

การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม 6 กิโลโวลต์ 3 กิโลแอมแปร์



นายกมล กำธรเจริญ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

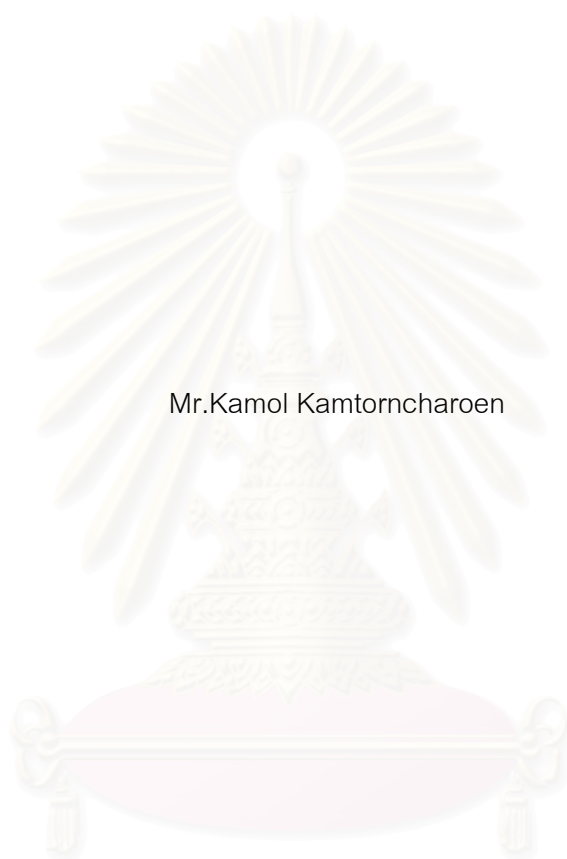
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1116-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 6-kV , 3-kA COMBINATION WAVE GENERATOR



Mr.Kamol Kamtorncharoen

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Eletrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1116-4

กมล กำธรเจริญ : การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม 6 กิโลโวลต์ 3 กิโลแอมแปร์ (Design and Construction of a 6-kV, 3 kA Combination Wave Generator) อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ , 73 หน้า. ISBN 974-03-1116-4

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมที่สามารถจ่ายแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 6 กิโลโวลต์ขณะเปิดวงจร และจ่ายกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 3 กิโลแอมป์ขณะลัดวงจร เพื่อใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 1000-4-5 โดยพิจารณาการทดสอบขณะที่อุปกรณ์ทดสอบต่อใช้งานอยู่กับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ เพราะฉะนั้น เครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมนี้จะต้องมีขั้วออกไม่ต่อลงดิน และในการทดสอบจะต้องมีวงจรรองเพื่อป้องกันไม่ให้อิมพัลส์เข้าสู่ระบบไฟฟ้า และวงจรรองเพื่อป้องกันไม่ให้ไฟจากระบบไฟฟ้าเข้าสู่เครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม โดยในโครงการนี้จะนำเสนอการออกแบบและสร้างวงจรรองทั้งสองนี้ด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2544.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170205021 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : COMBINATION WAVE/ SURGE IMMUNITY TEST/ COMBINATION WAVE
GENERATOR

KAMOL KAMTORNCHAROEN : DESIGN AND CONSTRUCTION OF 6 KV, 3 KA
COMBINATION WAVE GENERATOR. THESIS ADVISOR : KOMSON PETCHARAKS
, Dr. Sc.Techn, 73 pp. ISDN 974-03-1116-4

This thesis presents a design and construction of a Combination Wave Generator that can supply 6 kV standard impulse voltage in open circuit condition and 3 kA standard impulse current in short circuit condition for testing an electronic or electrical device according to IEC 1000-4-5 Standard. The standard requires that the test object is powered during test, thus the generator must have floating output terminals. It must have decoupling circuit to prevent surges enter to other devices or systems that are not under test and coupling circuit for preventing power to the combination wave generator. This thesis presents also a design and construction of decoupling circuit and the coupling circuit.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Electrical Engineering..... Student's signature.....
Field of student.....Electrical Engineering..... Advisor's signature.....
Academic year.....2001..... Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรวัชร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยในทุกๆ ด้าน, ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะ
ด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง ที่ให้การสนับสนุนด้านเงินทุนอุดหนุนการวิจัย คณะกรรมการสอบวิทยา
นิพนธ์ทุกท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูง

ผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก คุณถาวร เอื้อดี ที่ให้คำแนะนำในการทดสอบการ
ใช้อุปกรณ์ และช่วยหาอุปกรณ์ทดสอบต่างๆ ให้ คุณเกรียงไกร โอธธัญ สำหรับความช่วยเหลือใน
การใช้เครื่องมือ คุณอรรรณพ ลิ้มสีมารัตน์ สำหรับค่าบริการและความช่วยเหลือต่างๆ เจ้าหน้าที่
และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจ
ใจ ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่เื้อะสวนฯ ที่คอยเป็นกำลังใจให้เสมอมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัว ผู้ให้ความสนับสนุนในทุกๆ เรื่องและเป็นกำลังใจที่ดี
เสมอมา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป	ฎ

บทที่

1. บทนำ.....	1
1.1 บทนำทั่วไป	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	1
1.3 ผลการศึกษาในอดีต.....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. มาตรฐานในการทดสอบ IEC 1000-4-5	4
2.1 เครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม (1.2/50 μ s, 8/20 μ s)	4
2.1.1 ลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม	4
2.1.2 การทดสอบเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม	5
2.2 วงจรคัปปลิงและดีคัปปลิง	5
2.3 วิธีการทดสอบอุปกรณ์ทดสอบ	6
2.3.1 กรณีคอมมัลด์ (Common Mode).....	6
2.3.2 กรณีนอร์มัลด์ (Normal Mode)	7
2.4 ข้อกำหนดสภาวะการทดสอบ.....	7
2.5 รูปคลื่นมาตรฐาน	8
3. การออกแบบและประกอบสร้าง	9
3.1 การออกแบบวงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม	9
3.1.1 การออกแบบตัวต้านทาน.....	10

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3.1.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ.....	12
3.1.3 การออกแบบตัวเก็บประจุ.....	12
3.1.4 การทดสอบ.....	13
3.1.5 การทดสอบโดยใช้ Differential Probe.....	17
3.2 การออกแบบวงจรบัลิ่งและดีคัปปลิ่ง.....	18
3.2.1 การออกแบบวงจรบัลิ่ง.....	18
3.2.2 การออกแบบวงจรดีคัปปลิ่ง.....	20
3.2.2.1 การทดสอบในกรณีคอมมัลด์.....	23
3.2.2.2 การทดสอบในกรณีอินอร์มัล.....	25
4. การทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	29
4.1 การทดสอบเสิร์จที่เข้าระบบ.....	29
4.1.1 กรณีคอมมัลด์.....	29
4.1.2 กรณีอินอร์มัล.....	30
4.2 การทดสอบแรงดัน AC ที่เข้าสู่เครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม.....	31
4.2.1 กรณีคอมมัลด์.....	32
4.2.2 กรณีอินอร์มัล.....	35
4.3 การทดสอบรูปคลื่นที่ผ่านวงจรบัลิ่ง.....	37
4.3.1 กรณีคอมมัลด์.....	37
4.3.2 กรณีอินอร์มัล.....	39
4.4 การทดสอบป้อนอิมพัลส์ในขณะที่ต่อแหล่งจ่ายไฟ.....	43
4.4.1 กรณีคอมมัลด์.....	43
4.4.2 กรณีอินอร์มัล.....	45
4.5 ผลของรูปแบบการต่อสายดิน.....	50
5. การทดลองโดยใช้ SCR ในการสวิตช์.....	52
5.1 ลักษณะทั่วไปของ SCR.....	52
5.2 ลักษณะและการใช้งานทางกลของ SCR เบอร์ ST330C16C1.....	53
5.3 พิกัดต่างๆ และการป้องกันของ SCR เบอร์ ST330C16C1.....	56
5.4 วงจรการลั่นไก SCR (Triggering).....	58

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
5.5 ผลการทดลอง.....	60
5.5.1 ทดลองอิมพัลส์กระแส 8/20 μ s ที่ 3kA	60
5.5.2 การทดลองโดยใช้ SCR หลายตัว	61
บทที่ 6.....	63
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	63
6.1 สรุปผลการทดลองเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม.....	63
6.2 สรุปการวัดรูปคลื่น	64
6.3 สรุปการใช้งาน SCR.....	65
6.4 ข้อเสนอแนะ	66
รายการอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก.....	68
ภาคผนวก ผลการทดสอบกับดักแรงดันเกิน.....	69
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	73

