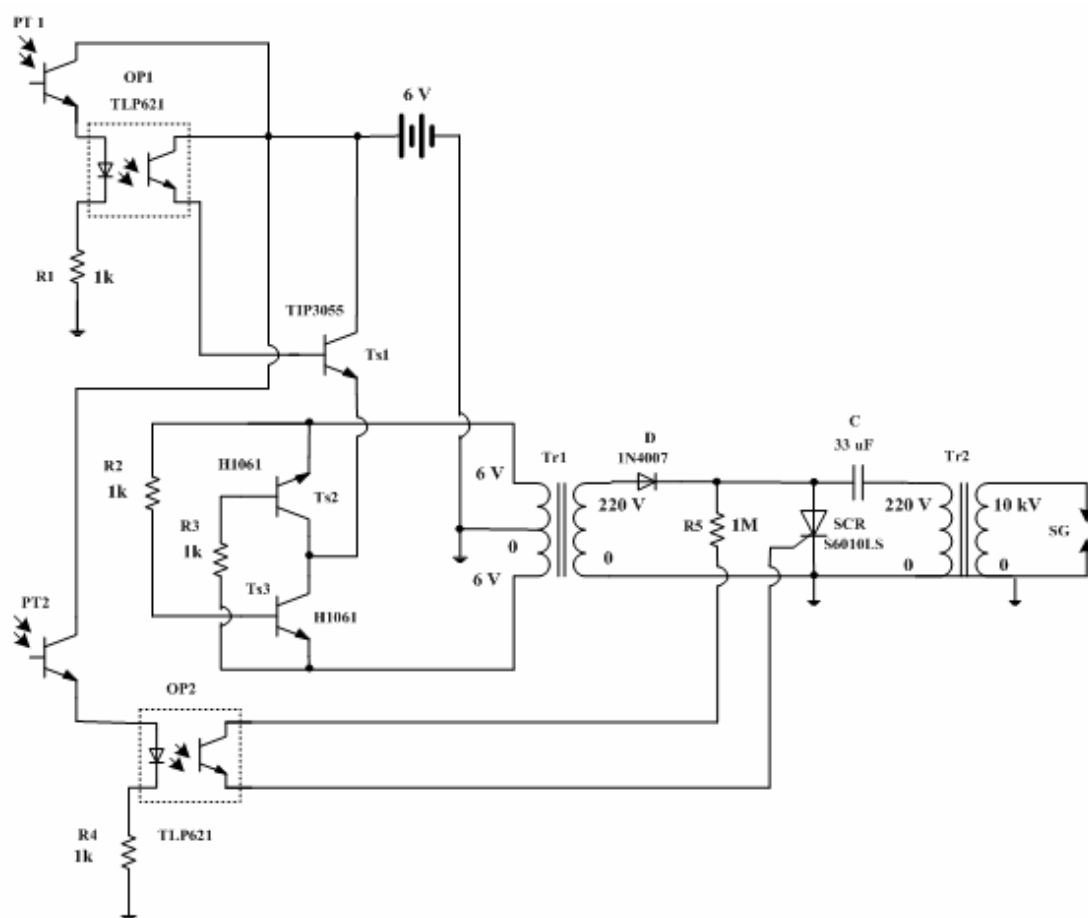


ภาพที่ 3-23 บล็อกไดอะแกรมของวงจรจดชนวน

จากภาพที่ 3-22 สามารถแบ่งวงจรออกได้ 2 วงจรดังนี้

3.3.2.1 วงจรอัดประจุแรงดันให้ตัวเก็บประจุ (C) วงจรนี้จะทำงานได้โดย ทรานซิสเตอร์ แสง (Photo Transistor) PT1 ได้รับแสงทำให้มีกระแสไหลผ่านออปโตทรานซิสเตอร์ (Opto Transistor) OP1 ทำให้นากระแสไปทริกที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ Ts1 นำกระแสไปทำให้ Ts2 และ Ts3 ทั้ง 2 ตัว นำกระแสไหลผ่านขดลวดของหม้อแปลง Tr1 ด้านปฐมภูมิ (Primary) ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันของขดลวดทุติยภูมิ (Secondary) มีแรงดัน 220 V แล้วผ่านไดโอด (Diode) D ทำให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงไปประจุแรงดันให้กับตัวเก็บประจุ C

3.3.2.2 วงจรสร้างแรงดันจุดชนวน เมื่อมีแสงไปกระทบที่ PT2 จะทำให้มีกระแสไปทำให้ OP2 นำกระแสไปทริกให้ SCR นำกระแสทำให้ C คลายประจุผ่าน SCR และขดลวดด้านแรงต่ำ เกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันสูงขึ้นที่ปลายของขดลวดด้านแรงสูงที่ต่อกับหัวเทียนจุดระเบิด จนเกิดการประทุ (Spark Gap) SG ขึ้นที่หัวเทียน

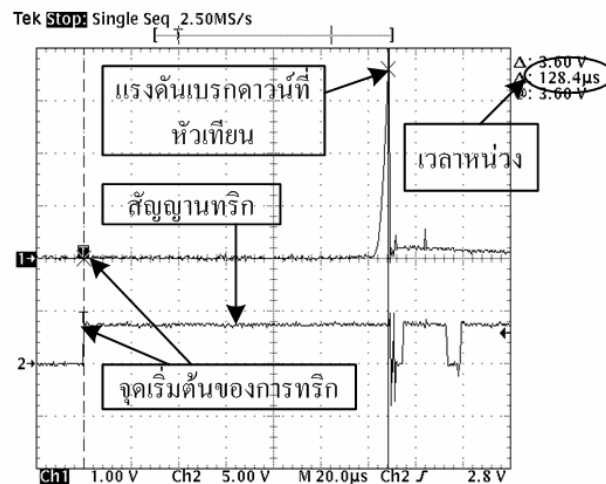


ภาพที่ 3-24 วงจรจุดชนวน

จากการออกแบบตามวงจรดังภาพที่ 3-23 ทำการทดสอบการทำงานของวงจรพบว่าผลของการทดลองดังตารางที่ 3-11 แสดงให้เห็นว่าเวลาที่อัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ ถ้าเวลาตัดประจุมาก ช่วงเวลาของการหน่วงจะน้อย

ตารางที่ 3-11 ผลการทดสอบวงจรจุดชนวน

เวลาในการอัดประจุ (s)	เวลาหน่วงเฉลี่ย (μ s)
5	128
10	81
15	66

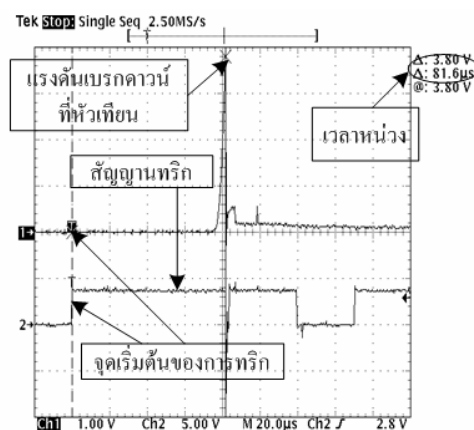


ภาพที่ 3-25 เวลาหน่วงของวงจรจุดชนวนเมื่ออัดประจุ 5 s

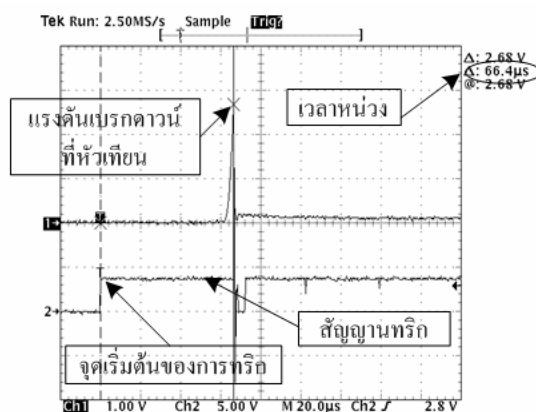
จากภาพที่ 3-25 เมื่อให้สัญญาณทริกวงจรจุดชนวนโดยผ่าน TP2 ทำให้ OP2 นำกระแสไปทริก SCR เมื่อ SCR นำกระแส จะทำให้ C คลายประจุ ที่เก็บไว้ออกมาผ่าน SCR ไปยังหม้อแปลง Tr2 เหนี่ยวนำทำให้เกิด แรงดันด้วยสมการแรงดัน ดังสมการที่ 3-12 การหน่วงเวลาของการเบรกดาวน์นั้นมาจาก อัตราการคลายประจุผ่าน ความต้านทานของขดลวดหม้อแปลง Tr2 ทำให้เกิดการหน่วงเวลา ดังภาพที่ 3-25 ถึงภาพที่ 3-27

เมื่อเกิดการหน่วงเวลาขึ้นในการจุดชนวนสามารถแก้ไขได้ด้วยการชดเชยเวลาในชุดควบคุมมุมเฟสเพื่อให้การทับซ้อนมีความแม่นยำ รายละเอียดการชดเชยเวลาที่หน่วยอธิบายในภาคผนวก ข

$$U = L \frac{di(t)}{dt} \quad (3-12)$$



ภาพที่ 3-26 เวลาหน่วงของวงจรจุดชนวนเมื่ออัดประจุ 10 s



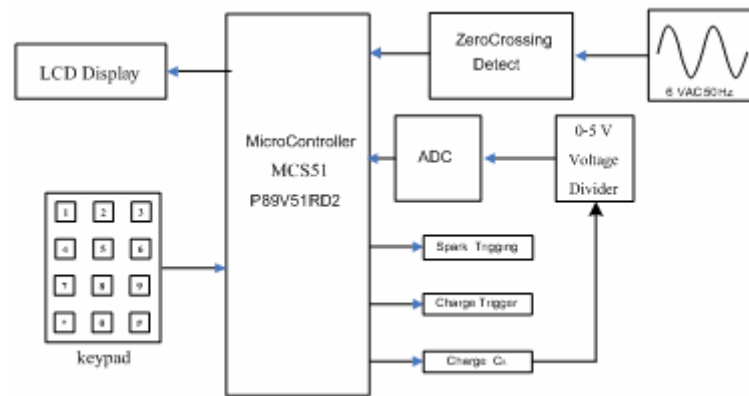
ภาพที่ 3-27 เวลาหน่วยของวงจรจุดชนวนเมื่ออัดประจุ 15 s

3.4 การออกแบบชุดควบคุมมุมเฟส (Phase Control)

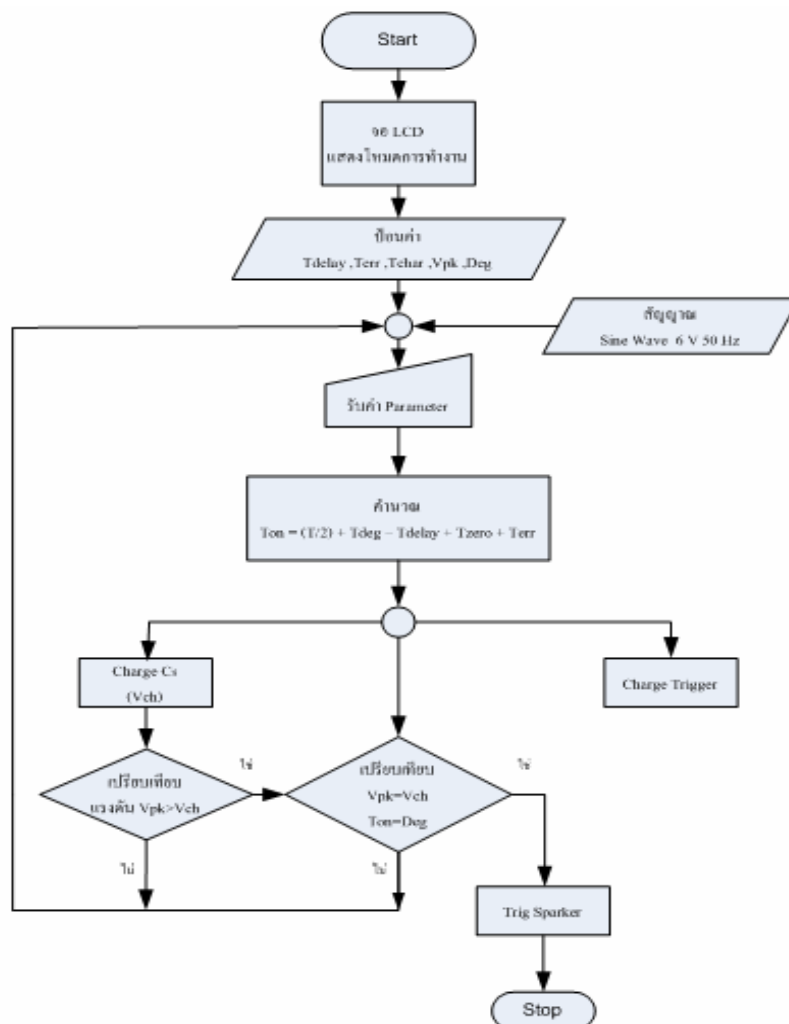
การออกแบบชุดควบคุมมุมเฟสจะใช้ Microcontroller MCS51 บอร์ดรุ่น CP-SPI/S8252 V1.0 และใช้ CPU P89C51RD2 มาควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม และการทับซ้อนของรูปคลื่นผสมบนแรงดันกระแสสลับ ที่มุม 0-360 องศา โดยได้เขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมไว้ดังภาพที่ 3-28 และกำหนดเงื่อนไขการทำงานดังนี้

1. ตรวจสอบสัญญาณ Sine Wave แล้วคำนวณหามุมเฟสโดยผ่านวงจร Zero Crossing Detect
2. ควบคุมการทำงานของวงจรจุดชนวนจะมีการควบคุม 2 ส่วนคือ ควบคุมการอัดประจุในวงจรจุดชนวน (Charge Trigger) และ ควบคุมการจุดชนวน (Spark Triggering)
3. ควบคุมการอัดประจุของตัวเก็บประจุหลัก C_s และตรวจสอบระดับแรงดันที่ตกคร่อม C_s โดยผ่านวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ในอัตราส่วน 2000:1 V แล้วผ่านวงจร แปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converter: ADC)
4. ตั้งค่าการทำงานต่างๆ ด้วย Key Pad ได้แก่ เวลาในการอัดประจุในวงจรจุดชนวน , มุมทับซ้อน แรงดันในที่ต้องการทดสอบ หรือแรงดันอัดประจุให้กับ C_s เพิ่ม-ลดค่าเวลาของการทับซ้อน (Time Error) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข)

เมื่อทำการกำหนดขั้นตอนการทำงานของชุดควบคุมมุมเฟส และเงื่อนไขในการทำงานเสร็จแล้ว ก็ทำการเขียน Flowchart ดังแสดงในภาพที่ 3-29 และเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C ในโปรแกรม Keil μ Vision บน Window แล้วทำการโหลดโปรแกรมลงบน CPU ของ Microcontroller โดยใช้โปรแกรม Fash Magig



ภาพที่ 3-28 บล็อกไดอะแกรมของชุดควบคุมมุมเฟส



ภาพที่ 3-29 Flowchart การทำงานของโปรแกรมควบคุมมุมเฟส

3.5 การสร้างชุดควบคุมมูมเฟส

จากการออกแบบดังที่กล่าวมาแล้ว มีขั้นตอนการสร้างส่วนประกอบของชุดควบคุมมูมเฟส ดังนี้

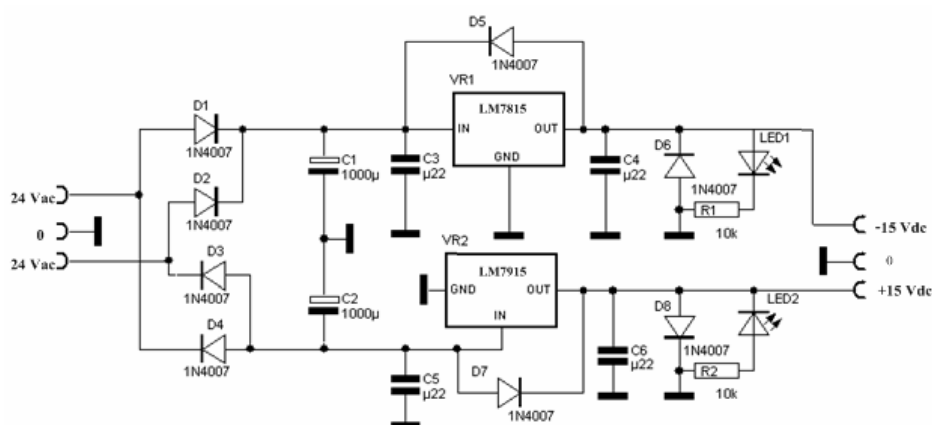
3.5.1 เขียนโปรแกรมด้วยภาษา C (ดังแสดงในภาคผนวก ข) โดยเขียนตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้

3.5.2 นำอุปกรณ์ประกอบลงบนบอร์ด Microcontroller ดังภาพที่ 3-30



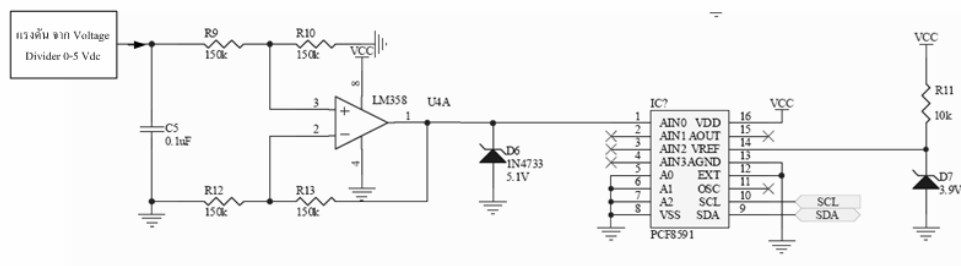
ภาพที่ 3-30 บอร์ด Microcontroller รุ่น CP-SPI/S8252 V1.0

3.5.3 ประกอบวงจร Rectified 15 V_{dc} เพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับ บอร์ด Microcontroller ดังภาพที่ 3-31



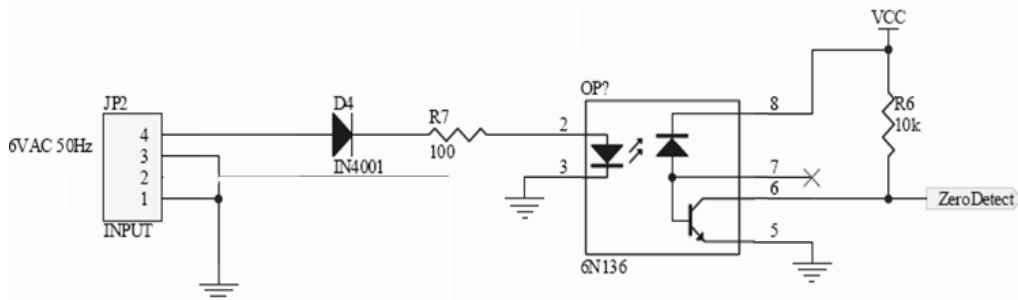
ภาพที่ 3-31 วงจรและอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟฟ้า 15 V_{dc}

3.5.4 ประกอบวงจร ADC โดยใช้ IC PCF8591 แปลงสัญญาณ อนาล็อกเป็นดิจิทัล ดังภาพที่ 3-32