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1 : ค่าพลังงานที่เกิดจากอิมพัลส์.....	10
3-2 : ค่ากำลังงานที่เกิดจากระบบ	11
3-3 : ค่าพิกัดของวงจรถับคลื่นในกรณีต่างๆ.....	19
3-4 : แสดงผลการทดสอบในกรณีคอมมัล.....	23
3-5 : แสดงผลการทดสอบในกรณีนอร์มัล	26
5-1 : แสดงพิกัดทางอุณหภูมิ และทางกล	54
5-2 : แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในสภาวะนำกระแสและไม่นำกระแสของ SCR	56
5-3 : แสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ของการลัดวงจร SCR	58



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2-1 : วงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม.....	4
2-2 : แสดงการทดสอบในกรณีคอมมัล.....	6
2-3 : แสดงการทดสอบในกรณีนอร์มัล.....	7
2-4 : รูปคลื่นแรงดันมาตรฐานขณะเปิดวงจร.....	8
2-5 : คลื่นกระแสมาตรฐานขณะลัดวงจร.....	8
3-1 : วงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมที่ได้จากการ SIMULATE.....	9
3-2 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการ SIMULATE.....	9
3-3 : แสดงรูปคลื่นกระแสที่ได้จากการ SIMULATE.....	10
3-4 : แสดงวงจรหลักของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม.....	11
3-5 : แสดงตัวเก็บประจุที่ออกแบบและประกอบเสร็จแล้ว.....	13
3-6 : แสดงโซลินอยด์ในการสวิตซ์.....	13
3-7 : แสดงหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่วัดได้ขณะเปิดวงจร.....	14
3-8 : แสดงหลังคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่วัดได้ขณะเปิดวงจร.....	14
3-9 : แสดงค่าสูงสุดของแรงดันอิมพัลส์ที่วัดได้ขณะเปิดวงจร.....	15
3-10 : แสดงหน้าคลื่นกระแสอิมพัลส์ขณะลัดวงจร.....	16
3-11 : แสดงหลังคลื่นกระแสอิมพัลส์ขณะลัดวงจร.....	16
3-12 : แสดงรูปคลื่นกระแสที่วัดได้ขณะลัดวงจร.....	17
3-13 : แสดงหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่วัดโดย DIFFERENTIAL PROBE.....	17
3-14 : แสดงหลังคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่วัดโดย DIFFERENTIAL PROBE.....	18
3-15 : การต่อตัวเก็บประจุแต่ละชั้น.....	19
3-16 : ตัวเก็บประจุคัปปลิงที่ประกอบเสร็จแล้ว.....	19
3-17 : แสดงวงจรดีคัปปลิง.....	20
3-18 : แสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวเหนี่ยวนำ.....	20
3-19 : แสดงวงจรดีคัปปลิงที่สร้างเสร็จแล้ว.....	21
3-20 : แสดงวงจรที่ SIMULATE ในกรณีนอร์มัล.....	22
3-21 : แสดงวงจรที่ SIMULATE ในกรณีคอมมัล.....	22
3-22 : แสดงแรงดันอิมพัลส์ที่ขั้วขาเข้าของวาริแอกที่ 30%.....	24
3-23 : แสดงแรงดันอิมพัลส์ที่ขั้วขาออกของวาริแอกที่ 30%.....	24

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3-24 : แสดงการวัดแรงดันชาร์จ์ประจุในกรณีอินอร์มัล	25
3-25 : แสดงวงจรที่เกิดลูปในกรณีอินอร์มัล	25
3-26 : แสดงแรงดัน V_{LG} , V_{NG} ที่ขั้วขาเข้าออกของวาริแอกที่ 15%	27
3-27 : แสดงแรงดัน V_{LN} ที่ขั้วขาเข้าของวาริแอกที่ 15%	27
3-28 : แสดงแรงดัน V_{LG} , V_{NG} ที่ขั้วขาออกของวาริแอกที่ 15%	28
3-29 : แสดงแรงดัน V_{LN} ที่ขั้วขาออกของวาริแอกที่ 15%.....	28
4-1 : แสดงรูปคลื่นอิมพัลส์ที่เข้าระบบ V_{LG} , V_{NG} และ V_{LN}	29
4-2 : แสดงรูปคลื่นอิมพัลส์ที่เข้าระบบ V_{LG} , V_{NG}	30
4-3 : แสดงรูปคลื่นอิมพัลส์ที่เข้าระบบ V_{LN}	31
4-4 : แสดงรูปคลื่นแรงดัน AC จากแหล่งจ่าย	32
4-5 : รูปแสดงแรงดัน V_{LN} ที่ผ่านวงจรดีคัปลิง.....	32
4-6 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 10 โอห์ม	33
4-7 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 25 โอห์ม	33
4-8 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 21 โอห์ม	34
4-9 : แสดงรูปคลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟ V_{LG} , V_{NG}	34
4-10 : แสดงรูปคลื่นแรงดันเมื่อผ่านวงจรดีคัปลิง V_{LG} , V_{NG}	35
4-11 : รูปแสดงแรงดัน V_{LN} ที่ผ่านวงจรดีคัปลิง.....	35
4-12 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 25 โอห์ม	36
4-13 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 21 โอห์ม	36
4-14 : แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ผ่านวงจรคัปลิง	37
4-15 : แสดงการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ผ่านวงจรคัปลิง	37
4-16 : แสดงรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ผ่านวงจรคัปลิง	38
4-17 : แสดงวงจรในการวัดด้วยดีไวเดอร์ตัวเก็บประจุ 1 ชุดในกรณีอินอร์มัล	39
4-18 : แสดงแรงดันอิมพัลส์ V_{LG} และ V_{NG}	40
4-19 : แสดงแรงดันอิมพัลส์ V_{LN}	40
4-20 : แสดงวงจรในการวัดด้วยดีไวเดอร์ตัวเก็บประจุ 2 ชุดในกรณีอินอร์มัล	41
4-21 : แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ V_{LG} , V_{NG}	41
4-22 : แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ V_{LN}	42

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4-23 : แสดงรูปคลื่นอิมพัลส์กระแสที่ผ่านวงจรถักปลิงในกรณีอินอร์มัล.....	42
4-24 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถักปลิงและที่ผ่านเข้าระบบที่มุ่มประมาณ 240 องศา.....	43
4-25 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถักปลิงและที่ผ่านเข้าระบบที่มุ่มประมาณ 225 องศา.....	44
4-26 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถักปลิงและที่ผ่านเข้าระบบที่มุ่มประมาณ 45 องศา.....	44
4-27 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถักปลิงและที่ผ่านเข้าระบบที่มุ่มประมาณ 90 องศา.....	45
4-28 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถักปลิง V_{LG} , V_{NG} ที่มุ่มประมาณ 110 องศา.....	46
4-29 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถักปลิง V_{LN} และที่ผ่านเข้าระบบที่มุ่มประมาณ 110 องศา	46
4-30 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถักปลิง V_{LG} , V_{NG} ที่มุ่มประมาณ 270 องศา.....	47
4-31 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถักปลิง V_{LN} และที่ผ่านเข้าระบบที่มุ่มประมาณ 270 องศา	47
4-32 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถักปลิง V_{LG} , V_{NG} ที่มุ่มประมาณ 0 องศา.....	48
4-33 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถักปลิง V_{LN} และที่ผ่านเข้าระบบที่มุ่มประมาณ 0 องศา ..	48
4-34 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถักปลิง V_{LG} , V_{NG} ที่มุ่มประมาณ 90 องศา.....	49
4-35 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถักปลิง V_{LN} และที่ผ่านเข้าระบบที่มุ่มประมาณ 90 องศา	49
4-36 : แสดงรูปคลื่นที่มีสัญญาณรบกวนในลักษณะต่างๆ	50
4-37 : แสดงการเกิดกราวด์ลูป (GROUND LOOP)	50
4-38 : แสดงรูปคลื่นที่วัดได้ในกรณีที่ใช้หม้อแปลงขดลวดแยกแบบขั้วขาออกไม่ต่อสายดิน.....	51
5-1 : แสดงสัญลักษณ์ของ SCR.....	52
5-2 : แสดงรูปร่างลักษณะของ SCR เบอร์ ST330C16C1	53
5-3 : แสดงชุดประกอบของ SCR	54
5-4 : แสดงชุดประกอบในกรณีใช้ SCR หลายตัว.....	55
5-5 : แสดงวงจรถักปลิงสำหรับป้องกัน SCR.....	57
5-6 : แสดงวงจรถักปลิง SIMULATE หาค่า CS ในกรณีเลวร้ายที่สุด	57
5-7 : แสดงวงจรถักปลิงเบอร์ที่สร้างเสร็จแล้ว	57
5-8 : แสดงกราฟลักษณะทั่วไปของเกต	59
5-9 : แสดงวงจรถักปลิง SCR.....	59
5-10 : แสดงวงจรถักปลิงที่สร้างเสร็จแล้ว	60

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5-11 : แสดงวงจรมัลติเพล็กซ์กระแส.....	61
5-12 : แสดงการใช้ SCR สองตัวในชุดประกอบ.....	61
ก-1 : แสดงกับดักแรงดันเกินชนิด SIC ที่นำมาทดสอบ.....	69
ก-2 : รูปคลื่นกระแสขณะกับดักเสิร์จ SIC ทำงาน.....	69
ก-3 : แสดงแรงดันขณะกับดักเสิร์จ SIC ทำงาน.....	70
ก-4 : รูปคลื่นกระแสขณะกับดักเสิร์จ ZNO ทำงาน.....	70
ก-5 : แสดงแรงดันขณะกับดักเสิร์จ ZNO ทำงาน.....	71
ก-6 : แสดงรูปคลื่นทดสอบกับดักแรงดันเกิน SIC ในขณะป้อนแหล่งจ่ายไฟ.....	71
ก-7 : แสดงรูปคลื่นทดสอบกับดักแรงดันเกิน SIC ในขณะป้อน.....	72

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

ในระบบไฟฟ้านั้นโดยทั่วไปมีโอกาสเกิดเสิร์จขึ้นได้ ซึ่งอาจจะเกิดจากการทำงานของสวิตช์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ ฟิวส์ หรือเกิดจากการเหนี่ยวนำจากการเกิดฟ้าผ่า โดยเราจะแบ่งตามชนิดของเสิร์จได้ 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ เสิร์จสวิตชิง และเสิร์จฟ้าผ่า ดังนั้นอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านจึงมีโอกาสที่จะได้รับเสิร์จ และอาจเกิดความเสียหายได้ เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ จึงควรมีการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จก่อน เพื่อให้มั่นใจว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าของเรานั้นสามารถทนเสิร์จได้ในระดับหนึ่ง การทดสอบนั้นมีมาตรฐานมากมาย เช่น IEEE, ANSI, UL, FCC, IEC ฯลฯ ซึ่งแล้วแต่ว่าที่ใดจะยึดถือตามมาตรฐานใด

การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าจะแบ่งการทดสอบออกเป็นหลายชนิด เช่น การทดสอบด้วยคลื่นแกว่ง การทดสอบระดับความคงทนได้ และทดสอบด้วยรูปคลื่นกระแสและรูปคลื่นแรงดัน [1] ในการทดสอบด้วยรูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นแรงดันนั้นยังแบ่งเป็น การทดสอบด้วยคลื่นแกว่ง การทดสอบด้วยรูปคลื่น 10/1000 μ s การทดสอบด้วยรูปคลื่นผสม ฯลฯ ซึ่งขึ้นกับแต่ละมาตรฐานด้วย ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นยังแบ่งระดับการทดสอบออกเป็นระดับการทดสอบต่างๆ โดยจะขึ้นกับโอกาสการได้รับเสิร์จของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นๆ

ในขนาดทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่เข้าข่ายมีโอกาสได้รับเสิร์จ จะต้องผ่านการทดสอบก่อนนำมาใช้ เราจึงควรมีเครื่องมือทดสอบ และสามารถสร้างชุดทดสอบได้เอง

สำหรับโครงการนี้เราจะทำการออกแบบ และสร้างเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม ตามมาตรฐาน IEC-1000-4-5 [2]

1.2 ที่มาของปัญหา

ปกติเราจะไม่ทราบว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าของเรา ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จแบบใด โดยทั่วไปอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ จะแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ แบบอิมพีแดนซ์สูง และแบบอิมพีแดนซ์ต่ำ เพราะฉะนั้นเครื่องทดสอบของเราจะต้องสามารถ ทดสอบได้ทั้ง 2 กรณี คือต้องสามารถให้เสิร์จแรงดันรูปคลื่นมาตรฐานในกรณีที่อุปกรณ์ป้องกันเป็นแบบอิมพีแดนซ์สูง และสามารถให้เสิร์จกระแสรูปคลื่นมาตรฐานในกรณีที่อุปกรณ์ป้องกันเป็นแบบอิมพีแดนซ์ต่ำ เครื่องกำเนิดชนิดนี้ก็คือ เครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม นั่นเอง

เพื่อให้การทดสอบใกล้เคียงกับการใช้งานจริง การทดสอบควรจะทดสอบในขณะที่อุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังทำงานอยู่ด้วย เพราะฉะนั้นเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม จะต้องมีส่วนที่ขั้วขาออกไม่ต่อกับสายดินเพื่อจะได้ต่อร่วมกับแหล่งจ่ายไฟปกติได้ และต้องมีอุปกรณ์ป้องกันไม่ให้เล็ริจเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟ และป้องกันไม่ให้แรงดันที่ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟเข้าสู่เครื่องกำเนิด อุปกรณ์ป้องกันนี้ก็คือ *วงจรถัดดับลิง และวงจรถัดลิง (Decoupling and Coupling Network)* นั่นเอง

ในการออกแบบ และสร้างเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม และวงจรรองในโครงการนี้จะใช้มาตรฐาน IEC เป็นเกณฑ์

1.3 ผลการศึกษาในอดีต

ในการสร้างเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม ทางห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงคณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สามารถสร้างได้แล้วที่ 6kV, 3kA [3] แต่เครื่องนี้ไม่สามารถทดสอบได้ในขณะที่อุปกรณ์ทดสอบ กำลังทำงานอยู่ได้เพราะขั้วหนึ่งของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมนี้ต้องต่อลงดิน และไม่มีอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเล็ริจจากเครื่องกำเนิดของเราเข้าสู่ระบบ และป้องกันไม่ให้แรงดันจากระบบเข้าสู่เครื่องกำเนิด

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

โครงการนี้จะทำการออกแบบ และสร้างเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมขนาด 6kV, 3kA ซึ่งจะให้รูปคลื่นแรงดันมาตรฐาน 1.2/50 μ s, รูปคลื่นกระแสมาตรฐาน 8/20 μ s และมีอิมพีแดนซ์ขาออกประมาณ 2 โอห์ม โดยเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมนี้จะต้องมีขั้วขาออกที่ไม่ต้องต่อลงดิน

ทำการออกแบบและสร้างวงจรถัดลิงเล็ริจเข้าสู่ระบบไฟฟ้า และวงจรถัดลิงแรงดันที่ความถี่ระบบเข้าสู่เครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม

โดยจะออกแบบตามมาตรฐาน IEC-1000-4-5 [2] และทำการทดสอบใช้งานจริงกับอุปกรณ์ไฟฟ้า

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษามาตรฐานในการทดสอบ
- 2) ศึกษาและออกแบบเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม
- 3) ประกอบสร้างเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม
- 4) ทดสอบเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม

- 5) ศึกษาและออกแบบวงจรป้องกันเล็รจเข้าสู่ระบบไฟฟ้า และป้องกันแรงดันที่ความถี่ระบบเข้าสู่เครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม
- 6) ประกอบสร้างวงจรป้องกันเล็รจเข้าสู่ระบบไฟฟ้า และป้องกันแรงดันที่ความถี่ระบบเข้าสู่เครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม
- 7) ทดสอบกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในการใช้งานจริง
- 8) วิเคราะห์และสรุปผล

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ชุดเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมนี้ เป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาวิจัย และทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ได้ตามมาตรฐาน
- 2) เป็นเครื่องต้นแบบเพื่อการพัฒนาเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมนี้ต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

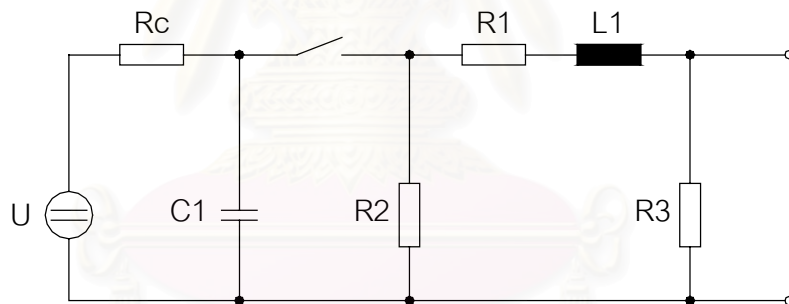
บทที่ 2

มาตรฐานในการทดสอบ IEC 1000-4-5

ในการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 1000-4-5 นั้นแบ่งการทดสอบเป็นหลายระดับ หลายชนิดในที่นี้เราจะสนใจเพียงการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม และทดสอบแบบอุปกรณ์ทดสอบต่อกับแหล่งจ่ายไฟ