ภาพที่ 3-32 วงจรและอุปกรณ์วงจร ADC

3.5.5 วงจร Zero Crossing วงจรและอุปกรณ์ดังภาพที่ 3-32

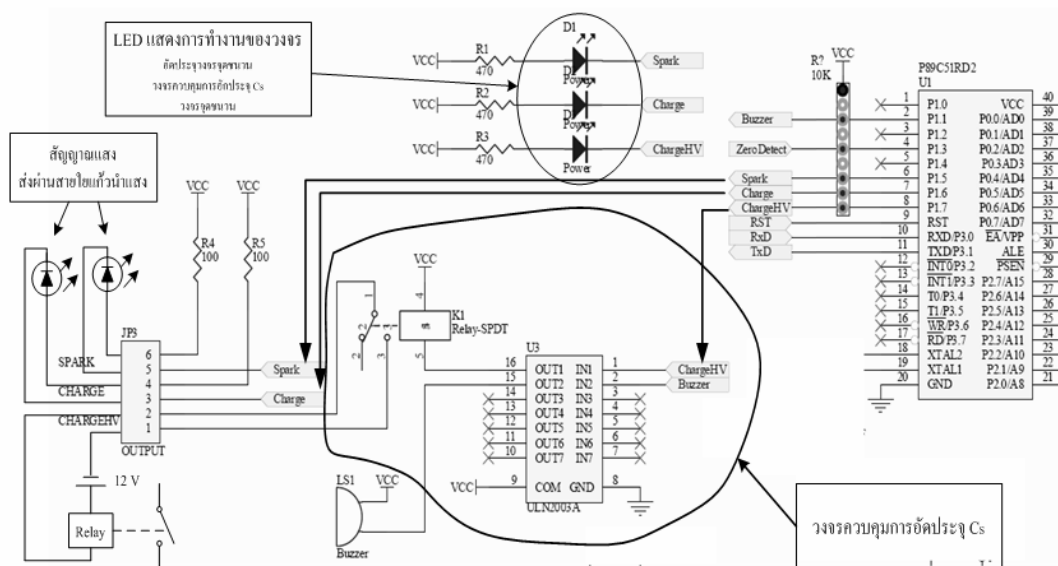


ภาพที่ 3-33 วงจรและอุปกรณ์วงจร Zero Crossing

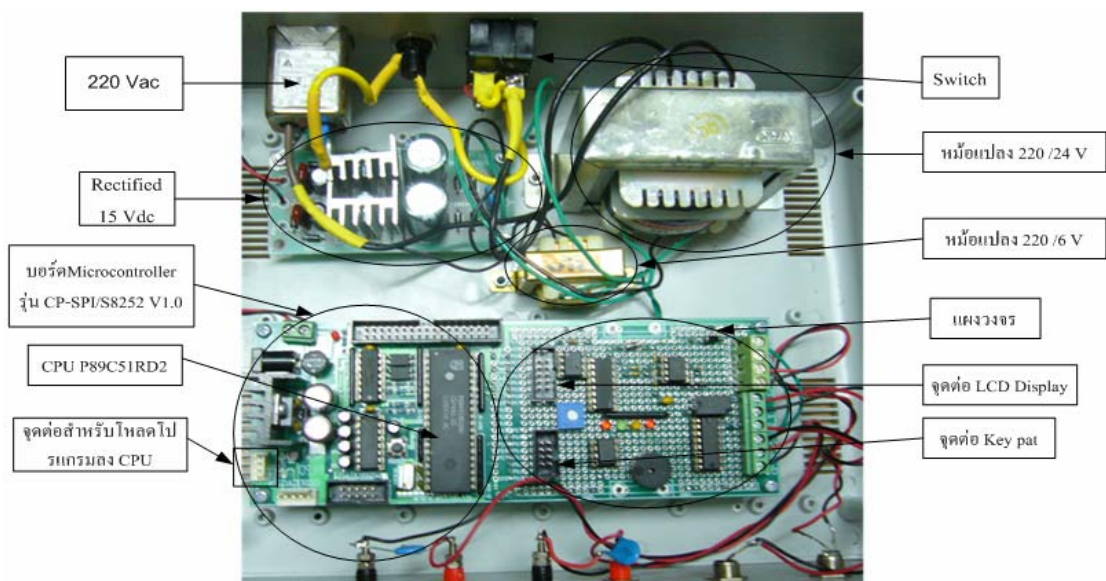
3.5.6 ชุดควบคุมการอัดประจุ C_s ดังภาพที่ 3-34

3.5.7 ชุดจุดชนวนดังภาพที่ 3-34

3.5.8 วงจรอัดประจุชุดจุดชนวนดังภาพที่ 3-34

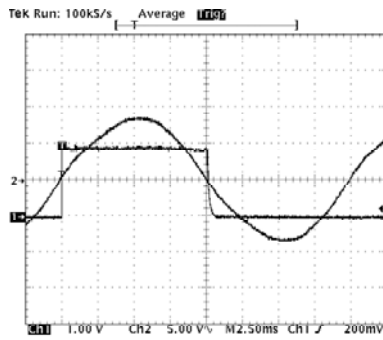


ภาพที่ 3-34 วงจรและอุปกรณ์ของวงจรควบคุมการอัดประจุ C_s ชุดจุดชนวน และวงจรอัดประจุชุดจุดชนวน

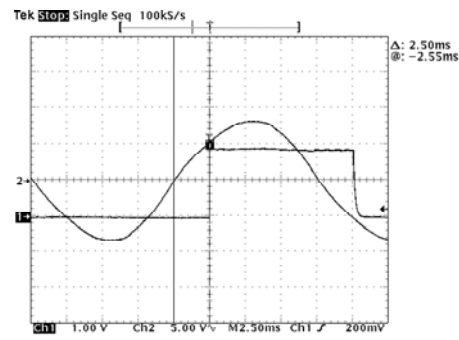


ภาพที่ 3-35 ชุดควบคุมมุมเฟส

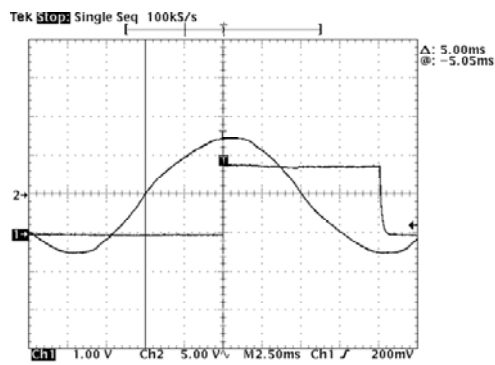
เมื่อประกอบอุปกรณ์ของชุดควบคุมมุมเฟสเรียบร้อยแล้วดังภาพที่ 3-35 ทำการทดสอบการทำงานของวงจรโดยใช้ ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) วัดสัญญาณ Sine Wave กับสัญญาณจุดชนวน เมื่อนำสัญญาณทั้งสองมาเทียบกันดังที่มุมต่างๆ ดังภาพที่ 3-36



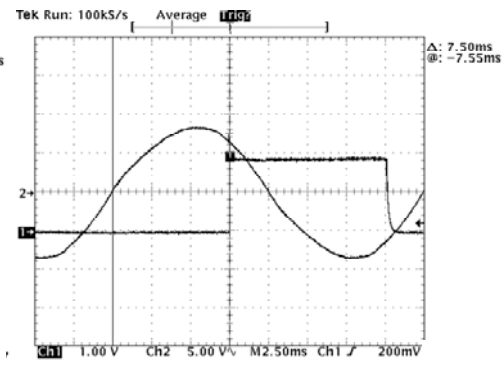
(ก)



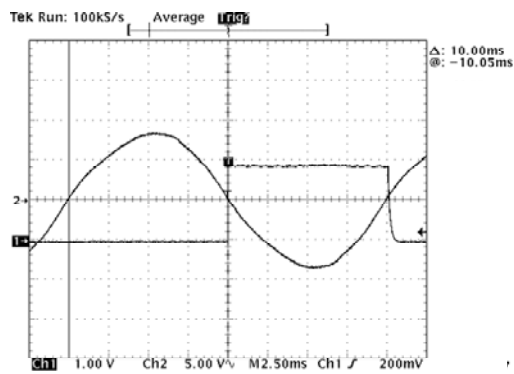
(ข)



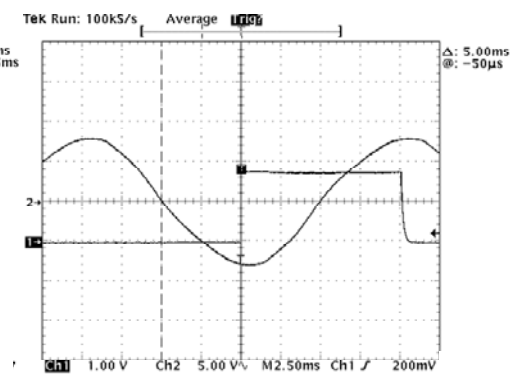
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

ภาพที่ 3-36 เปรียบเทียบสัญญาณจุดชนวน กับสัญญาณ Sine Wave ที่มุม

(ก) มุม 0° (ข) มุม 45° (ค) มุม 90° (ง) มุม 135°

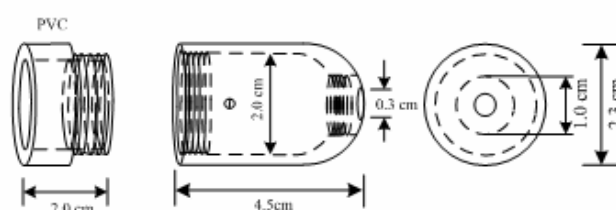
(จ) มุม 180° และ (ฉ) มุม 270°

จากการทดสอบพบว่าสัญญาณจุดชนวนตรงตามมุมที่กำหนด จึงพร้อมที่จะนำไปทำงานร่วมกับวงจรจุดชนวนและควบคุมการทับซ้อนของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม แต่ถ้านำไปประกอบร่วมกับวงจรอื่น ๆ แล้วมุมที่ทับซ้อนซ้ำ หรือเร็วกว่ามุมที่กำหนด ก็สามารถที่จะปรับตั้งค่าเวลาเพิ่มหรือลดเวลาให้มุมทับซ้อนตรงตามที่ต้องการ ส่วนการตั้งค่าแรงดันนั้นก็สามารถปรับเพิ่ม-ลดแรงดันของรูปคลื่นผสมได้ (ดูรายละเอียดการปรับค่าในภาคผนวก ข)

3.6 การสร้างสวิตช์แรงสูง

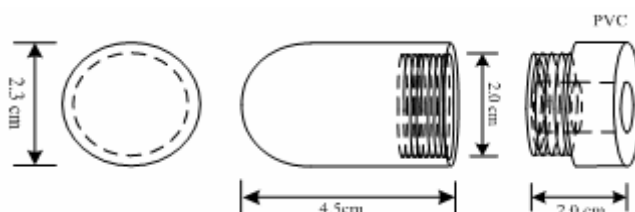
จากการออกแบบวงจรจุดชนวน และข้ออิเล็กทรอนิกส์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วสามารถอธิบายการสร้างส่วนประกอบของสวิตช์แรงสูงดังนี้

3.6.1 การสร้างข้ออิเล็กทรอนิกส์ หรือ Spark Gap ได้ใช้วัสดุที่ทำ คือ แท่งทองแดงทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.3 cm ยาว 4.5 cm ทำการกลึงให้โค้งมนด้านหนึ่ง เจาะรูตรงกลางขนาด 2 cm เพื่อใส่หัวเทียนจุดระเบิดไว้ในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ และเจาะรูที่ปลายขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 3 mm เพื่อให้หัวของหัวเทียนโผล่ออกมาได้ รายละเอียดดังภาพที่ 3-37



ภาพที่ 3-37 ลักษณะของข้ออิเล็กทรอนิกส์ด้านที่มีหัวเทียนอยู่ข้างใน

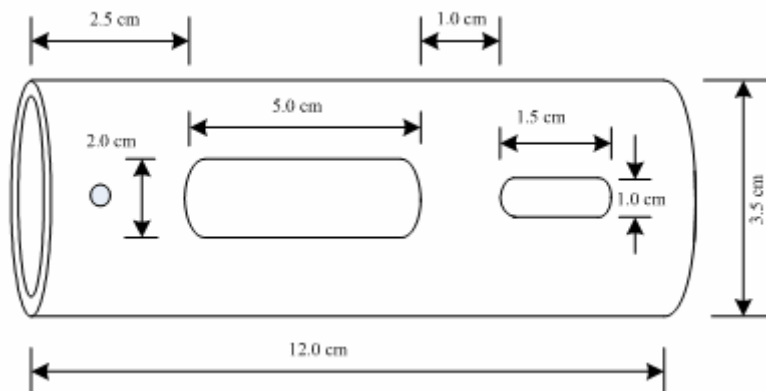
ส่วนด้านท้ายทำเป็นเกลียวในแล้วนำแท่ง PVC มาทำเกลียวนอก อีกข้างก็เจาะรูขนาด 2 cm แล้วทำเกลียวใน ดังภาพที่ 3-38 นำท่อ PVC ที่มีขนาดความยาว 12 cm มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 3.5 cm และเจาะช่องด้านข้างเพื่อดูการ Spark และระยะห่างของอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 2 ดังแสดงในภาพที่ 3-40



ภาพที่ 3-38 ลักษณะของข้ออิเล็กทรอนิกส์ด้านที่ไม่มีหัวเทียนอยู่ข้างใน



ภาพที่ 3-39 ขั้วอิเล็กโทรดด้านที่มีหัวเทียน



ภาพที่ 3-40 ขนาดและโครงสร้างสวิทช์แรงสูง ทำจาก ท่อ PVC



ภาพที่ 3-41 ส่วนประกอบของ สวิทช์แรงดันสูง

เมื่อนำอิเล็กโทรดที่สร้างขึ้นไปทดสอบด้วยแรงดัน 1 - 6 kV ระยะห่างตั้งแต่ 0.5 – 3.0 mm โดยทำการทดสอบที่ระยะห่างหนึ่งค่า ทดสอบกับค่าแรงดันแต่ละค่าจำนวน 10 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของแรงดันที่ระยะห่างของอิเล็กโทรดแต่ละค่า ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 3-11

ตารางที่ 3-12 การทดสอบการเบรกคาวนของอิเล็กทรอนิกส์

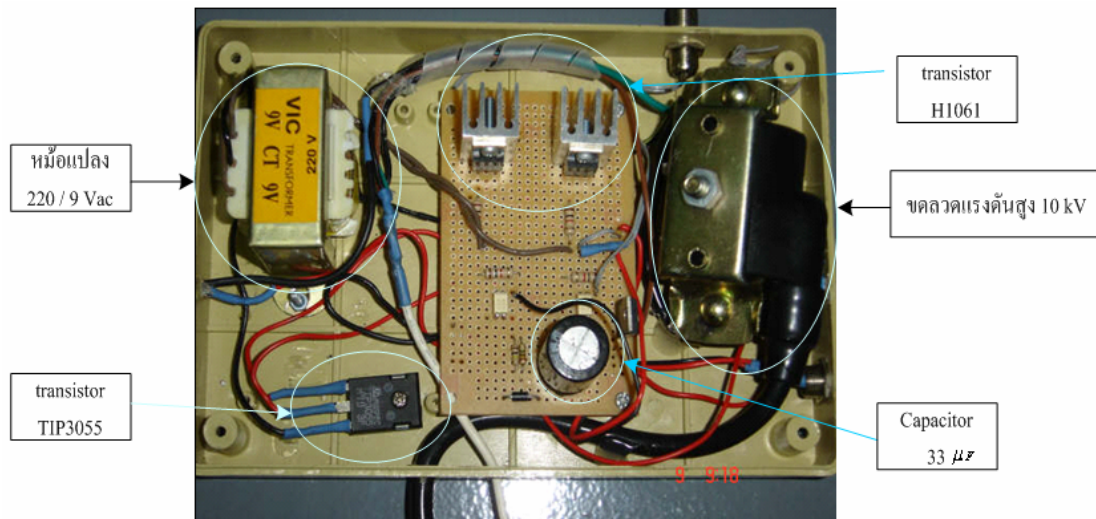
ระยะห่าง (cm)	จำนวนครั้งที่เบรกคาวน					
	1.0kV	2.0kV	3.0 kV	4.0 kV	5.0 kV	6.0 kV
0.5	8	9	10	10	10	10
1.0	6	8	9	10	10	10
1.5	0	0	5	6	10	10
2.0	0	0	0	0	6	9
2.5	0	0	0	0	0	0
3.0	0	0	0	0	0	0

จากตารางในการนำสวิทช์แรงดันสูงที่สร้างขึ้นไปใช้ควรตั้งระยะห่างให้เหมาะสมตามแรงดันที่จะทำการทดสอบเพื่อให้เกิดการ Spark ด้วยการจุดชนวน ไม่เกิดจากการเบรกคาวนเองของสวิทช์ที่ตั้งระยะไม่เหมาะสมเช่นที่แรงดัน 6 kV ควรตั้งให้ระยะห่าง มากกว่า 2 mm และไม่ควรเกิน 3 mm เพราะถ้าตั้งมากกว่า 3 mm. เมื่อทำการจุดชนวน (trig) จะไม่เกิดการเบรกคาวน

3.6.2 การสร้างวงจรจุดชนวน จากการออกแบบที่กล่าวมาแล้ว ได้วงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรแล้ว มีรายการดังนี้

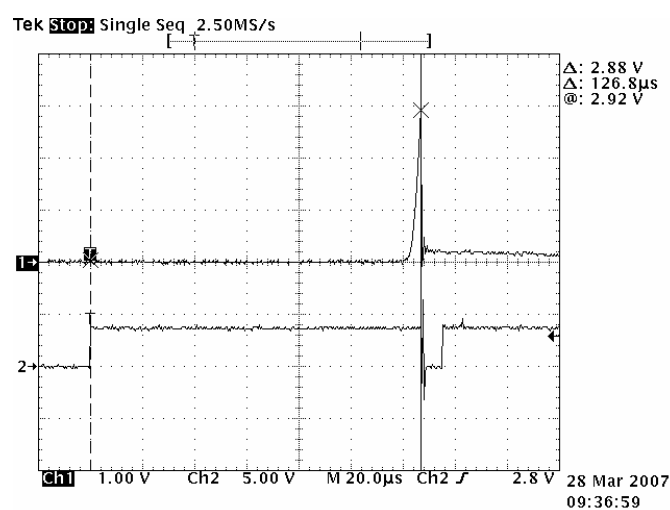
1. หม้อแปลง 220 V/6 V แบบขั้วกลาง	1	ตัว
2. ขดลวดเหนี่ยวนำ 1:100 V	1	ตัว
3. Photo Transistor	1	ตัว
4. แบตเตอรี่ 6V	1	ตัว
5. ความต้านทาน 1 k Ω	3	ตัว
6. Opto Transistor TLP 621	2	ตัว
7. Transistor H1061	2	ตัว
8. Transistor TIP3055	1	ตัว
9. Diode 1N4001	1	ตัว
10. Capacitor 33 μ F 450 V	1	ตัว
11. SCR S6010LS	1	ตัว

ในการสร้างวงจรจุดชนวนเริ่มจากการออกแบบแผงวงจร โดยใช้แผงวงจรสำเร็จรูป นำอุปกรณ์ต่างๆ ลงต่อในแผงวงจรตามวงจรตามภาพที่ 3-24 จะได้วงจรที่สำเร็จดังภาพที่ 3-41



ภาพที่ 3-42 วงจรจุดชนวนสวิตช์แรงสูง

เมื่อนำวงจรจุดชนวนไปทดสอบโดยการตั้งเวลาในการอัดประจุให้ $C\ 33\ \mu F$ เป็นเวลา $5\ s$ มีการหน่วงเวลา $126\ \mu s$ ดังภาพที่ 3-42 และถ้าตั้งเวลาในการอัดประจุให้มากขึ้นเวลาในการจุดชนวนจะลดลง ดังแสดงในตารางที่ ก-1



ภาพที่ 3-43 ผลการทดสอบวงจรจุดชนวนเมื่ออัดประจุ $C\ 33\ \mu F$ เป็นเวลา $5\ s$

3.7 การสร้างวงจรสร้างรูปคลื่น

จากการออกแบบในข้อที่ 3.1.3 ทั้งการคำนวณจากทฤษฎี และการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้ได้ทราบค่าองค์ประกอบของวงจรโดยได้ค่าดังตารางที่ 3-12 องค์ประกอบที่ได้จากการนั้นจะต้องทำการสร้างขึ้นเอง ได้แก่ ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ซึ่งมีวิธีการดังนี้

3.7.1 การสร้างตัวต้านทานปรับรูปคลื่น R_c และ R_d

เนื่องจากกระแสที่เกิดจากการคายประจุของ C_s นั้นมีขนาดสูงถึง 3 kA ขณะตัวลัดวงจรจึงทำให้เกิดความร้อนมาก ดังนั้นการสร้างตัวต้านทานปรับรูปคลื่นในที่ทนต่อกระแสเป็นหลัก จึงใช้ลวด NiCr ขนาด 800 W. ในการสร้าง R_c และขนาด 800 W. ขนาดกัน 3 เส้นในการสร้าง R_d เพื่อลดผลของกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานซึ่งในการพันลวด NiCr เพื่อลดค่า ความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นด้วยการพันแบบไปกลับโดยให้ความยาวและจำนวนรอบของลวดเท่ากัน เมื่อนำมาวัดค่า ยังมีค่าความเหนี่ยวนำอยู่บ้าง แต่ค่าน้อยมาก จึงนำไปต่อในวงจร