2.1 เครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม (1.2/50 μ s, 8/20 μ s)

วงจรอย่างง่ายของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมแสดงตามรูปที่ 2-1 ค่าของ R, L และ C นั้นจะหาจากการ Simulate ให้ได้รูปคลื่นแรงดันขณะเปิดวงจรเป็น 1.2/50 μ s และรูปคลื่นกระแสขณะลัดวงจรเป็น 8/20 μ s โดยที่เครื่องกำเนิดนี้จะมีอิมพีแดนซ์ขาออกที่ 2 โอห์ม



รูปที่ 2-1 : วงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม

การหาค่าอิมพีแดนซ์สามารถหาได้จากอัตราส่วนของค่าสูงสุดของแรงดันกับค่าสูงสุดของกระแส โดยปกติรูปคลื่นแรงดันและกระแสจะขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่นำมาทดสอบด้วย ค่าอิมพีแดนซ์นี้อาจจะเปลี่ยนไปเมื่อทดสอบกับอุปกรณ์ทดสอบ

2.1.1 ลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม

ตามมาตรฐาน IEC 1000-4-5 นั้นเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

แรงดันขณะเปิดวงจร	
ขนาดแรงดัน	0.5 kV – 4.0 kV
ลักษณะรูปคลื่น	1.2/50 μ s (ดู รูปที่ 4)
ความคลาดเคลื่อน	± 10 %
กระแสขณะลัดวงจร	
ขนาดกระแส	0.25 kA – 2.0 kA
ลักษณะรูปคลื่น	8/20 μ s (ดู รูปที่ 5)
ความคลาดเคลื่อน	± 10 %
ขั้ว	บวก/ลบ
มุมเฟส	$0^\circ - 360^\circ$ ของแรงดันแหล่งจ่ายไฟ
อัตราการทดสอบ	อย่างต่ำ 1 ครั้งต่ออนาที
และเครื่องกำเนิดควรวจะมีขั้วขาออกไม่ต่อกับดิน	

2.1.2 การทดสอบเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม

ก่อนการใช้งาน เราต้องมีการทดสอบเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมก่อน เราจะทดสอบโดยต่อขั้วขาออกของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมกับเครื่องมือวัดที่มีแบนด์วิดท์ที่เพียงพอ และสามารถวัดระดับแรงดันที่ทดสอบได้ เครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมนี้ควรวัดแรงดันขณะเปิดวงจรโดยมีโหลดมากกว่าหรือเท่ากับ $10 \text{ k}\Omega$ โดยได้รูปคลื่นตามมาตรฐาน และวัดกระแสลัดวงจรโดยมีโหลดน้อยกว่าหรือเท่ากับ $0.1 \text{ }\Omega$ ได้รูปคลื่นตามมาตรฐาน ที่ระดับแรงดันชาร์จเท่ากัน จะมีค่าอิมพีแดนซ์ประมาณ $2 \text{ }\Omega$

ตามมาตรฐาน IEC 1000-4-5 นั้นเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมนี้จะมีอิมพัลส์แรงดันสูงสุดที่ 4.0 kV และอิมพัลส์กระแสสูงสุด 2.0 kA เท่านั้น แต่สำหรับโครงการนี้เราจะทดสอบที่แรงดัน 6.0 kV และ 3.0 kA

2.2 วงจรคัปปลิงและตีคัปปลิง

ตามมาตรฐาน IEC 1000-4-5 ได้กำหนดค่าของวงจรคัปปลิง และตีคัปปลิง สำหรับวงจรคัปปลิงนั้นจะเป็นคาปาซิเตอร์โดยค่าคาปาซิเตอร์นั้นจะขึ้นกับรูปแบบการทดสอบด้วย ซึ่งในการทดสอบแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีนอร์มัล (Normal Mode) และกรณีคอมมัล (Common Mode) (ดูรูปที่ 2-2 และ 2-3)

คัปลิงคาปาซิเตอร์	9 μF หรือ 18 μF (ดู รูปที่ 2-2, 2-3)
ค่าความเหนี่ยวนำดีคัปลิง	1.5 mH

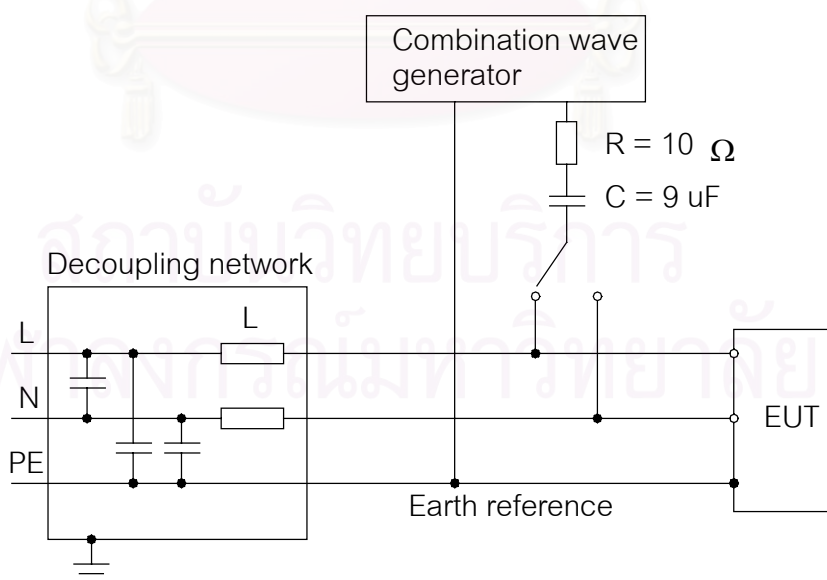
โดยค่าแรงดันเสิร์จจะสามารถผ่านเข้าไปสู่แหล่งจ่ายได้ไม่เกิน 15% ของค่าสูงสุดของแรงดันทดสอบขณะไม่ได้ต่ออุปกรณ์ทดสอบและแหล่งจ่ายไฟ หรือไม่เกินสองเท่าของค่าสูงสุดของแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ โดยให้ถือค่าที่สูงกว่าเป็นเกณฑ์ (ในกรณีทดสอบอิมพัลส์ 6 kV ที่ 220 Vac จะต้องไม่เกิน 900 V แต่ถ้าทดสอบที่ 3 kV จะต้องไม่เกิน 620 V)

2.3 วิธีการทดสอบอุปกรณ์ทดสอบ

การทดสอบตามมาตรฐาน IEC นั้นแบ่งเป็นหลายแบบในกรณี ในโครงการนี้จะสนใจเพียงการทดสอบแบบป้อนเสิร์จเข้าระหว่างแหล่งจ่ายกับอุปกรณ์ทดสอบ (Tests applied to EUT power supply) ซึ่งได้แบ่งเป็น 2 กรณีคือ กรณีคอมมมัล (Common Mode/ Line to Earth) และ กรณีนอร์มัล (Normal Mode/ Line to Line)

2.3.1 กรณีคอมมมัล (Common Mode)

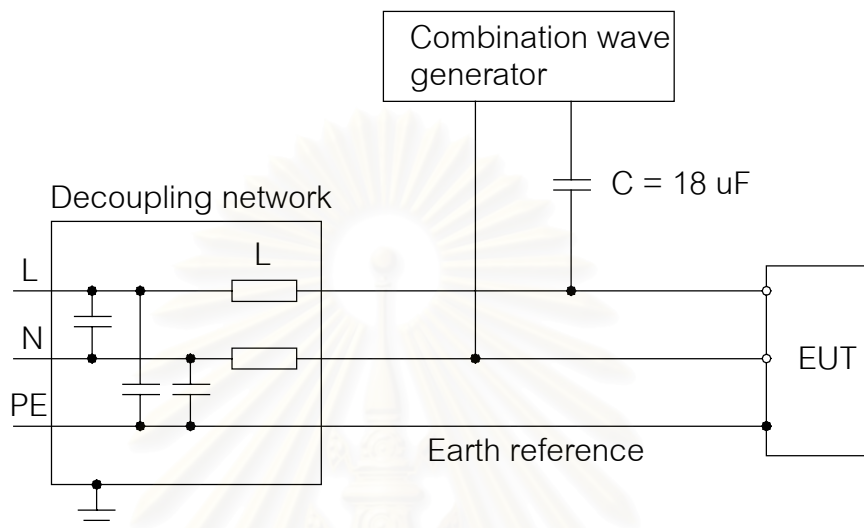
ในกรณีคอมมมัลจะทดสอบอิมพัลส์ระหว่างสายไฟกับสายดิน และสายนิวทรัลกับสายดิน ในกรณีนี้อิมพีแดนซ์จะเป็น 12 Ω เนื่องจากมีตัวต้านทานขนาด 10 Ω ต่ออนุกรมอยู่