3.7.2 การสร้างตัวเหนี่ยวนำ L

เนื่องจากค่าของตัวเหนี่ยวนำที่ต้องการมีค่าไม่สูงนัก คือ เท่ากับ 12.3 μH จึงใช้เป็นแบบแกนอากาศ โดยใช้การพันขดลวดขนาด 1.5 มม² บนท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว แล้วพันทับให้แน่นด้วยแถบฉนวนขาวเพื่อป้องกันการเลื่อนตัวของขดลวด ซึ่งสูตรของการพันตัวเหนี่ยวนำโดยประมาณสามารถหาได้จากสมการที่ 3-11[9]

$$n = \sqrt{\frac{L(9a + 10b)}{a^2}} \quad (3-11)$$

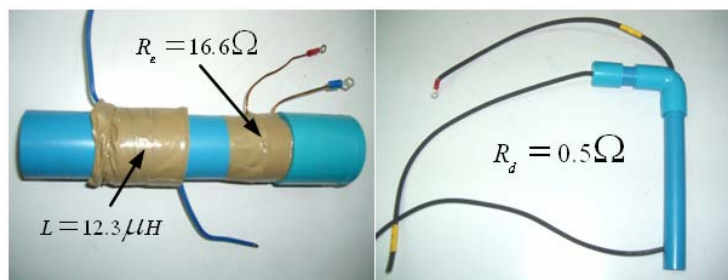
โดยที่	n	=	จำนวนรอบของขดลวด
	L	=	ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ (μH)
	a	=	รัศมีของแกน (นิ้ว)
	b	=	ความยาวของการพันขดลวด (นิ้ว)

อย่างไรก็ตามสูตรที่ให้ไว้จะมีค่าใกล้เคียงกับของจริงมาก เมื่อความยาวของการพันขดลวด (b) มีค่าน้อยกว่า 0.8a เมื่อ $a = 1.5/2 = 0.75$ และ ให้ความยาวของการพันขดลวด $b = 4$ นิ้ว ส่วนค่าความเหนี่ยวนำ L ที่ต้องการ คือ 12.3 μH ซึ่งมาจากการคำนวณ ทำการคำนวณหาจำนวนรอบของการพันขดลวดดังนี้

$$n = \sqrt{\frac{12.3(9 \times 0.75 + 10 \times 4)}{0.75^2}}$$

$$\approx 15 \text{ รอบ}$$

ค่าที่ได้นี้เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณ ดังนั้น ในการพันขดลวดจริง จะมีการวัดค่าด้วย เครื่องวัดความเหนี่ยวนำอีกครั้งเพื่อปรับขดลวดให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำ เท่ากับ 12.3 μH



ภาพที่ 3-44 $L = 12.3 \mu\text{H}$, $R_e = 16.6 \Omega$ และ $R_d = 0.5 \Omega$ ที่สร้างขึ้น

3.7.2 การสร้างตัวเก็บประจุ C_s และ C_b

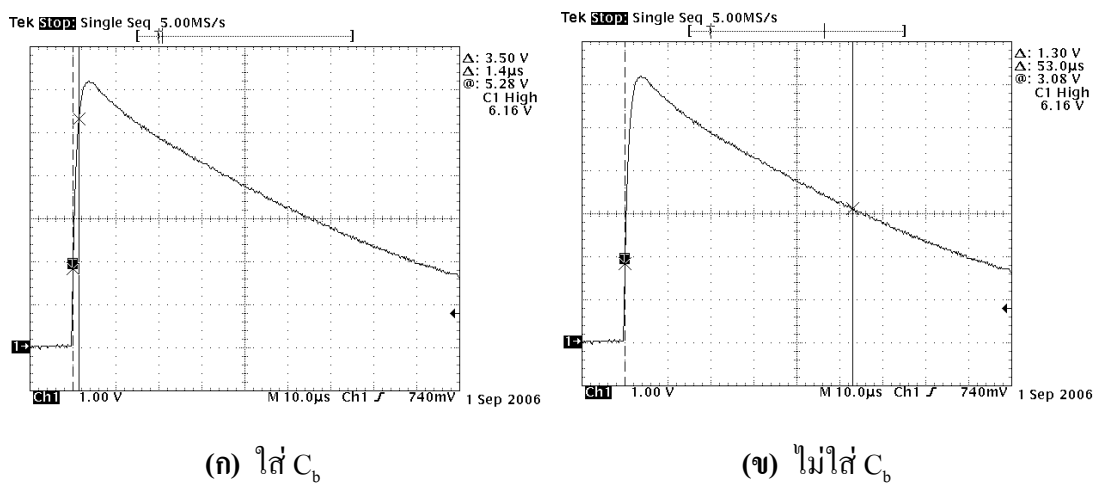
ตัวเก็บประจุ C_s ต้องมีค่ามากและทนแรงดันได้สูงกว่า 6 kV เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ให้กับวงจรสร้างรูปคลื่น เนื่องจากเป็นชิ้นส่วนหนึ่งที่หายากและราคาแพง จากการออกแบบจึง กำหนดค่าของ $C_s = 4 \mu\text{F}$ เนื่องจากมีตัวเก็บประจุเดิมอยู่แล้ว โดยมี ค่าความจุตัวละ 8 μF 4000 V อยู่ 2 ตัว พอดี เมื่อนำมาต่ออนุกรมกันเพื่อให้สามารถทนแรงดันสูงสุดที่ 8000 V และทำให้ค่า ความจุ หรือ ค่าคาปาซิแตนซ์ (Capacitance) เท่ากับ 4 μF (ดังภาพที่ 3-45)

ในการสร้างตัวเก็บประจุ C_b ที่มีค่า 10 nF เป็นค่าที่ได้จากการออกซึ่งน้อยมากสามารถสร้าง ได้โดยอาศัยการอนุกรม และขนานกันของตัวเก็บประจุขนาดเล็กที่มีพิกัดแรงดันไม่ก็ร้อยโวลต์ด้วย ค่าที่เหมาะสมจนได้ค่าตามที่ต้องการ แต่เนื่องจากค่าที่น้อยมากจนสันนิษฐานได้ว่าอาจจะไม่ต้องต่อ ค่า C_b นี้เลยก็ได้ เนื่องจากค่าตัวเก็บประจุที่แฝงในวงจร) Stray Capacitance (ทำให้เกิดการทดลอง ด้วยการต่อ C_b ขึ้นมาเป็นค่าๆ หนึ่งที่สามารถสร้างได้ง่ายก่อน และทดลองหาแรงดันผลลัพธ์ดู เปรียบเทียบกับเมื่อปลดออก) ตัวเก็บประจุ C_b นี้ไม่มีผลกับรูปคลื่นกระแสลัดวงจรเพราะตัวมันจะ ถูกลัดวงจรไป (เพื่อดูแนวโน้มว่าสามารถตัดอุปกรณ์ตัวนี้ออกไปได้จริงหรือไม่ ซึ่งค่าที่สร้างขึ้นมา เท่ากับ 150 nF โดยสร้างมาจากตัวเก็บประจุ 1 μF 450 V อนุกรมกันจำนวน 15 ตัว ทำให้สามารถ ทนแรงดันได้ประมาณ 6750 V โดยมีค่าความจุ 150 nF และทดลองที่แรงดันต่ำที่ไม่เกินพิกัดของตัว

เก็บประจุที่สร้างขึ้นเพื่อผลที่ได้ซึ่งผลที่ได้แทบจะไม่แตกต่างกันระหว่างค่า $C_b = 150 \text{ nF}$ กับไม่มีการต่อ C_b เลย ดังภาพที่ 3-45 จึงได้ทำการปลดตัวเก็บประจุในส่วนนี้ออกไป



ภาพที่ 3-45 $C_s = 4 \text{ } \mu\text{F}$ ที่สร้างขึ้น



ภาพที่ 3-46 รูปคลื่นแรงดันขณะใส่ C_b และไม่ใส่ C_b

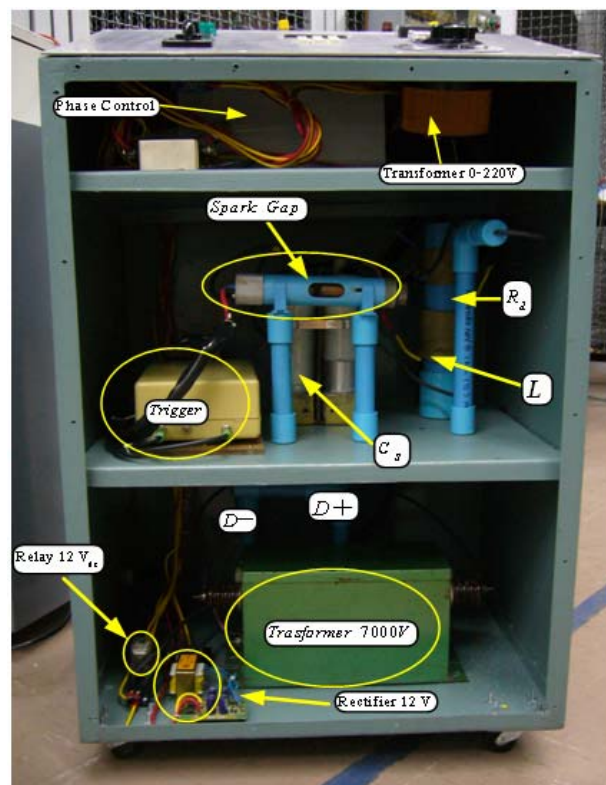
จากการออกแบบ และการสร้างองค์ประกอบของวงจรสร้างรูปคลื่นที่ทำให้ได้รูปคลื่นตรงตามมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 3-13

ตารางที่ 3-13 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 1.2/50 μ s - 8/20 μ s

อุปกรณ์	ค่าจากการออกแบบ	ค่าที่ใช้งานจริง
C_s	4 μ F	4 μ F
C_b	9 nF	ไม่ใช่
L	12.5 μ H	12.5 μ H
R_c	19 Ω	16.6 Ω
R_d	0.65 Ω	0.5 Ω

3.8 การสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

จากการที่ได้ทำการสร้างส่วนประกอบต่างๆ เสร็จแล้วก็นำมาต่อร่วมกันและทำการทดสอบเพื่อหาจุดบกพร่องและทำการแก้ไขจนได้ค่าตามที่กำหนด จึงนำเข้ามาประกอบในตัวเครื่อง ดังภาพที่ 3-47 ที่แสดงถึงส่วนประกอบต่างๆของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 6 kV 1.2/50 μ s, 3 kA 8/20 μ s วงจรการควบคุมของเครื่อง และหลักการทำงานของเครื่องอธิบายในภาคผนวก ข



ภาพที่ 3-47 ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

บทที่ 4

การทดสอบ

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบรูปคลื่นผสมมาตรฐาน รูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μs รูปคลื่นกระแส 8/20 μs การทดสอบการทับซ้อนของรูปคลื่นผสมบนแรงดันกระแสลบความถี่ 50 Hz ที่มุม 0 - 360 องศา ทั้งรูปคลื่นบวก (+) และลบ (-) และทำการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอกขณะที่ต่อในระบบไฟฟ้า และไม่ต่อในระบบไฟฟ้าในการทดสอบใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Digital Oscilloscope) ยี่ห้อ Tektronix TDS 620B 500 MHz และหัววัดแรงสูง (High Voltage Probe) ยี่ห้อ Tektronix P6015A วัดรูปคลื่น ผลการทดสอบระบบการวัดแรงดันอิมพัลส์เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) [5] ซึ่งผลการทดสอบเป็นดังนี้

4.1 การทดสอบรูปคลื่นเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE C62.41.1-1991

4.1.1 การทดสอบรูปคลื่นแรงดันเปิดวงจร 6 kV ลักษณะรูปคลื่น 1.2/50 μs ทั้งบวก (+) และลบ (-) ค่าที่วัดได้ดังแสดงในตารางที่ 4-1 และภาพที่ 4-1 ถึง 4-4 ในการวัดแรงดันและกระแสจะทำการวัดด้วยหัววัดขนาดอัตราแรงดัน 1000:1 V ผลที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

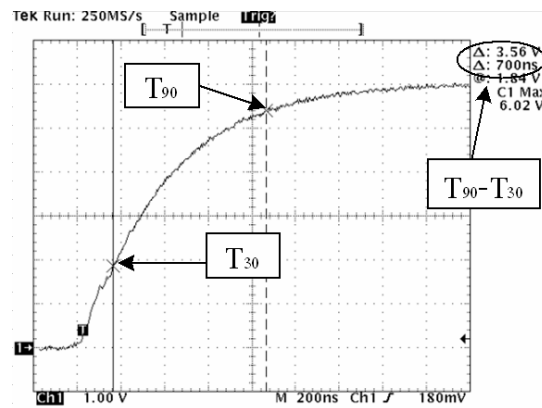
การวัดชั่วเวลาหน้าคลื่นใช้การวัด แบบ $T_1 = 1.67(T_{90} - T_{30})$

การวัดชั่วเวลาหลังคลื่นใช้การวัด แบบ $T_2 = T_{50} - 0_1$

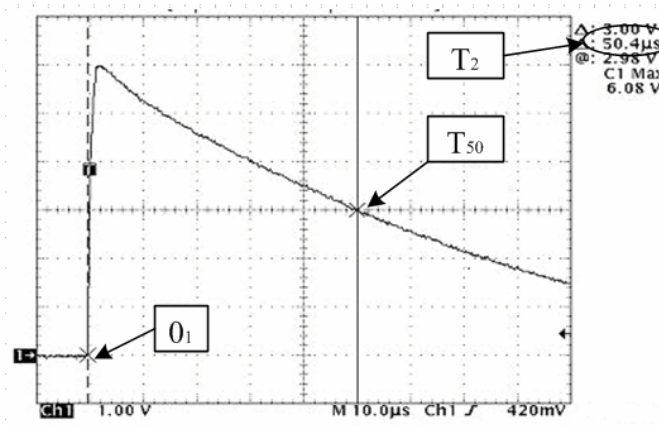
ตารางที่ 4-1 ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบรูปคลื่นแรงดัน 6 kV , 1.2/50 μs ทั้งบวก (+) และลบ (-) จำนวน 10 ครั้ง

ค่าที่ทำการวัด	รูปคลื่นบวก (+)	ค่าผิดพลาด	รูปคลื่นลบ (-)	ค่าผิดพลาด
ค่ายอด (kV)	6.02	0 %	-6.0	0.3 %
หน้าคลื่น (μs)	1.17	-0.03 μs	1.18	-0.02 μs
หลังคลื่น (μs)	50.4	+0.4 μs	49.5	-0.5 μs

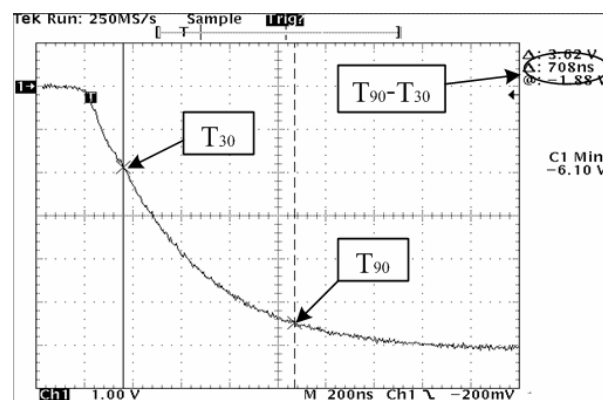
ผลที่ได้จากตารางที่ 4-1 สรุปได้ว่ารูปคลื่นแรงดันทั้งบวกและลบ ที่ได้มีค่าตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน IEEE C62.41-1991 ทุกประการ



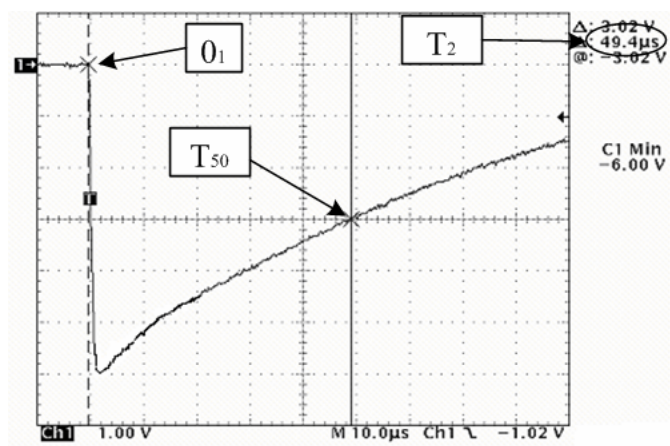
ภาพที่ 4-1 หน้าคลื่นรูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μs รูปคลื่นบวก (+) (1V/div , 200 ns/div)



ภาพที่ 4-2 หลังคลื่นรูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μs รูปคลื่นบวก (+) (1 V/div , 10 μs /div)



ภาพที่ 4-3 หน้าคลื่นรูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μs รูปคลื่นลบ (-) (1V/div , 200 ns/div)



ภาพที่ 4-4 หลังคลื่นรูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μs รูปคลื่นลบ (-) (1V/div, 10 μs /div)

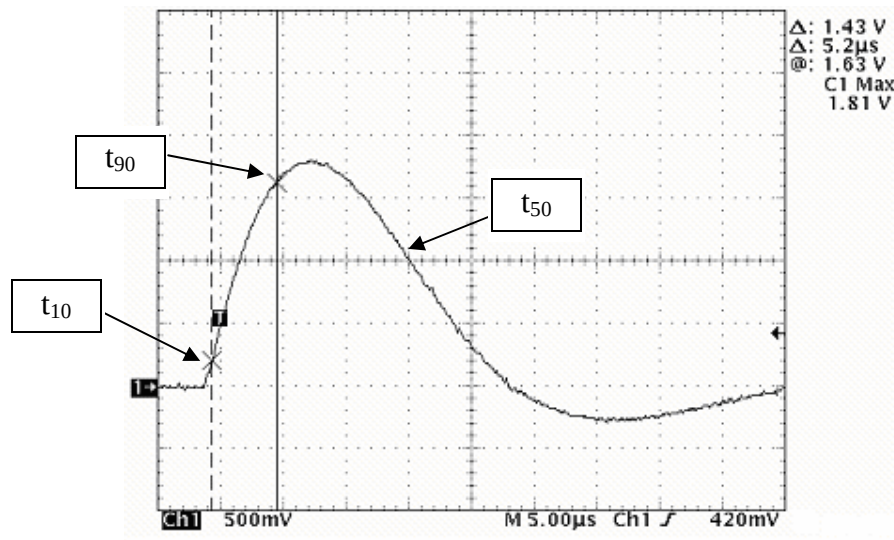
4.1.2 การทดสอบรูปคลื่นผสม ขณะลัดวงจรที่แรงดัน 3 kA ลักษณะรูปคลื่น 8/20 μs ทั้งบวก (+) และลบ(-) ในการวัดรูปคลื่นกระแสขณะลัดวงจรจะต้องวัดผ่านหัววัดแรงดัน 1000:1V วัดแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน 1Ω ที่นำมาลัดวงจร วัดได้จะเป็นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน แล้วนำค่าที่ได้มาคูณด้วย 1.5 ซึ่งเป็นอัตราการลดทอนแรงดัน(รายละเอียดดูที่ภาคผนวก ก) จะได้เป็นค่ากระแสผลการทดสอบดังตารางที่ 4-2 และภาพที่ 4-5 ถึง 4-6 ผลที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

การวัดชั่วเวลาน้ำคลื่นใช้การวัด แบบ $T_1 = 1.25(T_{90} - T_{10})$

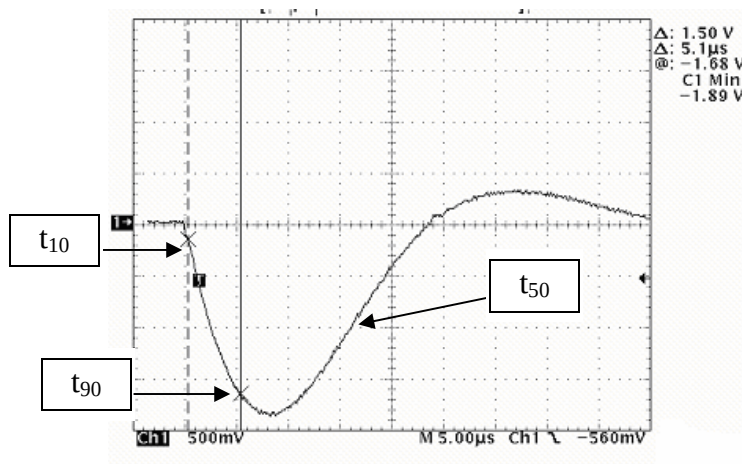
การวัดช่วงเวลาหลังคลื่นใช้การวัด แบบ $T_2 = T_{50} - O_1$