รูปที่ 2-2 : แสดงการทดสอบในกรณีคอมมมัล

2.3.2 กรณีเนอร์มัล (Normal Mode)

ในกรณีเนอร์มัลนี้จะทดสอบระหว่างสายไฟกับสายนิวทรัล จะสังเกตว่าขั้วขาออกของเครื่องกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เคลื่อนนี้จะไม่ชี้วัดต่อลงดินเลย



รูปที่ 2-3 : แสดงการทดสอบในกรณีเนอร์มัล

ในการทดสอบนั้นสายไฟระหว่างอุปกรณ์ทดสอบและ วงจรคัปปลิง วงจรดีคัปปลิงไม่ควรยาวเกิน 2 เมตร

2.4 ข้อกำหนดสภาวะการทดสอบ

ในการทดสอบนั้นแต่ละสถานที่แต่ละเวลาอาจจะมีค่าสภาวะอากาศ หรือสิ่งแวดล้อมไม่เหมือนกันซึ่งอาจจะมีผลต่อการทดสอบได้ดังนั้นจึงมีการกำหนดมาตรฐานของสภาวะอากาศและสภาวะแวดล้อม คือ

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

และ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนไม่ควรมีผลต่อการทดสอบ

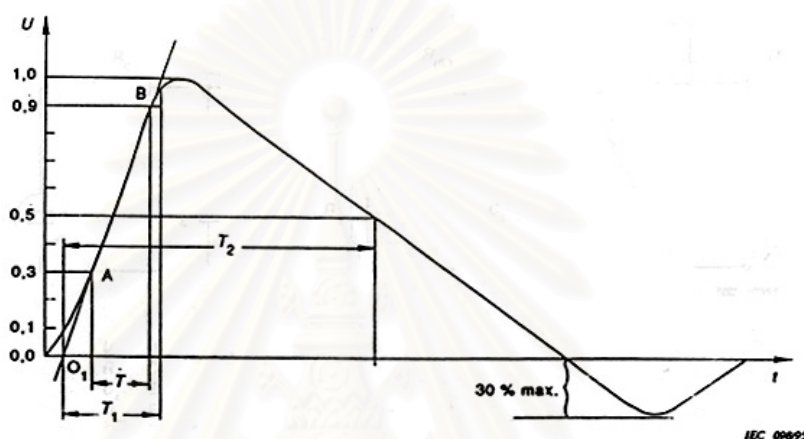
2.5 รูปคลื่นมาตรฐาน

เครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมจะต้องสร้างอิมพัลส์มาตรฐานคือ ขณะเปิดวงจรจะต้องสร้างแรงดันรูปคลื่น 1.2/50 μs โดย

หน้าคลื่น 1.2 $\mu\text{s} \pm 0.36 \mu\text{s}$,

หลังคลื่น 50 $\mu\text{s} \pm 10 \mu\text{s}$

มีเวลาหน้าคลื่นแรงดัน คือ $1.67 \times (t_{90} - t_{30})$ โดย t_{90} คือเวลาที่แรงดันเพิ่มขึ้น 90% ของค่ายอด และ t_{30} คือเวลาที่แรงดันเพิ่มขึ้น 30% ของค่ายอด ดังรูปที่ 2-4



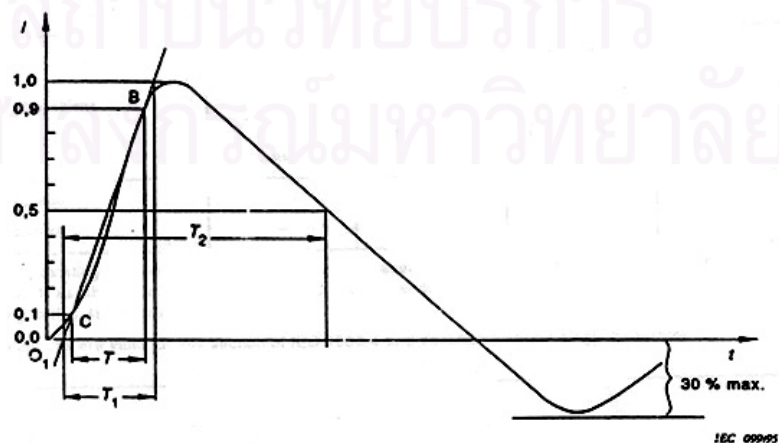
รูปที่ 2-4 : รูปคลื่นแรงดันมาตรฐานขณะเปิดวงจร

และขณะลัดวงจรจะต้องสร้างอิมพัลส์กระแส รูปคลื่น 8/20 μs โดย

หน้าคลื่น 8 $\mu\text{s} \pm 1.6 \mu\text{s}$,

หลังคลื่น 20 $\mu\text{s} \pm 4 \mu\text{s}$

มีเวลาหน้าคลื่นกระแส คือ $1.25 \times (t_{90} - t_{10})$ โดย t_{90} คือเวลาที่แรงดันเพิ่มขึ้น 90% ของค่ายอด และ t_{10} คือเวลาที่แรงดันเพิ่มขึ้น 10% ของค่ายอด ดังรูปที่ 5



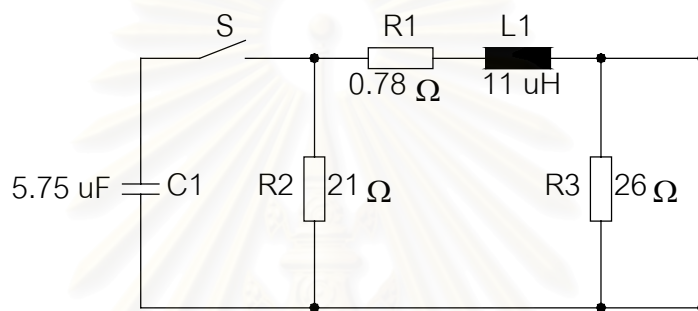
รูปที่ 2-5 : คลื่นกระแสมาตรฐานขณะลัดวงจร

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้าง

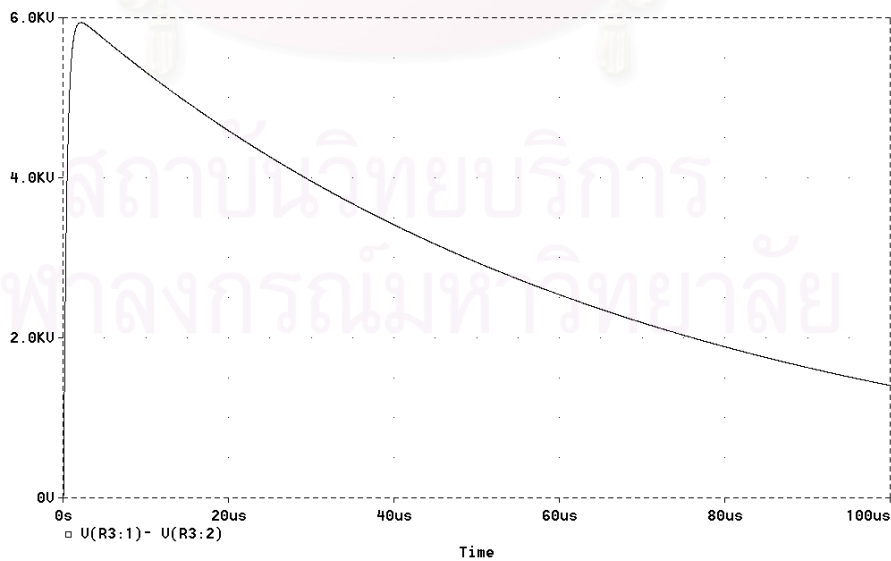
3.1 การออกแบบวงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม

จากลักษณะวงจรที่ได้ในบทที่ 2 เราจะหาค่า R, L, C ได้จากการ Simulate โดยใช้โปรแกรม ไมโครซิม (MicroSim) ซึ่งจะได้ค่าต่างๆ ของวงจрдังรูปที่ 3-1