ตารางที่ 4-2 ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบรูปคลื่นกระแส 3 kA , 8/20 μs ทั้งบวก (+) และลบ(-) จำนวน 10 ครั้ง

ค่าที่ทำการวัด	รูปคลื่นบวก (+)	ค่าผิดพลาด	รูปคลื่นลบ (-)	ค่าผิดพลาด
ค่ายอด (kA)	2.72	9.3 %	-2.75	8.3 %
หน้าคลื่น (μs)	6.5	-1.5 μs	6.37	-1.63
หลังคลื่น (μs)	17.0	-3	17.5	-2.5
ค่ายอดตรงข้าม (kA)	-0.26	8.7 %	0.27	9 %



ภาพที่ 4-5 รูปคลื่นกระแส 8/20 μ s รูปคลื่นบวก (+) (500mV/div ,5 μ s/div)



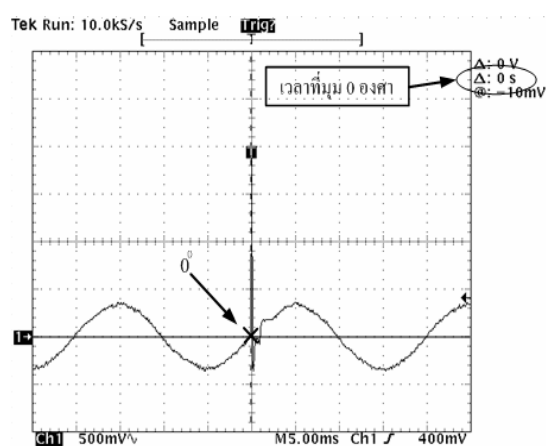
ภาพที่ 4-6 รูปคลื่นแรงดัน 8/20 μ s รูปคลื่นบวก (-) (500mV/div ,5 μ s/div)

ผลของรูปคลื่นกระแสจากตารางที่ 4-2 สรุปได้ว่าลักษณะรูปคลื่นกระแสที่ได้ทั้งบวก และลบ มีค่าตามเกณฑ์มาตรฐาน IEEE C62.41-1991 ทุกประการ

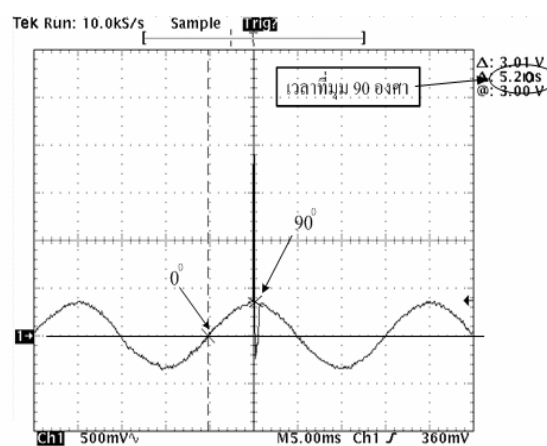
4.2 การทดสอบการทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

การทดสอบรูปคลื่นผสมทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับตามมุมต่างๆ พบว่ามีค่าความผิดพลาดของการทับซ้อนไม่เกิน 3 องศา ทั้งการทดสอบด้วยรูปคลื่นบวก(+) และลบ(-) ดังแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก-1 และผลการทดสอบได้รูปคลื่นดังนี้

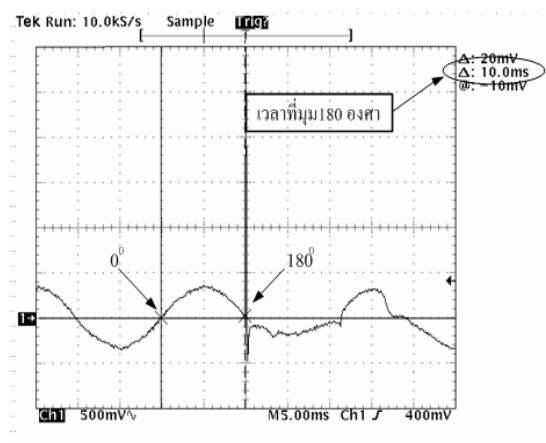
4.2.1 การทดสอบด้วยรูปคลื่นบวก(+) ทำการทดสอบที่มุม 0° , 90° , 180° และ 270° ดังภาพที่ 4-7



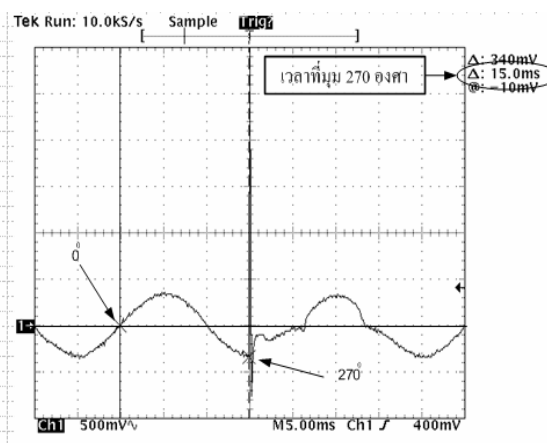
(ก) ที่มุม 0° (0 ms)



(ข) ที่มุม 90° (5 ms)



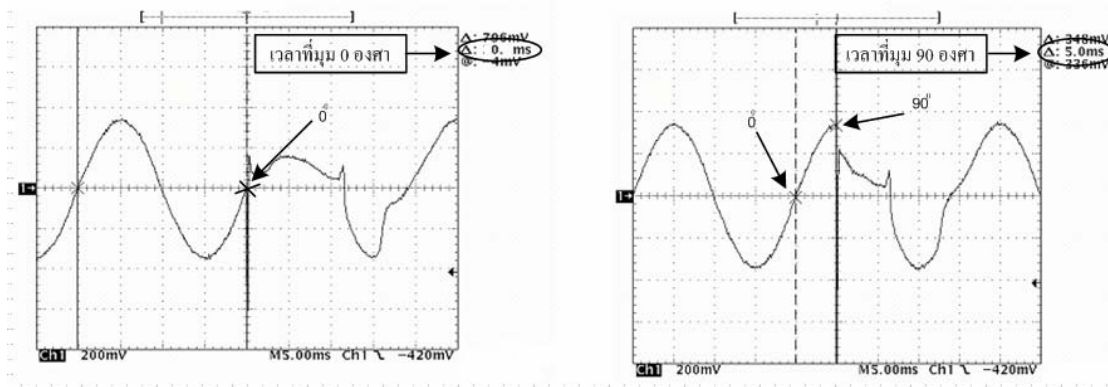
(ค) ที่มุม 180° (10 ms)



(ง) ที่มุม 270° (15 ms)

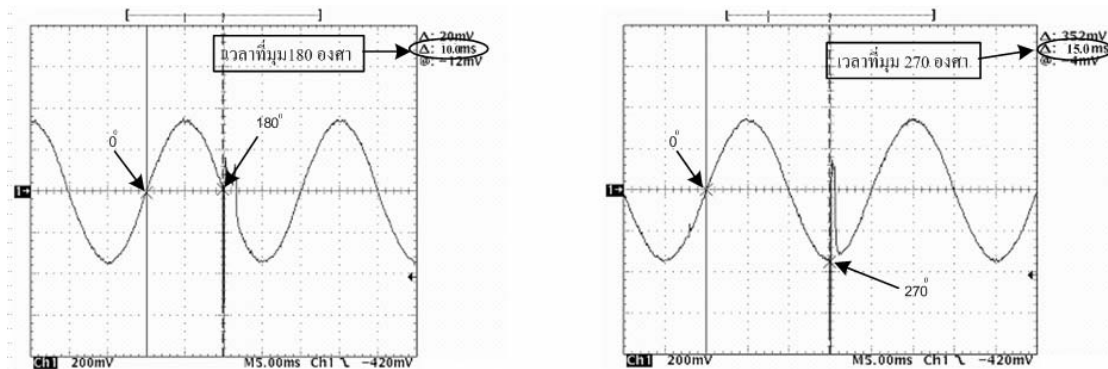
ภาพที่ 4-7 การทับซ้อนของรูปคลื่นผสมบนแรงดันกระแสสลับที่มุม $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ และ 270°
 (500mV/div, 5ms/div ; $1^\circ = 55.56 \mu s$)

4.2.2 การทดสอบด้วยรูปคลื่นลบ (-) ทำการทดสอบที่มุม 0° , 90° , 180° และ 270° ดังภาพที่ 4-7



(ก) ที่มุม 0° (0 ms)

(ข) ที่มุม 90° (5 ms)



(ค) ที่มุม 180° (10 ms)

(ง) ที่มุม 270° (15 ms)

ภาพที่ 4-8 การทับซ้อนของรูปคลื่นผสมบนแรงดันกระแสสลับที่มุม $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ และ 270°
(200 mV/div, 5 ms/div)

4.3 การทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอกขณะต่อในระบบไฟฟ้า

การทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอกด้วยเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมที่สร้างขึ้นทำการทดสอบทั้งรูปคลื่น บวก (+) และลบ (-) โดยให้ทับซ้อนบนค่ายอดของแรงดันกระแสสลับ 220 V

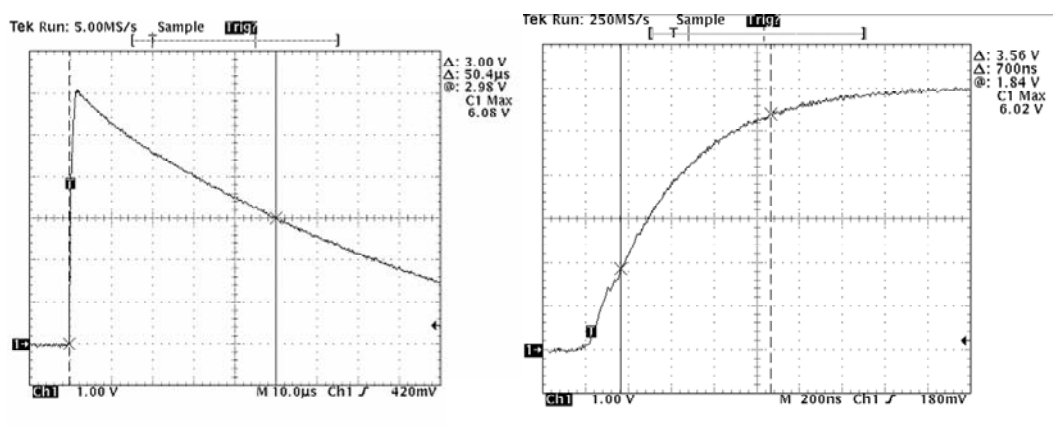
50 Hz ซึ่งจะอ้างอิงตามเอกสารรายงานการทดสอบ Surge Protective Device [10] รูปคลื่น บวก (+) ทับซ้อนที่มุม 90° และรูปคลื่น บวก (-) ทับซ้อนที่มุม 270°

ตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบ MOV เบอร์ S 20 k275

ครั้งที่	Let-Through Voltage (V)	
	ขั้วบวก (+)	ขั้วลบ (-)
1	930	-950
2	930	-930
3	930	-930
4	930	-950
5	930	-930

4.3.1 การทดสอบด้วยรูปคลื่นบวก (+) ทับซ้อนที่มุม 90°

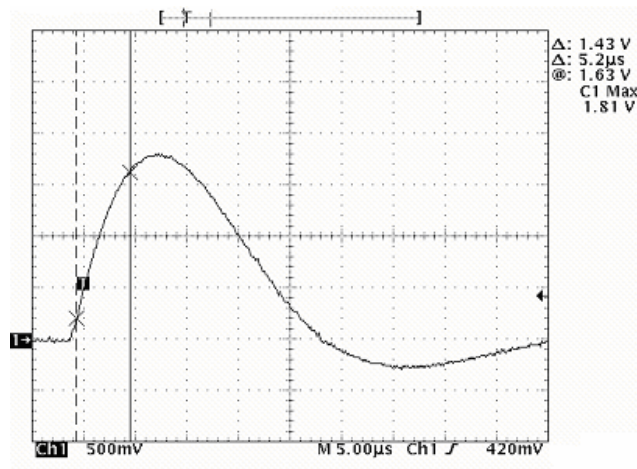
ก่อนทำการทดสอบ MOV เบอร์ S 20 k275 จะต้องทำการปรับเทียบเครื่องกำเนิดรูปคลื่น ผสมให้เป็นมาตรฐาน ดังภาพที่ 4-9 และ 4-10



(ก) หลังคลื่น 50.2 μ s (1V/div , 10 μ s/div)

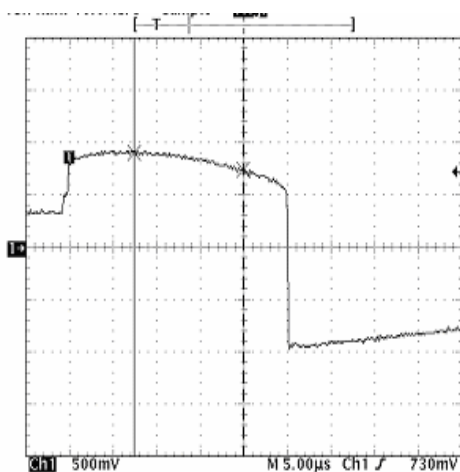
(ข) หน้าคลื่น 1.17 μ s (1V/div , 200 ns/div)

ภาพที่ 4-9 รูปคลื่นแรงดันบวก (+)

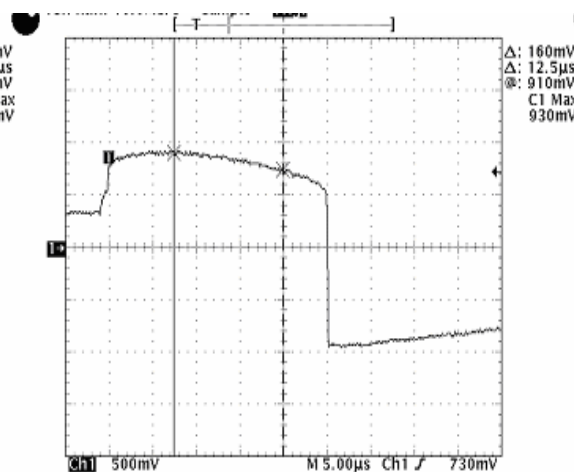


ภาพที่ 4-10 รูปคลื่นกระแส หน้าคลื่น $6.5 \mu s$ และ หลังคลื่น $17 \mu s$ (500 mV/div ,5 μs /div)

เมื่อทำการทดสอบเปรียบเทียบเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมแล้วจึงนำมาทดสอบ MOV เบอร์ S 20 k275 ขณะต่ออยู่กับระบบไฟฟ้า การเชื่อมต่อ(Coupling) เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมกับระบบไฟฟ้าจะเชื่อมต่อด้วยอุปกรณ์ต่อเชื่อม Coupler โดยใช้ช่องว่างอากาศ (Spark Gap) แบบหัวโค้งครึ่งวงกลม 2 ด้าน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 cm ระยะห่าง 1 mm ในการทดสอบจะทำการทดสอบ 5 ครั้ง รูปคลื่นที่ได้หลังการทดสอบ ดังภาพที่ 4-11

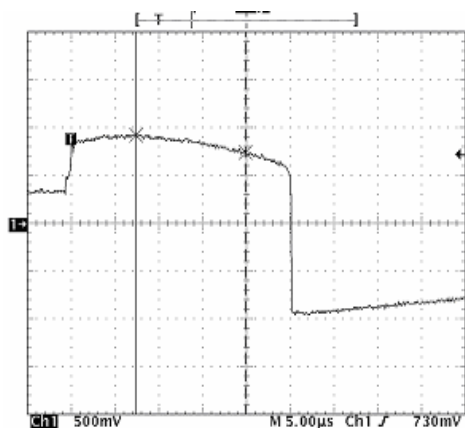


(ก) ครั้งที่ 1

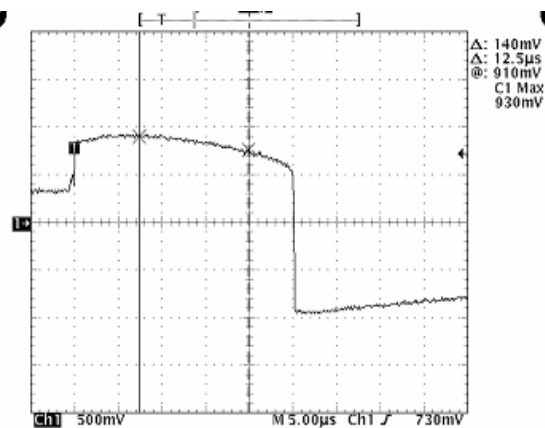


(ข) ครั้งที่ 2

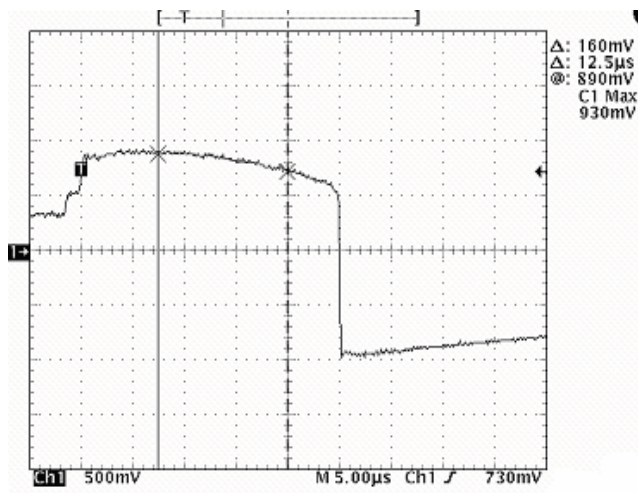
ภาพที่ 4-11 ลักษณะรูปคลื่นเมื่อทดสอบ MOV ด้านบวก(+) จำนวน 5 ครั้ง
(500mV/div ,5 μs /div)



(ค) ครั้งที่ 3



(ง) ครั้งที่ 4

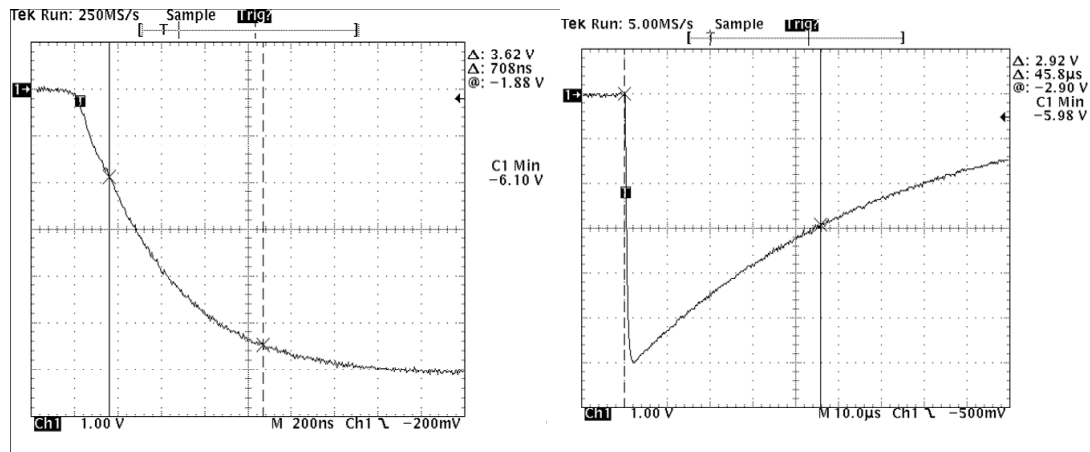


(จ) ครั้งที่ 5

ภาพที่ 4-11 (ต่อ)

4.3.2 การทดสอบด้วยรูปคลื่นลบ (-) ทับซ้อนที่มุม 270°

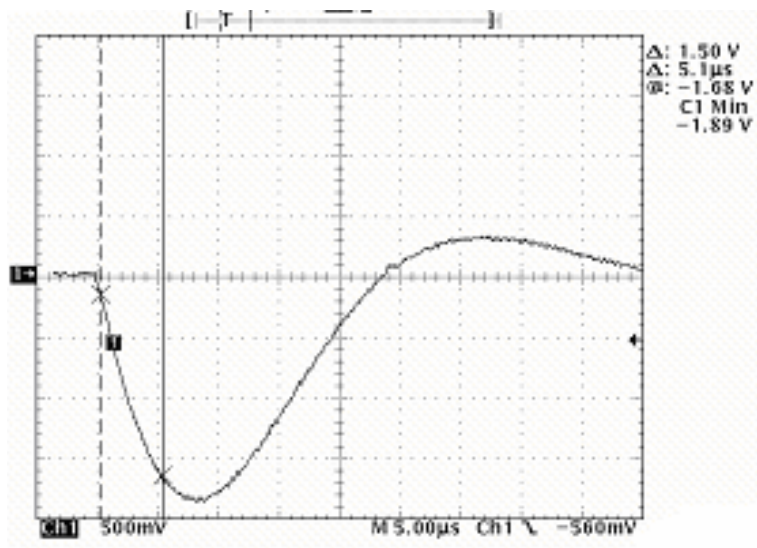
ก่อนทำการทดสอบ MOV เบอร์ S 20 k275 จะต้องทำการทดสอบรูปคลื่นมาตรฐาน $1.2/50 \mu s - 8/20 \mu s$ ดังภาพที่ 4-12 และ 4-13



(ก) หน้าคลื่น 1.17 μs (1V/div, 200 ns/div)

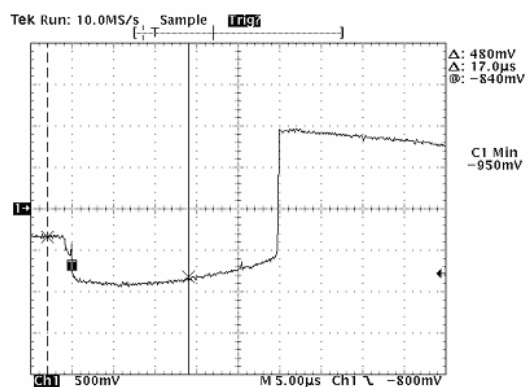
(ข) หลังคลื่น 49.4 μs (1V/div, 10 μs /div)

ภาพที่ 4-12 รูปคลื่นแรงดันลบ (-)

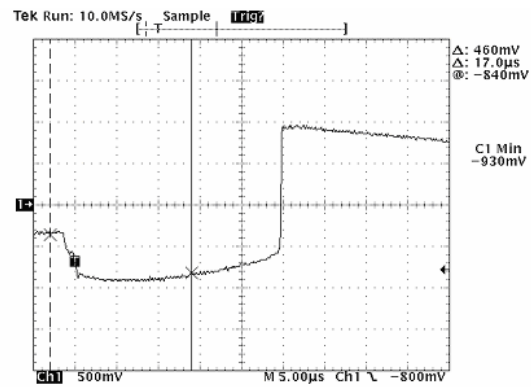


ภาพที่ 4-13 รูปคลื่นกระแส(-) หน้าคลื่น 6.13 μs และหลังคลื่น 17 μs (500mV/div, 5 μs /div)

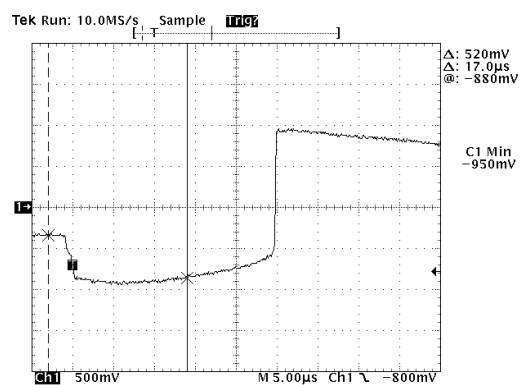
เมื่อทำการทดสอบแล้วจึงนำมาทดสอบ MOV เบอร์ S 20 k275 ขณะต่ออยู่กับระบบไฟฟ้า ในการทดสอบจะทำการทดสอบ 5 ครั้ง รูปคลื่นที่ได้หลังการทดสอบ ดังภาพที่ 4-14



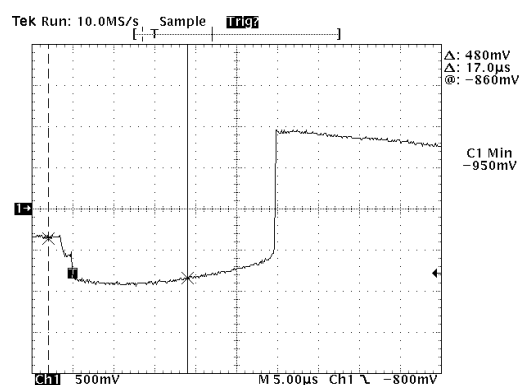
(ก) ครั้งที่ 1



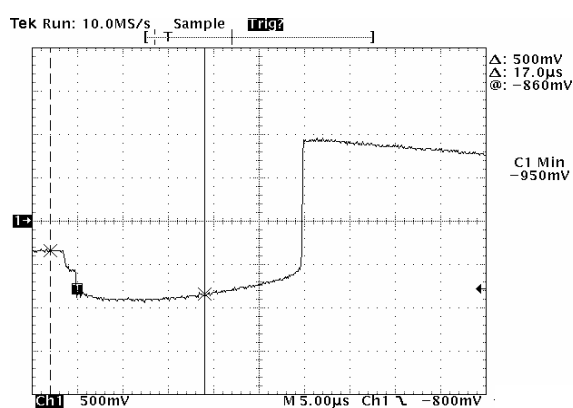
(ข) ครั้งที่ 2



(ค) ครั้งที่ 3



(ง) ครั้งที่ 4



(จ) ครั้งที่ 5

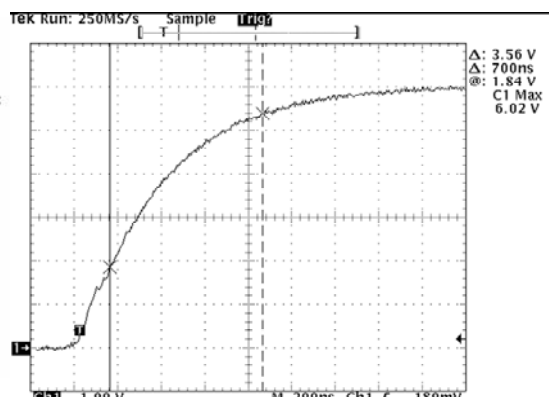
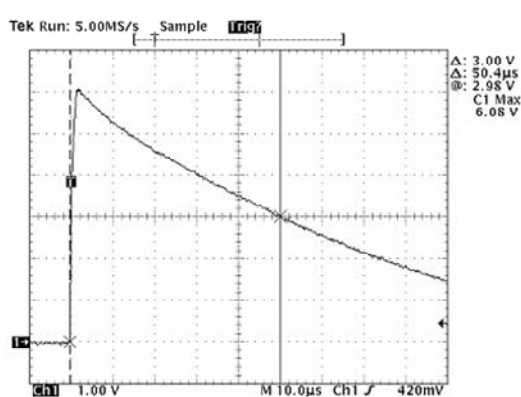
ภาพที่ 4-14 ลักษณะรูปคลื่นเมื่อทดสอบ MOV ด้านลบ(-) จำนวน 5 ครั้ง (500mV/div , 5 μs/div)

4.4 การทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชากโดยตรง

ในการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชากโดยตรงนั้นจะใช้ MOV เบอร์ S 20 k275 โดยจะทำการทดสอบกับรูปคลื่นบวก (+) และลบ (-) ดังต่อไปนี้

4.4.1 ทดสอบด้วยรูปคลื่นบวก (+)

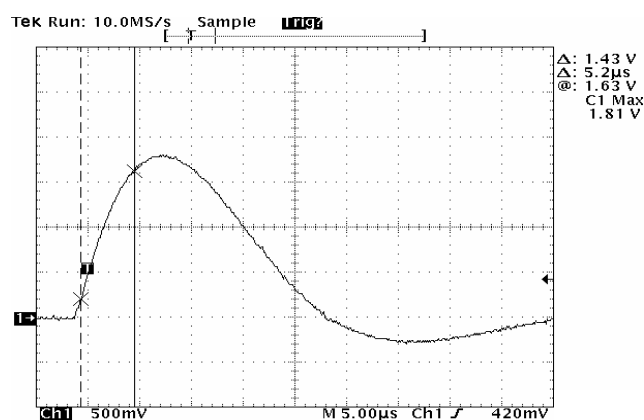
ก่อนทำการทดสอบต้องทำการทดสอบรูปคลื่นแรงดัน $1.2/50 \mu s$ และกระแส $8/20 \mu s$ ดังภาพที่ 4- 15 และ 4-16 แล้วจึงนำไปทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชาก ลักษณะรูปคลื่นที่ได้ดังภาพที่ 4-17



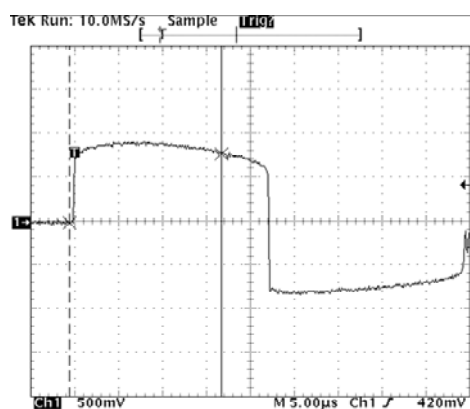
(ก) หลังคลื่น $50.2 \mu s$ (1V/div ,10 μs /div)

(ข) หน้าคลื่น $1.17 \mu s$ (1V/div ,200ns/div)

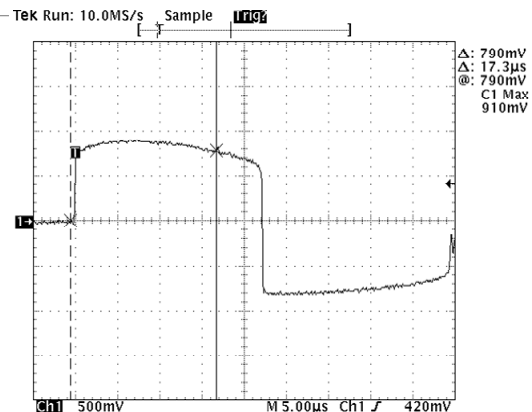
ภาพที่ 4-15 รูปคลื่นแรงดัน(+)



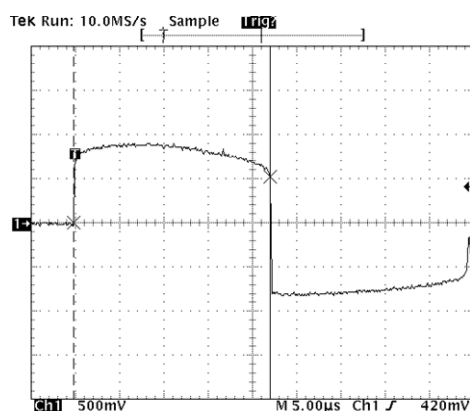
ภาพที่ 4-16 รูปคลื่นกระแส (+) หน้าคลื่น $6.5 \mu s$ หลังคลื่น $17 \mu s$ (500mV/div , 5 μs /div)



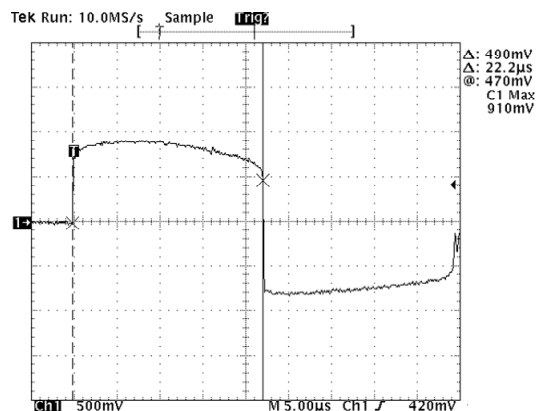
(ก) ครั้งที่ 1



(ข) ครั้งที่ 2



(ค) ครั้งที่ 3



(ง) ครั้งที่ 4

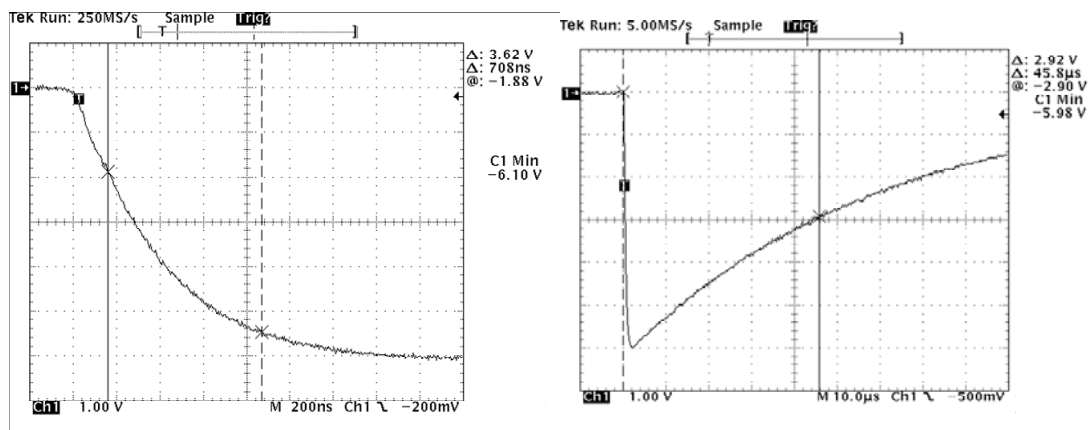
ภาพที่ 4-17 ลักษณะรูปคลื่นเมื่อทำการทดสอบ MOV ด้วยแรงดัน (+) จำนวน 4 ครั้ง
(500mV/div , 5 μs/div)

จากผลการทดสอบ MOV เบอร์ S 20 k275 ด้วยรูปคลื่นผสมแบบด้านบวก(+)แบบไม่ทับซ้อน
หรือการทดสอบโดยตรงนั้น พอจะสรุปได้ว่าแรงดันที่ตกคร่อม MOV เหลืออยู่ที่ระดับแรงดัน 910 V

4.4.2 ทดสอบด้วยรูปคลื่นลบ (-)

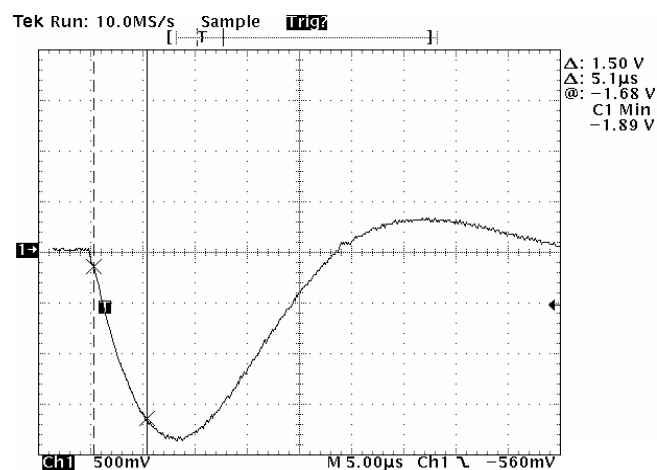
ก่อนทำการทดสอบต้องทำการทดสอบรูปคลื่นแรงดัน $1.2/50\ \mu\text{s}$ และกระแส $8/20\ \mu\text{s}$ ดังภาพที่ 4-18 และ 4-19 แล้วจึงนำไปทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอก ลักษณะรูปคลื่นที่ได้ดังภาพที่ 4-20

จากผลการทดสอบ MOV เบอร์ S 20 k275 ด้วยรูปคลื่นผสมแบบด้านลบ(-) แบบไม่ทับซ้อน หรือการทดสอบโดยตรงนั้น พอจะสรุปได้ว่าแรงดันที่ตกคร่อม MOV เหลืออยู่ที่ระดับแรงดัน 930 V

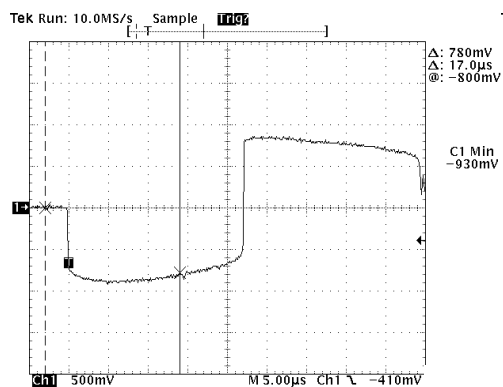


(ก) หน้าคลื่น $1.18\ \mu\text{s}$ (1V/div , 200 ns/div) (ข) หลังคลื่น $49.4\ \mu\text{s}$ (1V/div , 10 μs/div)

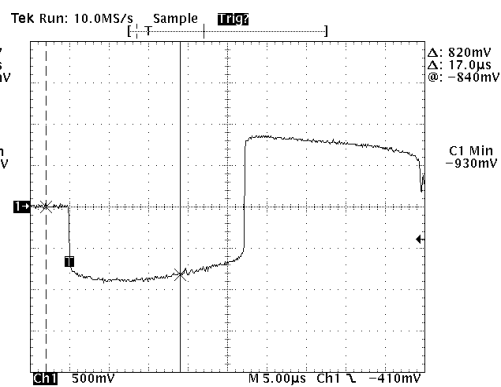
ภาพที่ 4-18 รูปคลื่นแรงดันลบ (-)



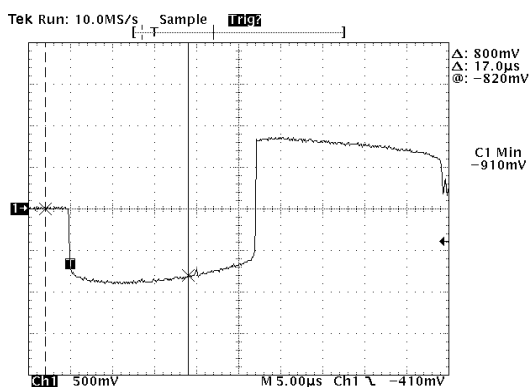
ภาพที่ 4-19 รูปคลื่นกระแส (-) หน้าคลื่น $6.13\ \mu\text{s}$ และหลังคลื่น $17\ \mu\text{s}$ (500mV/div , 5 μs/div)



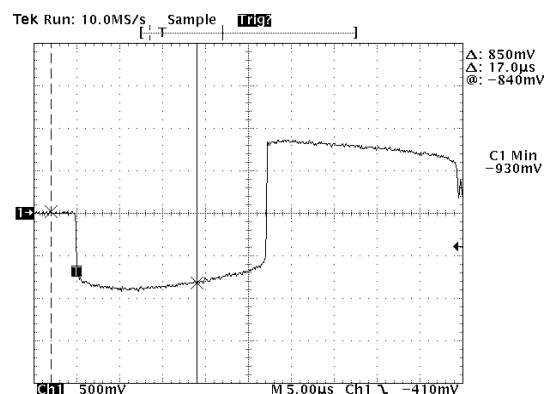
(ก) ครั้งที่ 1



(ข) ครั้งที่ 2



(ค) ครั้งที่ 3



(ง) ครั้งที่ 4

ภาพที่ 4-20 ลักษณะรูปคลื่นเมื่อทำการทดสอบ MOV ด้วยแรงดัน (-) จำนวน 4 ครั้ง

(500mV/div, 5 μs/div)

4.5 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม MIG 0630 IN

ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอก กับเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม (CWG) ยี่ห้อ EMG PARTNER รุ่น MIG 0630 IN. ขนาด 6 kV, 3 kA (ดังภาพที่ 4-21) Superimposed on Peak AC-Line Maximum 16 A, 245 V, L-N, L-G ทำการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอกแบบ MOV เบอร์ S 20 k275



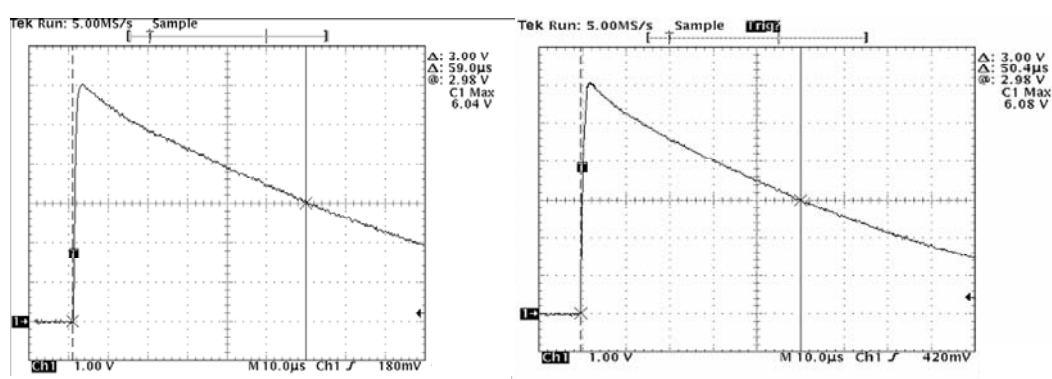
ภาพที่ 4-21 EMG PARTNER Combination Wave Generator MIG 0630 IN