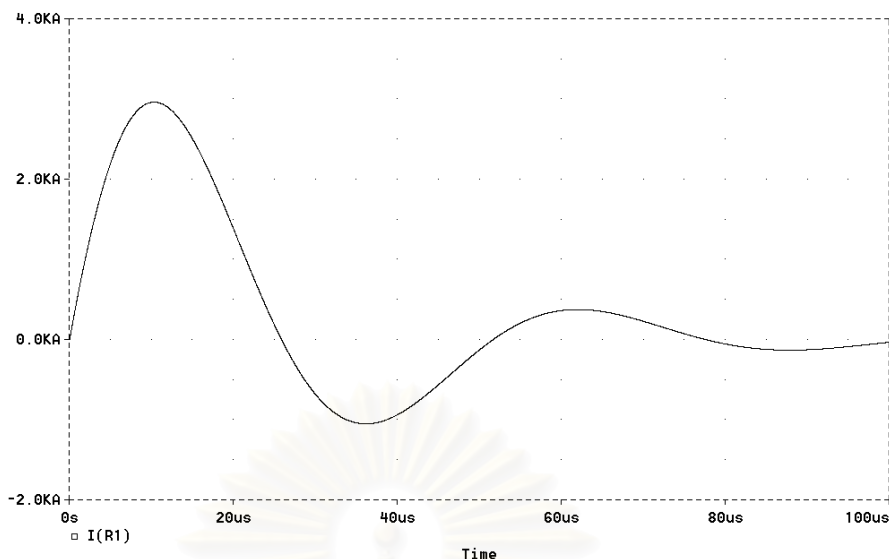


รูปที่ 3-1 : วงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมที่ได้จากการ Simulate

วงจรนี้เมื่อซาร์จประจุให้ตัวเก็บประจุที่ 6.3 kV และทำการสับสวิตช์ S จะได้รูปคลื่นแรงดัน 1.2/50 μ s ที่ 6 kV ขณะเปิดวงจร และจะได้รูปคลื่นกระแส 8/20 μ s ที่ 3 kA ขณะลัดวงจร



รูปที่ 3-2 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการ Simulate



รูปที่ 3-3 : แสดงรูปคลื่นกระแสที่ได้จากการ Simulate

3.1.1 การออกแบบตัวต้านทาน

ในการออกแบบตัวต้านทานนั้น เมื่อเรารู้ค่าความต้านทานที่เราต้องการแล้ว เราต้องรู้ค่าพลังงานที่ตัวต้านทานนั้นจะได้รับ สำหรับค่าพลังงานที่ตัวต้านทานแต่ละตัวได้รับจากอิมพัลส์นั้น เราสามารถหาได้จากการ Simulate ซึ่งผลแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 : ค่าพลังงานที่เกิดจากอิมพัลส์

	กรณีลัดวงจร (J)	กรณีเปิดวงจร (J)
R1	90	2
R2	15	60
R3	0	45

และเนื่องจากในการทดสอบนั้นจะต้องทดสอบโดยอุปกรณ์ทดสอบต่อกับแหล่งจ่ายด้วย ดังนั้นจึงมีแรงดันที่ความถี่ระบบเข้ามาที่วงจรด้วย ค่ากำลังงานจากระบบที่แรงดัน 220 Vac แสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 : ค่ากำลังงานที่เกิดจากระบบ

	Watt
R1	< 1
R2	9.5
R3	8.5

ในการออกแบบตัวต้านทานนี้ ในครั้งแรกได้ทดลองใช้ตัวต้านทานชนิด เมทัลฟิล์ม (Metal Film) ปรากฏว่าไม่สามารถใช้ได้เมื่อทดลองที่แรงดันประมาณ 6 kV ตัวต้านทานจะเกิดการเสียหายค่าความต้านทานจะผิดเพี้ยนไป หลังจากนั้นจึงได้ทดลองใช้ตัวต้านทานชนิดกระเบื้อง (Ceramic Resistor) ซึ่งสามารถใช้ได้และได้ผลเป็นที่น่าพอใจ โดยในการใช้ตัวต้านทานกระเบื้องนี้เราต้องระวังค่าความเหนี่ยวนำด้วย โดยปกติค่าความเหนี่ยวนำในตัวต้านทานกระเบื้องนี้จะมีค่าประมาณเป็นไมโครเฮนรี่ ในการใช้งานจะนำตัวต้านทานกระเบื้องนี้มาต่อขนานกัน เพื่อลดค่าความเหนี่ยวนำ

เนื่องจากค่า R1 มีค่าน้อยมาก (ประมาณ 0.78Ω) เราต้องนำค่าความต้านทานที่เกิดจากการพันตัวเหนี่ยวนำมาคิดด้วย ตัวเหนี่ยวนำที่พันมีค่าความต้านทานประมาณ 0.1Ω ดังนั้นค่า R1 เราจะออกแบบที่ประมาณ 0.68Ω



รูปที่ 3-4 : แสดงวงจรหลักของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม

สำหรับ R2 นั้นค่าความเหนี่ยวนำจะมีผลกระทบต่อรูปคลื่นอิมพัลส์น้อยมาก และในการทดลองนี้ เราต้องการลดความชันของกระแส (di/dt) ด้วยเพื่อถ้าเราต้องการใช้ SCR เป็นสวิตช์ เพราะ SCR นั้นมีข้อจำกัดที่ค่าความชันของกระแส ดังนั้น R2 นี้จะออกแบบให้มีค่าความเหนี่ยวนำสูงประมาณ $60 \mu\text{H}$

R1 ออกแบบโดยเลือกตัวต้านทานกระเบื้องขนาด 0.1Ω 10 W ขนาดกัน 4 ตัว รวมกับ 1Ω 5 W ขนาดกัน 3 ตัว 2 ชุด จะได้ $R1 = \frac{0.1}{4} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = 0.69 \Omega$

R2 ออกแบบโดยเลือกตัวต้านทานขนาด 3Ω 10 W จำนวน 7 ตัว ต่ออนุกรมกันจะได้ $R2 = 3 \times 7 = 21 \Omega$, $10 \times 7 = 70 W$

R3 ออกแบบโดยเลือกตัวต้านทานขนาด 100Ω 10 W ขนาดกัน 4 ตัว และ 5Ω 5 W ขนาดกันอีก 4 ตัว จะได้ $R3 = 100/4 + 5/4 = 26.25 \Omega$

3.1.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำนี้จะต้องทนกระแส $8/20 \mu s$ ที่ 3 kA และทนแรงดันตกคร่อมขนาด 6 kV ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำนี้จะออกแบบเป็นแกนอากาศ โดยใช้ขดลวดทองแดงซึ่งต้องทนอิมพัลส์กระแสขนาด 3 kA ได้ ดังนั้นเลือกขดลวดทองแดงขนาด 24 SWG (ϕ 0.022") พันบนท่อ PVC ขนาด $3/4$ นิ้ว คำนวณจากสูตร

$$L = \frac{r^2 N^2}{9r + 10l} \quad \text{สมการที่ 1 [5]}$$

เมื่อ r เป็นรัศมีวงนอกของท่อ PVC มีหน่วยเป็น นิ้ว N เป็นจำนวนรอบ และ l เป็นความยาวของท่อ PVC ในส่วนที่มีขดลวดพันอยู่ โดยค่า L ที่ได้มีหน่วยเป็น ไมโครเฮนรี่

จากสมการที่ 1 ค่า L ออกแบบที่ $10 \mu H$ (เพราะตัวต้านทาน R1 มีค่าความเหนี่ยวนำอยู่เล็กน้อยประมาณ $1 \mu H$) ค่า r คือรัศมีวงนอกของท่อขนาด $3/4$ " คือ 0.5" และ l จะขึ้นกับจำนวนรอบและเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด จะได้ $l = 0.022N$ แทนค่าจะได้ค่า $N = 18.5$ รอบ พันที่ 19 รอบ

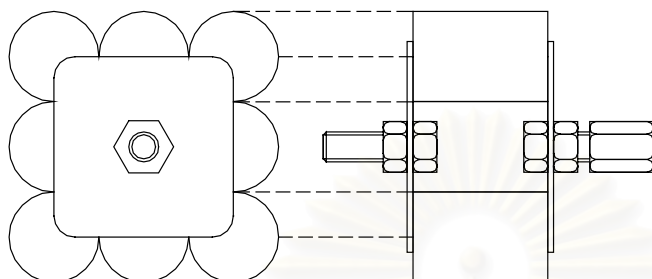
3.1.3 การออกแบบตัวเก็บประจุ

ขนาดของตัวเก็บประจุนี้ตามที่ได้จากการ Simulate คือ $5.75 \mu F$ ตัวเก็บประจุนี้ต้องชาร์จประจุที่ 6.3 kV เป็นอย่างน้อยและต้องสามารถปล่อยกระแส $8/20 \mu s$ ที่ 3 kA ได้

ตัวเก็บประจุที่ใช้นี้ควรจะเป็นชนิด โพลีโพรพิลีน (Polypropylene) ซึ่งเหมาะกับการใช้งานในลักษณะเป็นพัลส์ จากค่าของตัวเก็บประจุที่สามารถหาได้ เราเลือกตัวเก็บประจุขนาด $9.1 \mu F$ 630 V ต่อขนาดกันชุดละ 8 ตัว และนำมาต่ออนุกรมกัน 12 ชุด ดังนั้นขนาดของตัวเก็บประจุคือ $9.1 \times 8 / 12 = 6.07 \mu F$ พิกัดแรงดัน คือ $630 \times 12 = 7,560 V$