การทดสอบจะทำการทดสอบ อยู่ 3 การทดสอบคือ

1. ทดสอบรูปคลื่นมาตรฐาน รูปคลื่นแรงดัน และกระแส ทั้งรูปคลื่นบวก (+) และลบ (-)
2. การทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอกโดยตรงด้วยรูปคลื่นบวก (+) และลบ (-)
3. การทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอก แบบทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ทั้งรูปคลื่นบวก (+) และลบ (-)

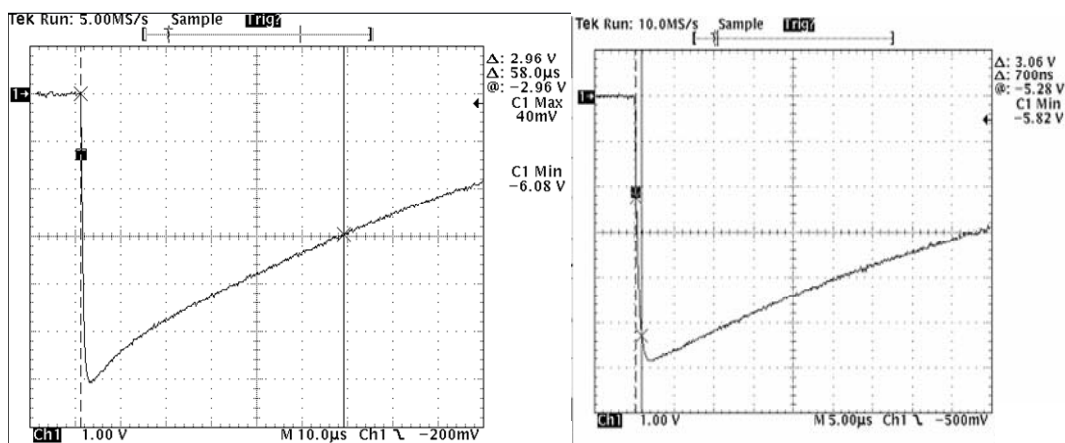
4.5.1 ทดสอบรูปคลื่นมาตรฐาน รูปคลื่นแรงดัน 6 kV 1.2/50 μ s และกระแส 3 kA 8/20 μ s ทั้งรูปคลื่นบวก (+) และลบ (-)

เมื่อทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบรูปคลื่นมาตรฐาน พบว่ามีความแตกต่างกันเล็กน้อยทั้งรูปคลื่นแรงดันและกระแส ดังภาพที่ 4-22



- (ก) รูปคลื่นแรงดัน(+) ของเครื่อง MIG 0630 IN (ข) รูปคลื่นแรงดัน(+) ของเครื่องที่สร้าง
(1V/div , 10 μ s/div) (1V/div , 10 μ s/div)

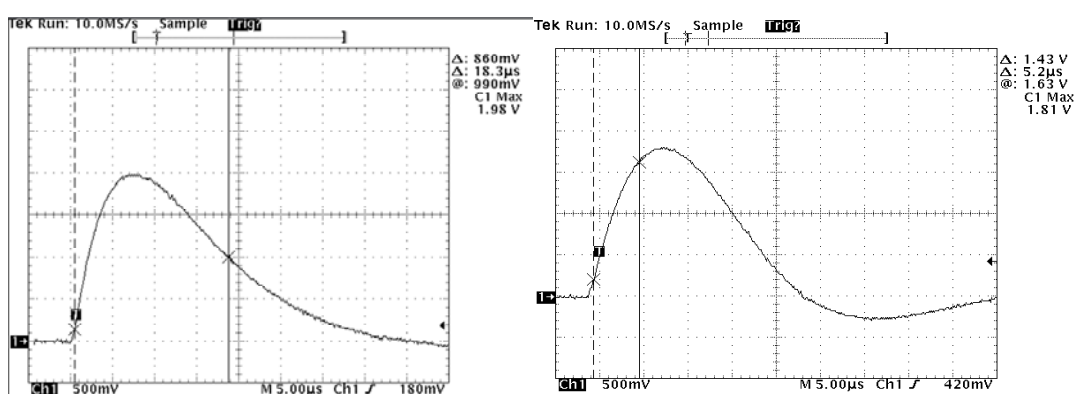
ภาพที่ 4-22 การเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันมาตรฐาน 6 kV 1.2/50 μ s



(ค) รูปคลื่นแรงดัน(-) ของเครื่อง MIG 0630 IN
(1V/div , 10 μs/div)

(ง) รูปคลื่นแรงดัน(-) ของเครื่องที่สร้าง
(1V/div , 5 μs/div)

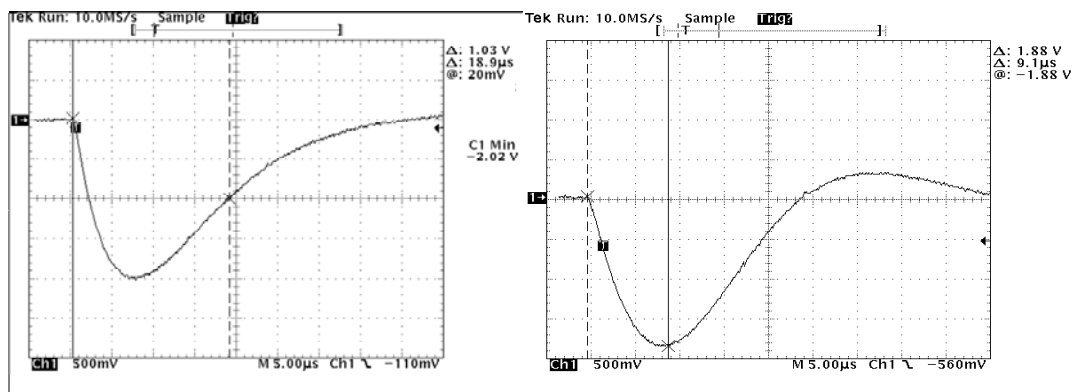
ภาพที่ 4-22 (ต่อ)



(ก) รูปคลื่นกระแส(+) จากเครื่อง MIG 0630 IN
(500mV/div , 5 μs/div)

(ข) รูปคลื่นกระแส(+) จากเครื่องที่สร้าง
(500mV/div , 5 μs/div)

ภาพที่ 4-23 การเปรียบเทียบรูปคลื่นกระแส 8/20 μs



(ก) รูปคลื่นกระแส(-) จากเครื่อง MIG 0630 IN
(500mV/div , 5 μ s/div)

(ข) รูปคลื่นกระแส(-) จากเครื่องที่สร้าง
(500mV/div , 5 μ s/div)

ภาพที่ 4-24 การเปรียบเทียบรูปคลื่นกระแส 8/20 μ s

ตารางที่ 4-4 การเปรียบเทียบรูปคลื่นมาตรฐาน 6 kV 1.2/50 μ s , 3 kA 8/20 μ s ของเครื่อง MIG 0630 IN กับเครื่องที่สร้าง

รายการ		เครื่อง MIG 0630 IN (1)		เครื่องที่สร้าง (2)		เปรียบเทียบ(1)/(2) (%)
		ค่าที่วัด	ค่าผิดพลาด (%)	ค่าที่วัด	ค่าผิดพลาด (%)	
รูปคลื่น แรงดัน (+)	1. U_{pk} (kV)	6.04	+0.67	6.08	+1.3	0.66
	2. T_1 (μ s)	1.22	+1.6	1.41	+17.5	13.4
	3. T_2 (μ s)	59.0	+18	50.4	+0.8	17.06
รูปคลื่น แรงดัน (-)	1. U_{pk} (kV)	-6.10	+1.7	-5.82	-3	4.81
	2. T_1 (μ s)	1.18	-1.7	1.169	-2	0.94
	3. T_2 (μ s)	58.0	+16	49.07	-1.9	18.19
รูปคลื่น กระแส (+)	1. I_{pk} (kA)	2.97	-1	2.71	-9.7	9.59
	2. T_1 (μ s)	5.55	-30.6	6.5	-18.8	14.61
	3. T_2 (μ s)	18.3	-8.5	17.8	-11	2.8
	4. $-I_{pk}$ (kA)	-0.26	-8.67	-0.268	-8.93	2.98

ตารางที่ 4-4 (ต่อ)

รายการ		เครื่อง MIG 0630 IN (1)		เครื่องที่สร้าง (2)		เปรียบเทียบ(1)/(2)
		ค่าที่วัด	ค่าผิดพลาด (%)	ค่าที่วัด	ค่าผิดพลาด (%)	(%)
รูปคลื่น กระแส (-)	1. I_{pk} (kA)	-3.0	0	-2.82	-6.0	6.38
	2. T_1 (μs)	5.52	-31.2	5.8	-27.5	4.83
	3. T_2 (μs)	18.9	-5.5	17.77	-11.2	6.36
	4. $-I_{pk}$ (kA)	0.24	+8	0.243	+8.1	1.23

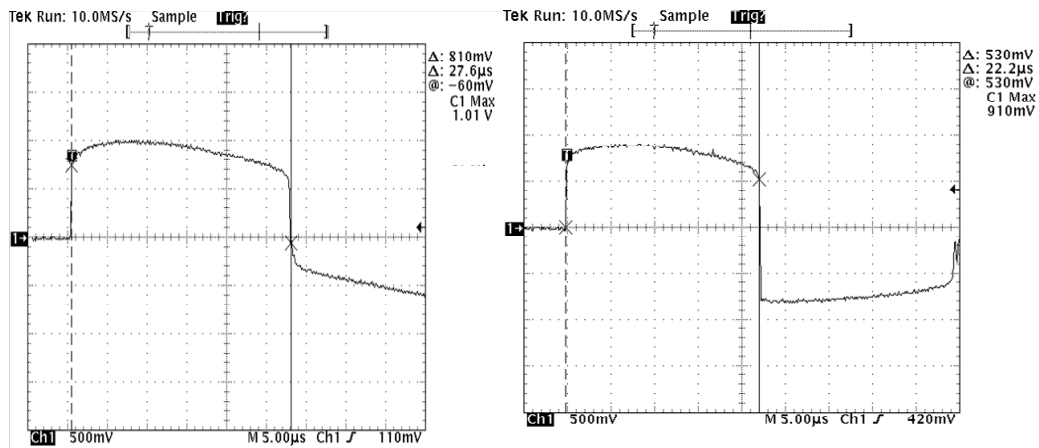
4.5.2 การทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอกโดยตรงด้วยรูปคลื่นผสม 6 kV 1.2/50 μs , 3 kA 8/20 μs ทั้งรูปคลื่นบวก(+) และลบ(-)

การทดสอบนี้จะเปรียบเทียบค่ายอดของรูปคลื่น ช่วงเวลาของรูปคลื่น และลักษณะของรูปคลื่น ค่าที่ได้ดังตารางที่ 4-5 และภาพที่ 4-25 และ 4-26

ตารางที่ 4-5 การเปรียบเทียบค่าแรงดัน และช่วงเวลาของเครื่อง MIG 0630 IN กับ เครื่องที่สร้าง เมื่อทดสอบ MOV เบอร์ S 20 k275 ด้วยรูปคลื่น 1.2/50 μs , 8/20 μs

การทดสอบ		เครื่อง MIG 0630 IN	เครื่องที่สร้าง	ความแตกต่าง
รูปคลื่น(+)	ค่ายอด(V)	1,010	910	100
	ช่วงเวลา (μs)	27.6	22.2	5.4
รูปคลื่น(-)	ค่ายอด(V)	-1,020	-930	90
	ช่วงเวลา (μs)	27.9	22.0	5.1

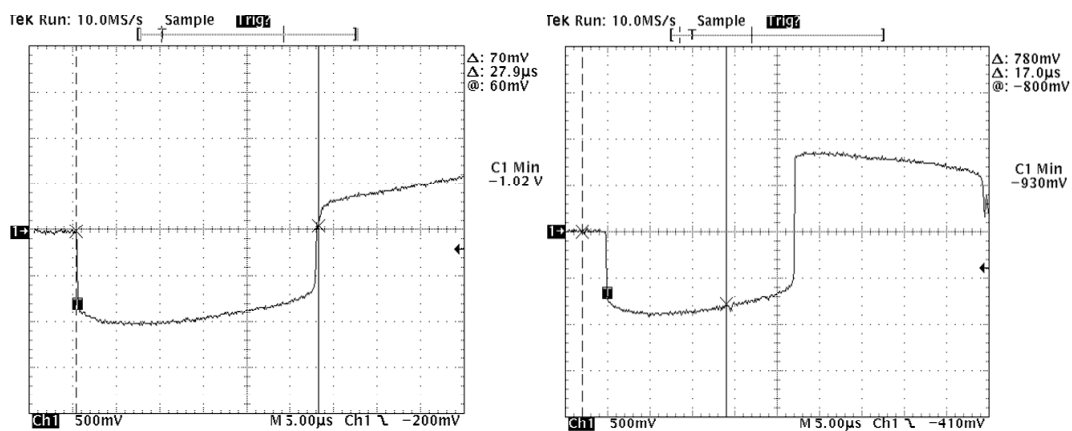
จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าค่ายอดของแรงดันและเวลาที่แตกต่างกันนั้น ค่ายอดแรงดันมีค่าต่างกันทั้งด้านบวกและลบโดยประมาณ 43 V ส่วนช่วงเวลานั้นจะแตกต่างกัน โดยประมาณ 5 μs ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นมีหลายสาเหตุเช่น ความแตกต่างของเครื่องมือวัด การอ่านค่า ฯลฯ ดังจะกล่าวต่อไปในบทที่ 5



(ก) รูปคลื่นจากเครื่อง MIG 0630 IN
(500mV/div , 5 μs/div)

(ข) รูปคลื่น จากเครื่องที่สร้าง
(500mV/div , 5 μs/div)

ภาพที่ 4-25 รูปคลื่นจากการทดสอบ MOV เบอร์ S 20 k275 โดยตรงด้วยรูปคลื่นบวก (+)



(ก) รูปคลื่นจากเครื่อง MIG 0630 IN
(500mV/div , 5 μs/div)

(ข) รูปคลื่น จากเครื่องที่สร้าง
(500mV/div , 5 μs/div)

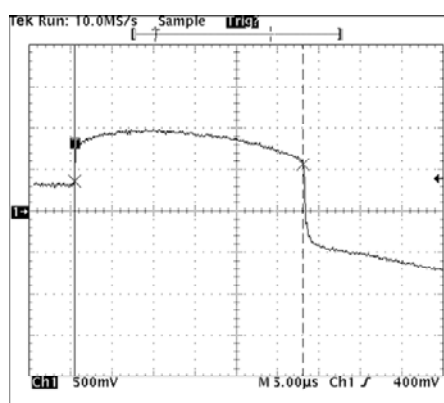
ภาพที่ 4-26 รูปคลื่นจากการทดสอบ MOV เบอร์ S 20 k275 โดยตรงด้วยรูปคลื่นลบ (-)

4.5.3 การทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอกแบบทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

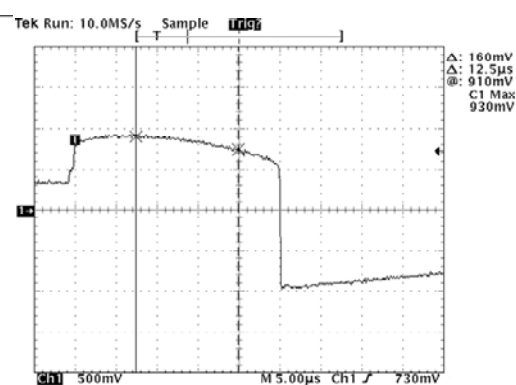
การเปรียบเทียบผลการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอก ด้วยรูปคลื่นผสม 6 kV 1.2/50 μ s, 3 kA 8/20 μ s ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ โดยใช้ทดสอบ MOV เบอร์ S 20 k275 ซึ่ง จะทำการทดสอบด้วยรูปคลื่นบวก(+) ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90° และทำการทดสอบ ด้วยรูปคลื่นลบ (-) ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 270° ผลการทดสอบดังตารางที่ 4-4 ลักษณะรูปคลื่นดังภาพที่ 4-27 และ 4-28

ตารางที่ 4-6 การเปรียบเทียบค่าแรงดันและช่วงเวลาของเครื่อง MIG 0630 IN กับ เครื่องที่สร้าง เมื่อทดสอบ MOV เบอร์ S 20 k275 ด้วยรูปคลื่นผสม 1.2/50 μ s , 8/20 μ s ทับซ้อนบน แรงดันกระแสสลับ

การทดสอบ		เครื่อง MIG 0630 IN	เครื่องที่สร้าง	ความแตกต่าง
รูปคลื่น(+)	ค่ายอด(V)	990	930	60
	ช่วงเวลา (μ s)	27.6	25	2.6
รูปคลื่น(-)	ค่ายอด(V)	-980	-950	30
	ช่วงเวลา (μ s)	27.9	25	2.1

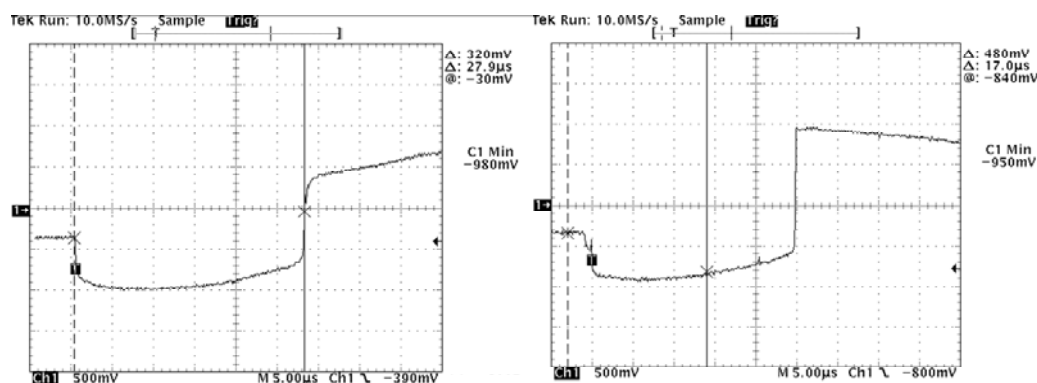


(ก) รูปคลื่นจากเครื่อง MIG 0630 IN
(500mV/div , 5 μ s/div)



(ข) รูปคลื่น จากเครื่องที่สร้าง
(500mV/div , 5 μ s/div)

ภาพที่ 4-27 การทดสอบ MOV เบอร์ S 20 k275 ด้วยรูปคลื่นบวก (+) ทับซ้อนที่มุม 90°



(ก) รูปคลื่นจากเครื่อง MIG 0630 IN

(500mV/div , 5 μ s/div)

(ข) รูปคลื่น จากเครื่องที่สร้าง

(500mV/div , 5 μ s/div)

ภาพที่ 4-28 รูปคลื่นจากการทดสอบ MOV เบอร์ S 20 k275 โดยตรงด้วยรูปคลื่นลบ (-)

4.6 สรุปผลการทดสอบ

ในการทดสอบที่กล่าวมาแล้วทั้งการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน และการทดสอบตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในขอบเขตของการทำวิทยานิพนธ์นี้ พร้อมทั้งนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกันเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 6 kV 1.2/50 μ s , 3 kA 8/20 μ s ของบริษัท EMG PARTNER เป็นเครื่องที่นำเข้าจากต่างประเทศ

ผลการทดสอบรูปคลื่นเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน IEEE C62.41-1991 ได้ตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน ตามตารางที่ 4-1 และ 4-2

ผลการทดสอบการทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 220 V 50 Hz ขึ้นละ 5° มีค่าผิดพลาดไม่เกิน 3° (ดูรายละเอียดที่ตารางที่ ก-1)

ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 6 kV 1.2/50 μ s , 3 kA 8/20 μ s ของบริษัท EMG PARTNER เป็นเครื่องที่นำเข้าจากต่างประเทศ ปรากฏว่ามีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 20 % ดังแสดงในตารางที่ 4-4

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษา วิเคราะห์ออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมที่สามารถทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่สามารถควบคุมมุมทับซ้อนได้ตั้งแต่ 0-360 องศา โดยทำการเปรียบเทียบกับรูปคลื่นที่มาตรฐานกำหนด และเครื่อง MIG 0630 IN ซึ่งผลได้ใกล้เคียงกับมาตรฐาน โดยสรุปผลได้ดังนี้

1. การทดสอบรูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μs และรูปคลื่นกระแส 8/20 μs ที่สร้างได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน IEEE C62.41-1991
2. การทดสอบการทับซ้อนของรูปคลื่นผสมบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0-360 องศา ทั้งรูปคลื่นบวก และลบ พบว่ามีการผิดพลาดของมุมทับซ้อนไม่เกิน 3 องศา
3. คุณลักษณะของเครื่องที่สร้างมีคุณลักษณะดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

รายละเอียด	รายการ
แรงดันทดสอบ (เปิดวงจร)	1.0 – 6.0 kV $\pm$ 10 %
รูปคลื่นแรงดันทดสอบ (เปิดวงจร)	1.2/50 μs $\pm$ 20 %
กระแสดทดสอบ (ลัดวงจร)	0.5 – 3.0 kV $\pm$ 10 %
รูปคลื่นกระแสดทดสอบ (ลัดวงจร)	8/20 μs $\pm$ 20 %
ขั้วของแรงดัน และกระแสดทดสอบ	บวก (+) และ ลบ (-)
เวลาในประจุแรงดันสูงสุด ต่อ ครั้ง	10 s
พลังงานสะสมสูงสุด	72 J
มุมเฟสที่สามารถทดสอบ	0-360 องศา
ความละเอียดมุมที่ปรับได้	ต่ำสุด 1 องศา

4. สามารถทำการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันกระชอก MOV เบอร์ S20K275 ได้ทั้งทดสอบโดยตรงและขณะต่อในระบบไฟฟ้า

5. เมื่อทำการทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม $1.2/50 \mu\text{s}$ - $8/20 \mu\text{s}$ รุ่น MIG 0630 IN ของบริษัท EMG PARTNER ในบทที่ 4 มีค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันปล่อยผ่าน (Let-Through Voltage) ของ MOV เบอร์ S20K275 ไม่เกิน 10 % ถ้าเปรียบเทียบแล้วเป็นที่น่าพอใจมาก เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการสร้างส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่ผลิตในประเทศ และราคาที่แตกต่างกันมาก

จากข้อสรุปทั้ง 5 ข้อที่กล่าวมาจึงสามารถที่จะกล่าวได้ว่างานวิจัยนี้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยทุกประการ ทั้งยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการออกแบบสวิตช์แรงสูงควรใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือสวิตช์สุญญากาศ แทน Spark Gap เพื่อให้การควบคุมการทำงานของเครื่องได้แม่นยำมากขึ้น แต่ราคาค่อนข้างสูง

5.2.2 การออกแบบวงจรควบคุมเฟสต้องมีความแม่นยำมากกว่านี้

5.2.3 การทดสอบควรทำการทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องมาตรฐาน เพื่อเปรียบเทียบความผิดพลาดของเครื่องก่อนนำไปทดสอบอุปกรณ์

5.2.4 ปัญหาที่สำคัญของการสร้างเครื่องคือการหาตัวเก็บประจุหลัก (C_s) ที่มีค่าความจุมาก ๆ และทนแรงดันกระแสตรงสูง ๆ หายากมาก ถ้าจะนำเอาตัวเก็บประจุเล็ก ๆ มาต่อให้ได้ค่าความจุและแรงดันที่ต้องการ ก็สามารทำได้ แต่จะเกิดปัญหาเมื่อมี C ตัวใดตัวหนึ่งเสียขึ้นมาจะทำให้เกิดความผิดพลาดมากขึ้น จึงแนะนำให้ หาตัวเก็บประจุแรงสูงตัวเดียวเลยจะดีกว่า

5.2.5 การทำ Spark Gap ควรบรรจุไว้บริเวณที่ปิดหรือฉนวนในก๊าซ SF_6 เพื่อป้องกันผลของความชื้นและบรรยากาศรอบข้างส่งผลต่อการการเบรกดาวน์

5.2.6 ลักษณะของหัว Spark Gap ควรมนกลม และให้มีแค่ส่วนโค้งบริเวณหัวเท่านั้นเพื่อให้ประจุเกิดความหนาแน่นเฉพาะบริเวณหัวไม่กระจายไปบริเวณอื่น ทำให้การเบรกดาวน์เร็วและรูปคลื่นไม่จะเรียบ

5.2.7 การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการควบคุมจะเกิดปัญหาอย่างมาก เนื่องจากสนามแม่เหล็กบริเวณทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เกิดการชำรุดเสียหาย จะต้องแยกกราวด์ และการป้องกันเรื่องสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้ดี และส่วนสัญญาณเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ควรจะให้สัญญาณแสง

5.2.8 การวัดรูปคลื่นกระแสควาใช้หัววัดวัดกระแส ในการวัดเพื่อลดการผิดพลาดจากการค่าแรงดันที่ตกคร่อม ความต้านทาน $1\ \Omega$ ที่นำมาต่อในวงจรเพื่อวัดกระแส

5.2.9 ความเหนี่ยวนำในวงจรเพิ่มขึ้นจากตัวต้านทาน เนื่องจากตัวต้านทานที่เกิดจากการนำลวดความร้อนหรือลวดนิโครมาพันแบบไปกลับแต่ก็ยังมีค่าความเหนี่ยวนำเหลืออยู่ ดังนั้นจึงต้องหาความต้านทานที่วัดได้สูงๆ และไม่มีค่าความเหนี่ยวนำเลย ควรตรวจสอบว่าเป็นความต้านทานแบบ Induction Less ก่อน

5.2.10 วงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ยังขาดความแม่นยำที่ค่าแรงดันต่ำเนื่องจากใช้วงจรลดทอนแรงดันแบบ ความต้านทาน ต้องใช้ความต้านทานสูงทำให้กระแสไหลได้น้อย ที่ระดับแรงดันต่ำ ทำให้แรงดันที่วัดได้เกิดการผิดพลาด

5.2.11 การจัดระเบียบการเดินสายภายในเครื่อง ก็มีผลต่อรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเหนี่ยวนำเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในสาย ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำในวงจรเปลี่ยนไป

5.2.12 ควรทำการวิจัยเพิ่มเติม (โดยการปรับเปลี่ยนรูปแบบการทดลอง/เครื่องมือ/วัสดุ/อุปกรณ์ เพื่อหาแนวทางแก้ไขข้อผิดพลาดที่กล่าวมาแล้วข้างต้น)

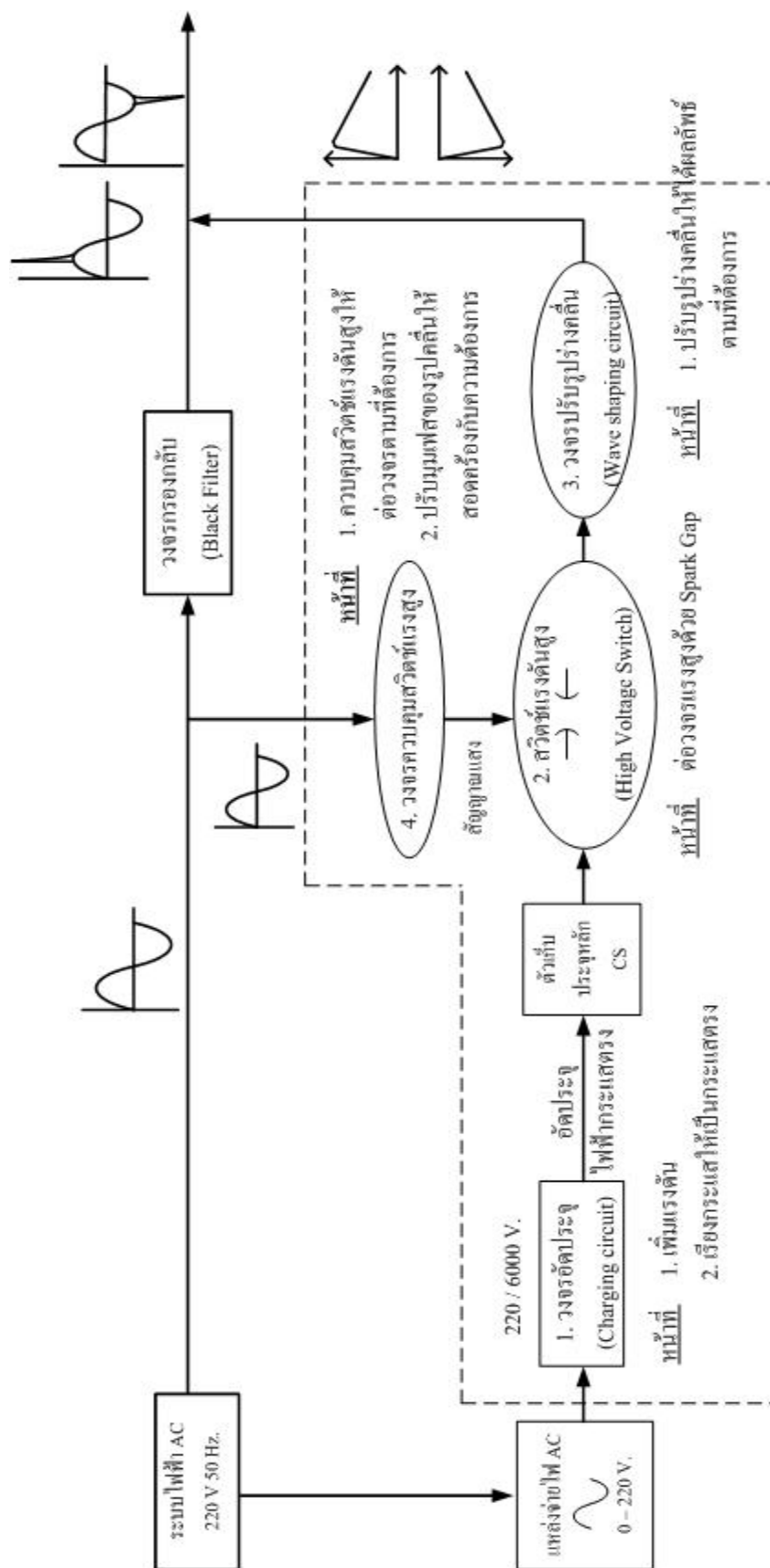
เอกสารอ้างอิง

1. IEEE C62.41-1991. IEEE Recommended Practice on Surge Voltage in Low – Voltage AC Power Circuits. New York : The Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc., 1991.
2. CEI/IEC 61000-4-5. International Standard CEI/ IEC 61000-4-5 Part 4-5 Testing and measurement techniques - Surge immunity test. Public Number CEI/IEC 61000-4-5 : 2005, Geneva : Switzerland, 2005.
3. IEEE C62.45.2-2002. IEEE Recommended Practice on Surge testing Equipment Low - Voltage AC Power Circuits. New York : The Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc., 2003.
4. สำรวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
5. IEC Publication 60060-2. High voltage test technique Part 2 : Measuring systems. Geneva : Switzerland, 1994.
6. นภัทร วัจนเทพินทร์. เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์. ปทุมธานี : สกายนิกส์, 2545.
7. ศุภชัย บุสราทิจ. คู่มือภาษาซีสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS51 พร้อมโปรแกรมภาษาซี Micro-C51. กรุงเทพฯ : อีทีที จำกัด, 2543.
8. ALLAN R. HAMBLY. Electrical Engineering Principles and Application Second Edition. Prentice Hall : New Jersey, 2002.
9. วีรพล นิธิกุลตานนท์ และสุรวดี ตั้งวรชัย. การสร้างเครื่องกำเนิดอิมพัลส์เพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินในระบบสื่อสาร. ปรินูญานพนธ์วิศวกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2542.
10. Center of Excellence in Electrical Power Technology Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. Test Report on Surge Protective Device of Stabil Company Limited. 2005.

ภาคผนวก ก

ส่วนประกอบและหน้าที่ของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

ตารางบันทึกผลการทดสอบ



ภาพที่ ก-1 ส่วนประกอบและหน้าที่ของส่วนประกอบ ของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมที่ซ่อนบนแรงดันกระแสสลับระหว่างมุม 0° ถึง 360°

ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบการทับซ้อนที่มุม 0 - 360 องศา ครึ่งละ 5 องศา

มุม	เวลา	ผลการทดสอบ (ms)					เวลาเฉลี่ย	ผิดพลาด	
(องศา)	(ms)	1	2	3	4	5	(ms)	เวลา(us)	องศา
0	0.00	0.10	0.00	0.00	0.10	0.00	0.04	-40.00	-0.72
5	0.28	0.36	0.28	0.28	0.32	0.32	0.31	-34.22	-0.62
10	0.56	0.56	0.54	0.53	0.55	0.56	0.55	7.56	0.14
15	0.83	0.76	0.82	0.83	0.81	0.79	0.80	31.33	0.56
20	1.11	1.05	1.06	1.06	1.10	1.10	1.07	37.11	0.67
25	1.39	1.40	1.40	1.36	1.44	1.48	1.42	-27.11	-0.49
30	1.67	1.68	1.64	1.64	1.72	1.76	1.69	-21.33	-0.38
35	1.94	1.93	2.03	1.97	1.92	1.94	1.96	-13.56	-0.24
40	2.22	2.18	2.19	2.23	2.18	2.23	2.20	20.22	0.36
45	2.50	2.48	2.53	2.50	2.55	2.47	2.51	-6.00	-0.11
50	2.78	2.76	2.74	2.79	2.82	2.76	2.77	3.78	0.07
55	3.06	3.12	3.03	3.07	3.04	3.05	3.06	-6.44	-0.12
60	3.33	3.35	3.31	3.31	3.31	3.35	3.33	7.33	0.13
65	3.61	3.68	3.64	3.62	3.61	3.31	3.57	39.11	0.70
70	3.89	3.89	3.89	3.89	3.90	3.85	3.88	4.89	0.09
75	4.17	4.18	4.15	4.21	4.16	4.23	4.19	-19.33	-0.35
80	4.44	4.46	4.42	4.48	4.48	4.44	4.46	-11.56	-0.21
85	4.72	4.80	4.68	4.70	4.74	4.74	4.73	-9.78	-0.18
90	5.00	5.00	4.98	4.96	5.00	5.00	4.99	12.00	0.22
95	5.28	5.30	5.28	5.26	5.24	5.28	5.27	5.78	0.10
100	5.56	5.58	5.56	5.52	5.58	5.60	5.57	-12.44	-0.22
105	5.83	5.84	5.88	5.80	5.84	5.84	5.84	-6.67	-0.12
110	6.11	6.06	6.08	6.06	6.14	6.06	6.08	31.11	0.56

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

มุม	เวลา	ผลการทดสอบ (ms)					เวลาเฉลี่ย	ผิดพลาด	
(องศา)	(ms)	1	2	3	4	5	(ms)	เวลา(us)	องศา
115	6.39	6.40	6.42	6.38	6.40	6.42	6.40	-15.11	-0.27
120	6.67	6.64	6.62	6.66	6.66	6.62	6.64	26.67	0.48
125	6.94	6.96	6.96	7.00	6.94	7.00	6.97	-27.56	-0.50
130	7.22	7.22	7.22	7.26	7.26	7.20	7.23	-9.78	-0.18
135	7.50	7.46	7.52	7.50	7.52	7.56	7.51	-12.00	-0.22
140	7.78	7.80	7.76	7.76	7.92	7.80	7.81	-30.22	-0.54
145	8.06	8.04	8.08	8.08	8.08	8.08	8.07	-16.44	-0.30
150	8.33	8.38	8.34	8.38	8.36	8.38	8.37	-34.67	-0.62
155	8.61	8.66	8.64	8.64	8.62	8.66	8.64	-32.89	-0.59
160	8.89	8.90	8.96	8.88	8.94	8.92	8.92	-31.11	-0.56
165	9.17	9.16	9.12	9.20	9.20	9.16	9.17	-1.33	-0.02
170	9.44	9.44	9.44	9.48	9.40	9.44	9.44	4.44	0.08
175	9.72	9.68	9.80	9.76	9.72	9.72	9.74	-13.78	-0.25
180	10.00	9.96	9.96	10.04	10.04	10.00	10.00	0.00	0.00
185	10.28	10.32	10.24	10.32	10.28	10.28	10.29	-10.22	-0.18
190	10.56	10.52	10.56	10.64	10.56	10.56	10.57	-12.44	-0.22
195	10.83	10.84	10.80	10.94	10.88	10.80	10.85	-18.67	-0.34
200	11.11	11.12	11.16	11.16	11.12	11.12	11.14	-24.89	-0.45
205	11.39	11.44	11.52	11.44	11.40	11.44	11.45	-59.11	-1.06
210	11.67	11.72	11.64	11.68	11.68	11.64	11.67	-5.33	-0.10
215	11.94	12.04	11.92	12.00	11.96	11.96	11.98	-31.56	-0.57
220	12.22	12.20	12.20	12.28	12.28	12.32	12.26	-33.78	-0.61

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

มุม	เวลา	ผลการทดสอบ (ms)					เวลาเฉลี่ย	ผิดพลาด	
(องศา)	(ms)	1	2	3	4	5	(ms)	เวลา(us)	องศา
225	12.50	12.48	12.60	12.44	12.64	12.52	12.54	-36.00	-0.65
230	12.78	12.84	12.88	12.80	12.76	12.80	12.82	-38.22	-0.69
235	13.06	13.08	13.04	13.12	13.04	13.04	13.06	-8.44	-0.15
240	13.33	13.36	13.28	13.32	13.40	13.36	13.34	-10.67	-0.19
245	13.61	13.64	13.68	13.60	13.60	13.68	13.64	-28.89	-0.52
250	13.89	13.84	13.84	13.96	13.84	14.00	13.90	-7.11	-0.13
255	14.17	14.20	14.16	14.20	14.12	14.20	14.18	-9.33	-0.17
260	14.44	14.44	14.48	14.48	14.52	14.44	14.47	-27.56	-0.50
265	14.72	14.80	14.81	14.75	14.72	14.72	14.76	-37.78	-0.68
270	15.00	15.00	15.00	15.04	15.04	15.00	15.02	-16.00	-0.29
275	15.28	15.28	15.28	15.32	15.28	15.28	15.29	-10.22	-0.18
280	15.56	15.56	15.56	15.52	15.60	15.60	15.57	-12.44	-0.22
285	15.83	15.88	15.80	15.84	15.80	15.88	15.84	-6.67	-0.12
290	16.11	16.20	16.12	16.08	16.12	16.08	16.12	-8.89	-0.16
295	16.39	16.44	16.40	16.40	16.32	16.40	16.39	-3.11	-0.06
300	16.67	16.72	16.68	16.76	16.72	16.60	16.70	-29.33	-0.53
305	16.94	16.96	16.96	16.96	16.92	16.96	16.95	-7.56	-0.14
310	17.22	17.28	17.16	17.24	17.24	17.20	17.22	-1.78	-0.03
315	17.50	17.52	17.48	17.44	17.56	17.56	17.51	-12.00	-0.22
320	17.78	17.80	17.84	17.76	17.80	17.76	17.79	-14.22	-0.26
325	18.06	18.08	18.00	18.08	18.00	18.00	18.03	23.56	0.42
330	18.33	18.32	18.32	18.28	18.28	18.28	18.30	37.33	0.67
335	18.61	18.60	18.60	18.56	18.52	18.60	18.58	35.11	0.63

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

มุม	เวลา	ผลการทดสอบ (ms)					เวลาเฉลี่ย	ผิดพลาด	
(องศา)	(ms)	1	2	3	4	5	(ms)	เวลา(us)	องศา
340	18.89	18.90	19.00	18.80	18.84	18.84	18.88	12.89	0.23
345	19.17	19.10	19.20	19.20	19.10	19.10	19.14	26.67	0.48
350	19.44	19.50	19.30	19.40	19.40	19.50	19.42	24.44	0.44
355	19.72	19.70	19.70	19.70	19.60	19.70	19.68	42.22	0.76
360	20.00	20.10	20.00	20.00	20.00	19.90	20.00	0.00	0.00

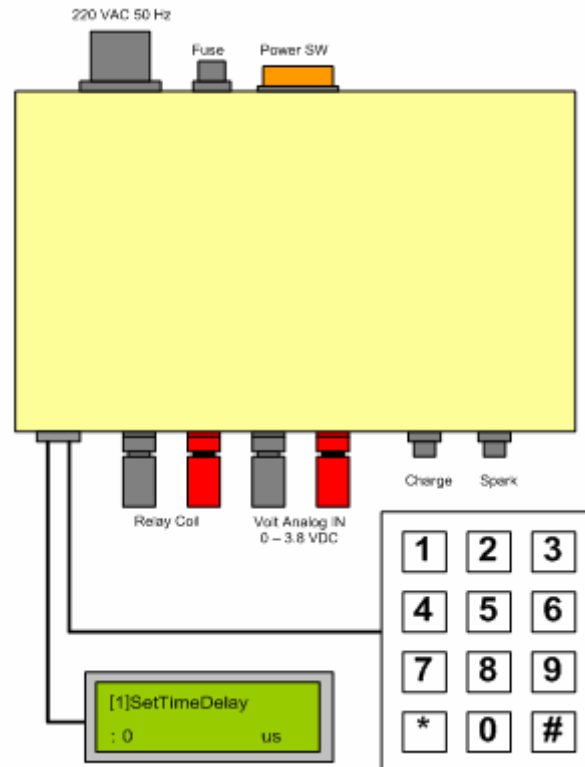
ภาคผนวก ข

คู่มือการใช้ชุดควบคุมมุมเฟส

คู่มือการใช้เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

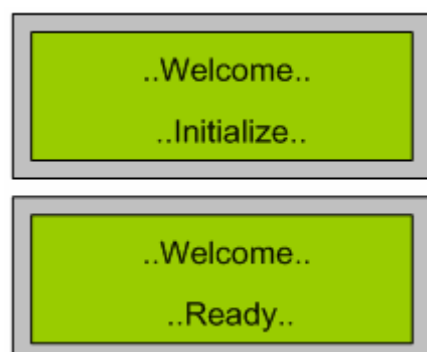
หลักการทำงานของวงจรควบคุมเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

1. คู่มือการใช้งานโปรแกรมควบคุมเฟส



ภาพที่ ข-1 ส่วนประกอบของชุดควบคุมมมเฟส

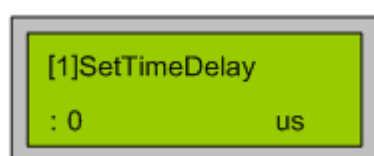
1.1 เมื่อเปิดเครื่องจะแสดงผลจอ LCD ดังรูป พร้อมเสียง Buzzer ดัง 2 จังหวะ 2 ครั้ง



ภาพที่ ข-2 หน้าจอ LCD เมื่อเปิดเครื่อง

1.2 เมื่อระบบทำการ Initialize ค่าภายในเสร็จแล้ว จะเข้าสู่หน้าเมนูแรกดังภาพ ซึ่งแต่ละเมนูจะอธิบายดังต่อไปนี้

1.2.1 [1] Set Time Delay



ภาพที่ ข-3 โหมด[1] Set Time Delay

ทำหน้าที่ตั้งค่า Time Delay ของการทำงาน มีค่าตั้งแต่ 0 – 9999 μ s

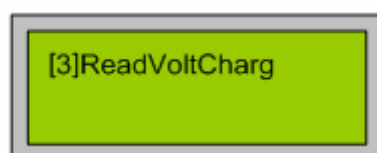
1.2.2 [2]Set Time Error



ภาพที่ ข-4 โหมด[2]Set Time Error

ทำหน้าที่ตั้งค่า Time Error ของการทำงานเพื่อชดเชยเวลาเนื่องจากที่ตั้งไว้ มีค่าตั้งแต่ 0 – 9999 μ s

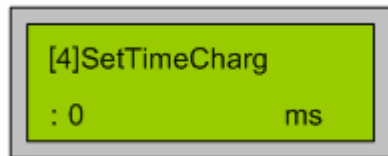
1.2.3 [3] Read Volt Charge



ภาพที่ ข-5 โหมด[3] Read Volt Charge

ทำหน้าที่สำหรับดูค่าแรงดันไฟที่เข้ามายังขา Analog Input จะแสดงเป็นหน่วย kV มีค่าประมาณ 0 – 7.12 kV ตามสเกล 3V = 6kV

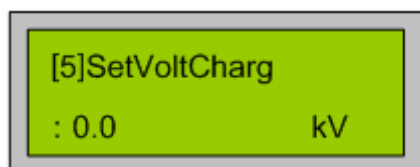
1.2.4 [4] Set Time Charge



ภาพที่ ข-6 โหมด[4] Set Time Charge

ทำหน้าที่ตั้งเวลาการ Charge ค่าแรงดัน มีค่าตั้งแต่ 0 – 9999 ms

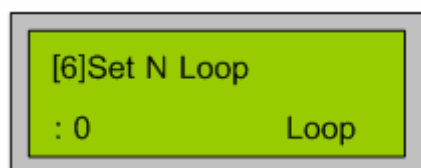
1.2.5 [5] Set Volt Charge



ภาพที่ ข-7 โหมด[5] Set Volt Charge

ทำหน้าที่ตั้งค่าแรงดันที่จุดทำงาน มีค่าตั้งแต่ 0 – 9.99 kV

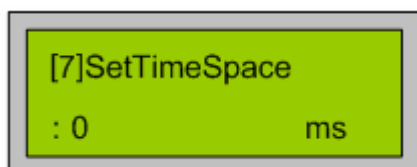
1.2.6 [6] Set N Loop



ภาพที่ ข-8 โหมด[6] Set N Loop

ทำหน้าที่ตั้งจำนวนรอบของการทำงาน มีค่าตั้งแต่ 0 – 9999 Loop

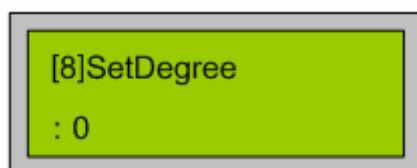
1.2.7 [7] Set Time Space



ภาพที่ ข-9 โหมด[7] Set Time Space

ทำหน้าที่ตั้งค่าเวลาระหว่างในการทำงานแต่ละรอบ มีค่า 0 – 9999 ms

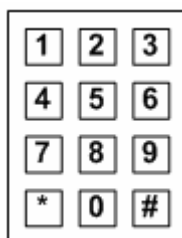
1.2.8 [8] Set Degree



ภาพที่ ข-10 โหมด[8] Set Degree

ทำหน้าที่ตั้งค่ามุมทาบซ้อน มีค่า 0 – 360 องศา

2. การใช้ Key Pad



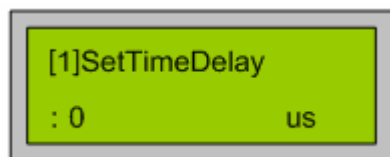
ภาพที่ ข-11 ปุ่มบน Key Pad

หน้าที่ของปุ่ม Key Pad แต่ละปุ่มมีดังนี้

- ปุ่มหมายเลข 0 – 9 ทำหน้าที่ ป้อนค่าตัวเลข
 ปุ่มหมายเลข 1 ทำหน้าที่เลื่อนเมนูขึ้น
 ปุ่มหมายเลข 4 ทำหน้าที่เลื่อนเมนูลง
 ปุ่ม # ทำหน้าที่ ตกลง หรือ ยอมรับ
 ปุ่ม * ทำหน้าที่ ยกเลิก หรือ ลบตัวเลขทีละตัว

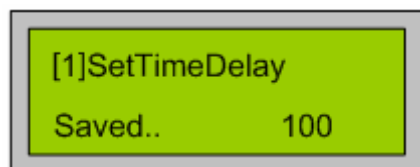
ตัวอย่างการป้อนค่าเมนู [1] Set Time Delay

1. กดปุ่ม 1 หรือ 4 เพื่อหาเมนูนี้ แล้วกด #



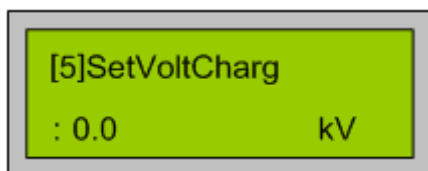
ภาพที่ ข-12 ตัวอย่างการป้อนค่าเมนู [1] Set Time Delay เมื่อกด #

2. จากนั้นให้ใส่ค่าตัวเลขที่ต้องการ หากป้อนผิดต้องการลบ ให้กดปุ่ม * แต่หากต้องการยกเลิก ให้กดปุ่ม * ไปจนกว่าจะเข้าสู่เมนูหลัก
3. เมื่อป้อนค่าที่ต้องการได้แล้วให้กดปุ่ม # เพื่อตกลง LCD จะแสดงผลว่าได้บันทึกค่าลงเรียบร้อยแล้ว พร้อมกับเสียง Buzzer ดัง



ภาพที่ ข-13 ตัวอย่างการป้อนค่าเมนู [1] Set Time Delay เมื่อบันทึกค่า

ตัวอย่างการป้อนค่าเมนู [5] Set Volt Charg



ภาพที่ ข-14 ตัวอย่างการป้อนค่าเมนู [5] Set Volt Charg

เมนูนี้ค่าที่ป้อนจะหารด้วย 100 แล้วจะมีหน่วยเป็น kV เช่น ถ้าต้องการแรงดัน 6 kV ให้ป้อนค่า 600 เป็นต้น

3. คู่มือการใช้เครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 6 kV, 1.2/50 μ s – 3 kA, 2/20 μ s

การใช้งานเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 ต่อวงจรการทดสอบให้เรียบร้อย โดยต่อวงจรอัดประจุตำแหน่ง Capacitor Charge กับขั้ว (+)(หมายเลข 9) หรือขั้ว (-)(หมายเลข 11) ตามชนิดของการทดสอบ และต่อ Output (หมายเลข 12) กับอุปกรณ์ทดสอบ (EUT) หรือต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยผ่าน Spark Gap หรือผ่าน Capacitor 18 μ F พร้อมทั้งต่อเครื่องมือวัด คือ ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ให้เรียบร้อย

ขั้นที่ 2 “ON” เซอร์กิตเบรกเกอร์ (หมายเลข 1) เพื่อจ่ายแรงดันให้กับ Microcontroller และวงจร

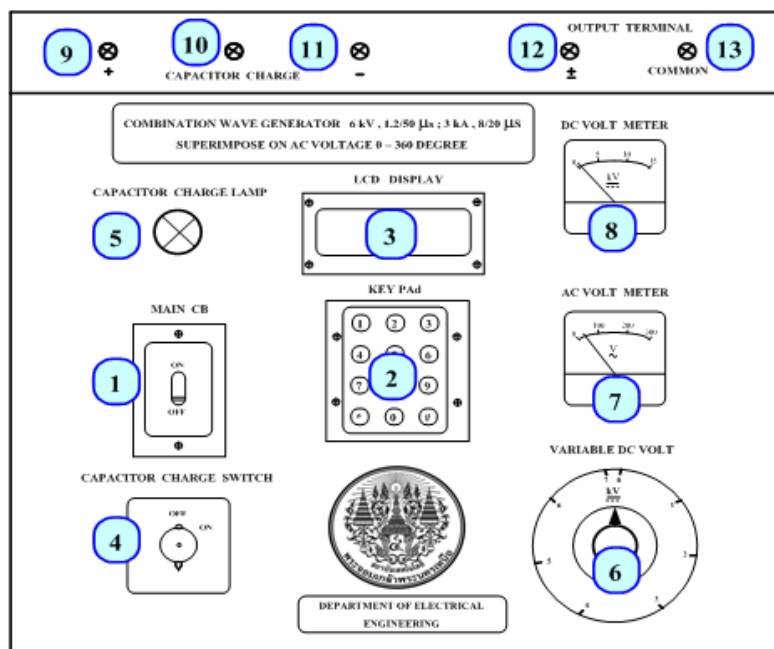
ขั้นที่ 3 ตั้งค่าต่างๆ ตามคู่มือการใช้ชุดควบคุมมุมเฟส (ภาคผนวก ข)

ขั้นที่ 4 “ON” Charge Switch (หมายเลข 4) หลอดไฟสีเขียวจะสว่าง

ขั้นที่ 5 ทดสอบโดยใช้คำสั่งผ่าน Key Pad (หมายเลข 2) และ Microcontroller จะทำงานอยู่ที่โหมด [9] โดยกดที่ปุ่ม [#] จะได้ยินเสียงดัง บี๊บ หนึ่งครั้ง และจะได้ยินเสียงคอนแทคเตอร์ต่อวงจรอัดประจุ

ขั้นที่ 6 ปรับ DC Variable (หมายเลข 3) ขึ้นไปถึงตำแหน่งแรงดันที่จะทดสอบโดยดูจากตัวเลขที่บอกบน DC Variable หรือจะตั้งไว้ที่ตำแหน่งสูงสุดก็ได้ เมื่อแรงดันอัดประจุที่ C_s เครื่องจะทำการจุจนจนสวิทช์แรงสูง ทำให้เกิดการเบรกคาว์นผ่าน Spark Gap ผ่านวงจรปรับรูปคลื่น ไปยังอุปกรณ์ทดสอบหรือระบบที่ต่อทางด้าน Output และจะได้ยินเสียง Microcontroller ดัง บี๊บยาว เป็นอันว่าเสร็จสิ้นกระบวนการทดสอบในครั้งนั้น แต่ถ้าตั้งค่า

การทดสอบหลายครั้ง เครื่องจะทำงานต่อจนครบแล้วจะมีเสียง ปี่ยาว แสดงว่าเครื่องทำการทดสอบจนครบแล้ว



ภาพที่ ข-15 ตำแหน่งอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม 6 kV -3 kA
1.2/50 μ S - 8/20 μ S

- 1 คือ Main Circuit Beaker หน้า ที่ ตัดต่อระบบไฟของเครื่อง
- 2 คือ Key Pad หน้า ที่ ป้อนข้อมูลให้กับ Microcontroller
- 3 คือ LCD Display หน้า ที่ แสดงผลการทำงานของ Microcontroller
- 4 คือ Capacitor Charge Switch หน้า ที่ ตัดต่อวงจรอัดประจุให้กับ C_s
- 5 คือ Capacitor Charge Lamp หน้า ที่ แสดงสถานะการอัดประจุ C_s
- 6 คือ Variable Voltage ทำหน้าที่ เพิ่ม – ลด แรงดันให้กับหม้อแปลงแรงสูง
- 7 คือ AC Volt Meter ทำหน้าที่ แสดงค่าแรงดันเมื่อปรับ แรงดันด้วยหมายเลข 6
- 8 คือ DC Volt Meter ทำหน้าที่ แสดงค่าแรงดันที่อัดประจุให้กับ C_s
- 9 คือ ขั้ว + สำหรับอัดประจุที่เป็น+ให้กับ C_s เมื่อต้องการรูปคลื่น +
- 10 คือ ขั้วของ C_s สำหรับต่อกับแรงดัน + (9) หรือ + (11) ในการอัดประจุ
- 11 คือ ขั้ว – สำหรับอัดประจุที่เป็น-ให้กับ C_s เมื่อต้องการรูปคลื่น –
- 12 คือ Output Terminal ขั้ว + หรือ – สำหรับต่อกับอุปกรณ์ทดสอบ
13. คือ Output Terminal ขั้วกลาง (Common) สำหรับต่อกับอุปกรณ์ทดสอบ

4. หลักการทำงานของวงจรควบคุมเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

เมื่อ “ON” Main CB จะมีแรงดันไฟฟ้า 220 V 50 Hz จ่ายให้กับชุดควบคุมมูมเฟสทันที จะได้ยินเสียงของ Buzzer ร้องดัง ป๊อปๆ และหน้าจอ LCD จะแสดงข้อความตามคู่มือการใช้งานชุดควบคุมมูมเฟส เมื่อ “ON” Capacitor Charge Switch (S_1) จะมีแรงดันไฟฟ้าจ่ายเข้าไปยังชุดควบคุมมูมเฟส แปลงปรับค่า 0-220 V (Tr_1) แต่ยังไม่มีการจ่ายเข้าหม้อแปลง Tr_2 เนื่องจาก S_2 ซึ่งเป็นคอนแทคปกติเปิด (ON) ของ Relay ค่อยอยู่ และรอการสั่งการจาก Microcontroller และเมื่อการตั้งค่าที่ Microcontroller เรียบร้อยแล้ว สามารถเริ่มทำการทดสอบได้โดยตั้งโหมดการทำงานมาที่โหมด [8] แล้วกดปุ่ม [#] จากนั้น Microcontroller ก็จะทำการตรวจสอบสัญญาณ Sine Wave เพื่อคำนวณหาตำแหน่งมูมที่ต้องการทับซ้อน Microcontroller จะสั่งให้วงจรอัดประจุในชุดจุดชนวนด้วยสัญญาณแสงผ่านใยแก้วนำแสง (Fiber Optic) ตามเวลาที่ตั้งค่าไว้ที่โหมด[4] Time Charge ขณะเดียวกันก็สั่งให้วงจรอัดประจุให้กับ C_s โดยผ่าน Relay ซึ่งจะทำการเปิดคอนแทค S_2 ค่อยจร ทำให้มีแรงดันเข้าไปยังหม้อแปลงไฟฟ้า Tr_2 และเมื่อมีการปรับแรงดันที่หม้อแปลง Tr_1 ให้สูงขึ้น จะทำให้มีแรงดันออกจาก Tr_2 ผ่านวงจรแปลงแรงดันกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงแบบครึ่งลูกคลื่น (Half Wave Rectified) และผ่านความต้านทานจำกัดกระแส R_L เพื่อป้องกันกระแสที่ไหลมากเกินไป ซึ่งจะทำให้ขดลวดของหม้อแปลง Tr_2 ขาดได้

เมื่อแรงดันกระแสตรงอัดประจุให้กับ C_s โดยที่จะมีวงจรขดลวดแรงดัน (Voltage Divider) ต่อพร้อม C_s อยู่ และส่งแรงดันที่ลดทอนได้ไปยัง Dc Volt Meter และวงจร ADC ของ Microcontroller เพื่อตรวจสอบว่าแรงดันที่อัดประจุให้กับ C_s เท่ากับแรงดันทดสอบที่ตั้งไว้หรือไม่ เมื่อแรงดันที่ตกคร่อม C_s ที่วัดโดยใช้ Voltage Divider เท่ากับแรงดันที่กำหนด Microcontroller จะสั่งให้วงจรจุดชนวนที่สวิตช์แรงสูงทำงาน โดยส่งเป็นสัญญาณแสงผ่านสายใยแก้วนำแสงไปยังชุดจุดชนวนที่มีวงจรรับแสงอยู่แล้ว ทำให้วงจรกำเนิดแรงดันสูงด้วยการคายประจุของ C ที่ต่อในวงจรผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งมีอัตราส่วน 1:100 V ทำให้เกิดแรงดันสูงเบรกควาน์ผ่านขั้วหัวเทียนที่อยู่ภายในขั้ว Electrode ของวงจรสร้างรูปคลื่นอิมพัลส์ที่มีสนามไฟฟ้าอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดการเบรกควาน์ต่อที่ขั้ว Electrode ทั้งสอง แรงดันที่เก็บไว้ที่ C_s ถูกปล่อยผ่านวงจรสร้างรูปคลื่นออกไปที่ขั้ว Output ผ่านไปยังอุปกรณ์ทดสอบ (EUT) หรือระบบไฟฟ้าที่ทำการทดสอบ จนประจุที่ C_s ลดลงจนหมดในช่วงระยะเวลาอันรวดเร็ว เป็นการทำงานของเครื่องทำงานครบหนึ่งรอบ

แต่ในกรณีที่ตั้งค่าการทำงานหลายๆ ครั้ง ระบบก็จะกลับไปทำงานจากการอัดประจุ C ที่ชุดจุดชนวน, C_s และตรวจสอบมูมเฟส และส่งจุดชนวนสวิตช์แรงสูงเช่นนี้ต่อไปจนครบตามจำนวนรอบ (Loop) ที่ตั้งไว้ หรือถ้าต้องการหยุดการทำงานก่อนที่จะครบตามจำนวนที่ตั้งไว้ก็สามารถทำ

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายรัชชัย สิมมา
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสมทับซ้อนบนแรงดัน
 กระแสสลับระหว่างมุม 0 ถึง 360 องศา สำหรับทดสอบอุปกรณ์ใน
 ระบบไฟฟ้าแรงต่ำ
 สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า

ประวัติ

ประวัติส่วนตัว เกิดเมื่อวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2515 ที่บ้านเลขที่ 112 หมู่ 2 ตำบลโคกลี
 อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น

ประวัติการศึกษา สำเร็จระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาช่างไฟฟ้ากำลัง และ
 ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาช่างไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
 วิทยาเขตขอนแก่น เมื่อปี พ.ศ. 2535 และ 2537 ตามลำดับ ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรมหา
 บัณฑิต (ค.อ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อปี
 พ.ศ. 2539 และปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบัน
 เทคโนโลยีราชมงคล เมื่อปี พ.ศ. 2544 ตามลำดับ

ประวัติการทำงาน พ.ศ. 2539 เข้ารับราชการตำแหน่ง อาจารย์ 1 ระดับ 3 สังกัด สถาบัน
 เทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น ปัจจุบัน ดำรงตำแหน่งอาจารย์ ระดับ 6
 สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น จังหวัด
 ขอนแก่น