ในการนำมาประกอบใน 1 ชุด เราจะนำตัวเก็บประจุมารับกับแผ่นปรินท์ โดยพยายามให้กระแสในแต่ละตัวกระจายกระจายเท่าๆ กันจึงให้ขั้วต่ออยู่ตรงกลาง ดังรูปที่ 3-5 ส่วนการต่อเชื่อม

ระหว่างตัวเก็บประจุแต่ละชุดนั้นเราจะใช้น็อตยึด โดยมีน็อตตัวเมียขนาดยาวในการต่อเชื่อมอนุกรมในแต่ละชุด



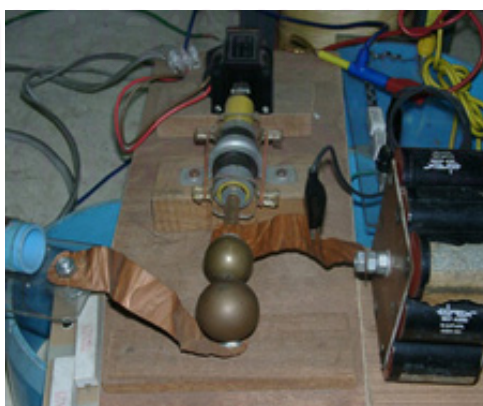
รูปที่ 3-5 : แสดงตัวเก็บประจุที่ออกแบบและประกอบเสร็จแล้ว

ในการประกอบรวมช่วงแรกได้พยายามใช้ SCR ในการสวิตช์ ซึ่งยังไม่ประสบความสำเร็จ รายละเอียดเกี่ยวกับการใช้งาน SCR สามารถดูได้ในบทที่ 5

ในการทดสอบนี้จึงใช้โซลินอยด์ในการขับเคลื่อนให้สัมผัสกันเป็นการสวิตช์

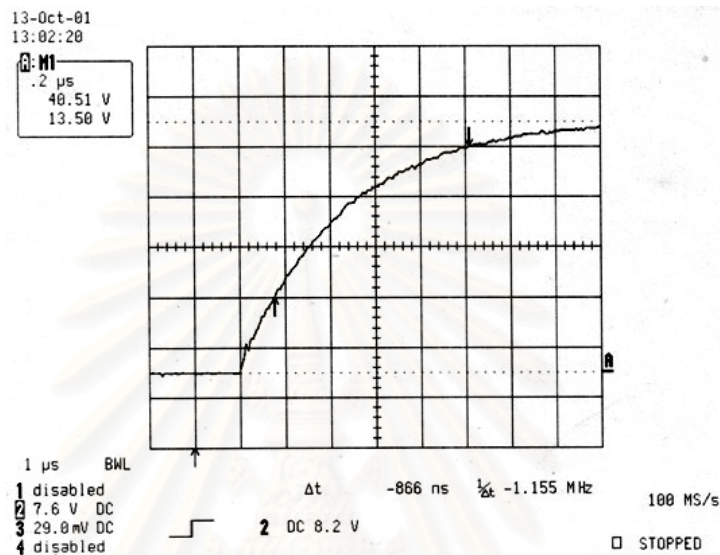
3.1.4 การทดสอบ

ในการทดสอบนี้เราใช้ขดลวดโซลินอยด์ขับเคลื่อนให้มาสัมผัสกันในการสวิตช์ และในส่วนของแหล่งจ่ายกระแสตรงนั้นต้องไม่มีขั้วออกต่อลงดินด้วย เพื่อให้สามารถทดสอบได้ตามมาตรฐาน แหล่งจ่ายกระแสตรงนี้ออกแบบ โดยใช้หม้อแปลงขดลวดแยก (Isolated Transformer) ขนาด 220V / 7.5 kV ในการแยกแหล่งจ่าย

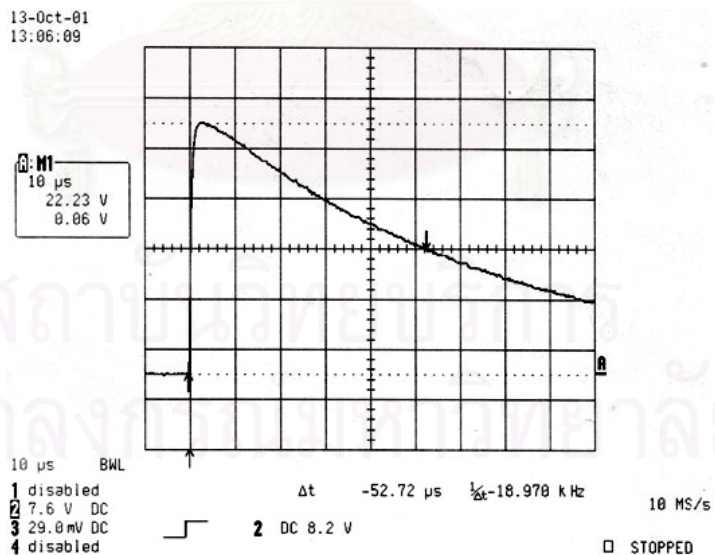


รูปที่ 3-6 : แสดงโซลินอยด์ในการสวิตช์

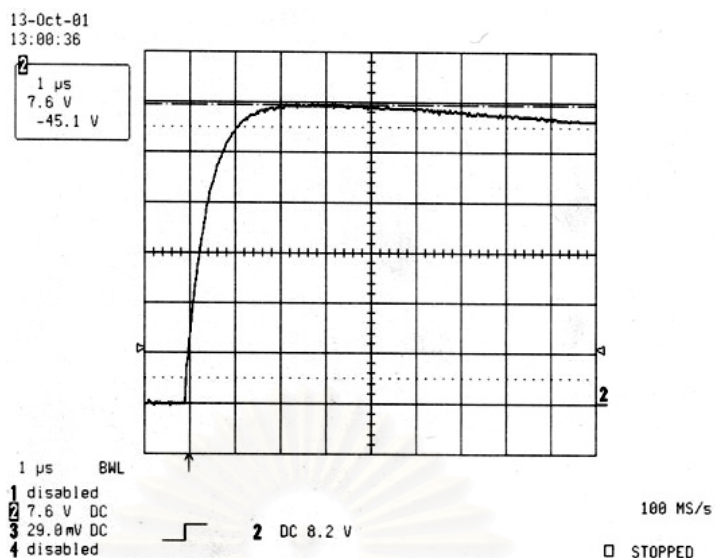
ส่วนการวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์นั้นไม่สามารถใช้ C-Divider มาตรฐานที่มีในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงได้ เนื่องจากวงจรของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมนั้นจะมีค่าความเหนี่ยวนำอยู่ C-Divider นั้นมีค่าสูงเกินไปทำให้เกิดการแกว่งของหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ จึงต้องออกแบบ C-Divider ใหม่ให้มีค่าความจุไม่สูงมากนัก C-Divider เมื่อออกแบบและสร้างนี้นำไปทดสอบปรับเทียบได้อัตราส่วน 1:139



รูปที่ 3-7 : แสดงหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่วัดได้ขณะเปิดวงจร



รูปที่ 3-8 : แสดงหลังคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่วัดได้ขณะเปิดวงจร



รูปที่ 3-9 : แสดงค่าสูงสุดของแรงดันอิมพัลส์ที่วัดได้ขณะเปิดวงจร

ในการทดสอบ เพื่อให้ได้แรงดันอิมพัลส์ขาออกขณะเปิดวงจรเป็น 6 kV และ กระแสขณะลัดวงจรเป็น 3 kA จะต้องชาร์จตัวเก็บประจุที่แรงดันประมาณ 6.8 kV เราสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังนี้

จากรูปที่ 3-7, 3-8 และ 3-9

$$V_{\text{peak}} = 45.1 \times 139 = 6,269 \text{ V}$$

$$T_1 = 0.866 \times 1.67 = 1.446 \text{ μs}$$

$$T_2 = 52.72 \text{ μs}$$

จากผลที่ได้แสดงว่ารูปคลื่นแรงดันที่ได้ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน

ในการทดสอบวัดรูปคลื่นแรงดันนี้ยังคงมีข้อจำกัดข้อหนึ่งต่อลงดินเพราะเครื่องวัดยังจำเป็นต้องต่อลงดินส่วนในการวัดโดยที่ขั้วขาออกไม่ต่อลงดินจะทดสอบได้ที่แรงดันไม่สูงมากนัก เพราะเครื่องวัดที่ใช้ วัดในกรณีนี้คือ Differential Probe นั้นไม่สามารถวัดที่แรงดันสูงได้ การทดสอบนั้นจะแสดงให้ดูต่อไป

ในการวัดกระแสนั้นเราใช้อุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ (Current Waveform Transducer) ซึ่งมีความไว 0.05 mV/A หรือเท่ากับ 20 kA/V

จากรูปที่ 3-10, 3-11 และ 3-12

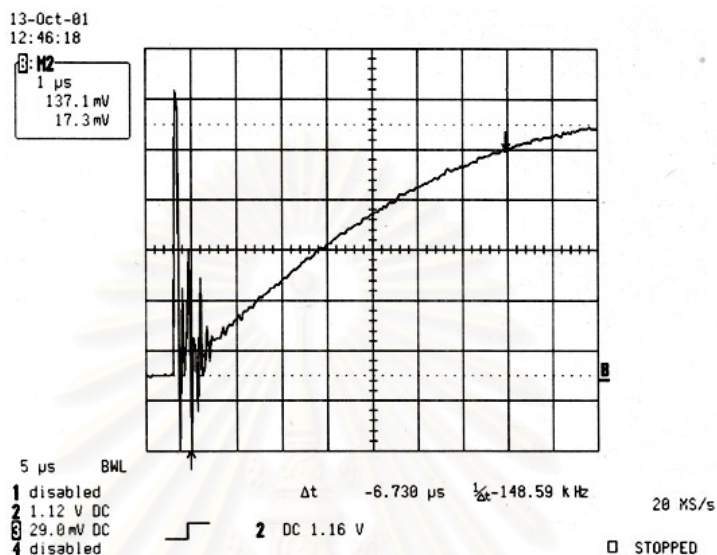
$$I_{\text{peak}} = 151.8\text{m} \times 20\text{k} = 3,036 \text{ A}$$

$$T_1 = 6.73 \times 1.25 = 8.41 \text{ μs}$$

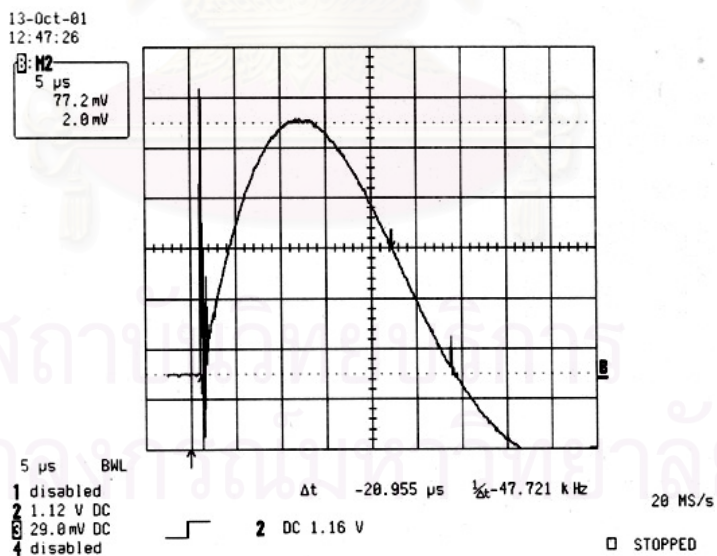
$$T_2 = 20.96 \text{ μs}$$

จากผลการคำนวณที่ได้แสดงว่ารูปคลื่นกระแสผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน แต่จะสังเกตว่ารูปคลื่นอิมพัลส์กระแสที่ได้นั้นจะเกิดการแกว่งที่หน้าคลื่น ซึ่งในที่นี้เกิดจากเครื่องมือวัดนั่นเอง

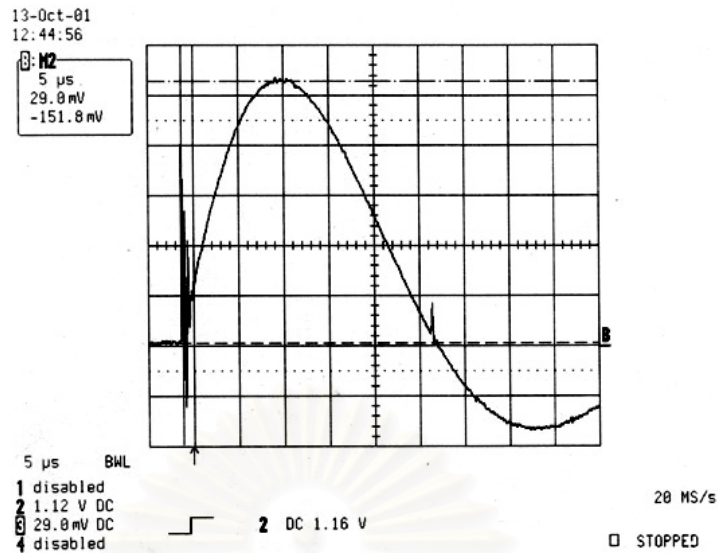
$$\text{และเราสามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ได้ คือ } Z = \frac{6,269}{3,036} = 2.06 \Omega$$



รูปที่ 3-10 : แสดงหน้าคลื่นกระแสอิมพัลส์ขณะลัดวงจร



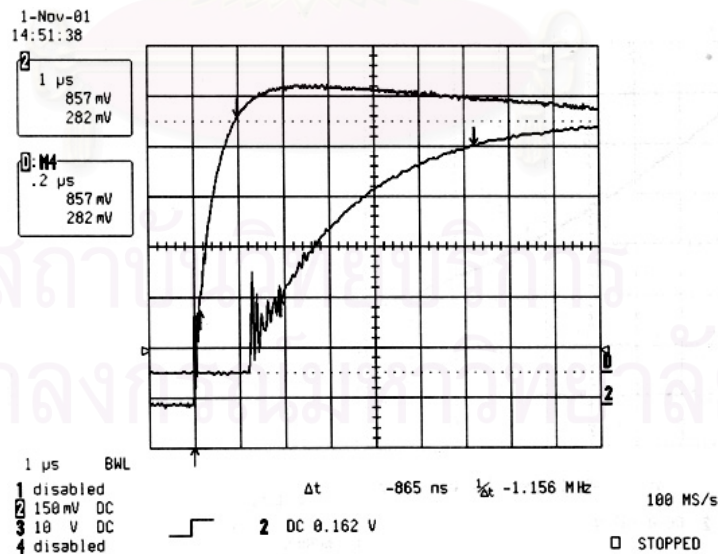
รูปที่ 3-11 : แสดงหลังคลื่นกระแสอิมพัลส์ขณะลัดวงจร



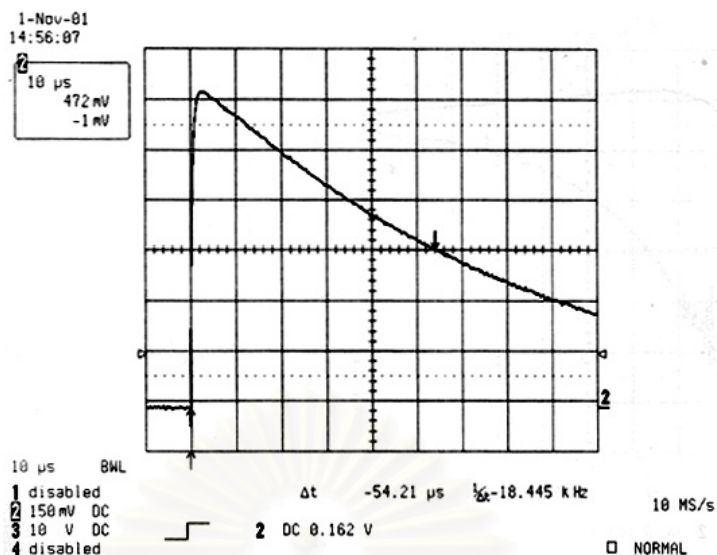
รูปที่ 3-12 : แสดงรูปคลื่นกระแสที่วัดได้ขณะลัดวงจร

3.1.5 การทดสอบโดยใช้ Differential Probe

Differential Probe ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงนั้นสามารถวัดแรงดันได้สูงสุด 1.3 kV โดยที่ต่างมีความต่างศักย์เทียบกับดินไม่เกิน 1.0 kV เท่านั้น ในการทดสอบนี้จึงทำการทดสอบที่ 500 V เท่านั้น โดยที่ Differential Probe นี้มีอัตราส่วน 500:1 สำหรับการทดสอบเราจะทดสอบในกรณีขั้วออกของเครื่องกำเนิดไม่ต่อลงดิน



รูปที่ 3-13 : แสดงหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่วัดโดย Differential Probe



รูปที่ 3-14 : แสดงหลังคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่วัดโดย Differential Probe

จากรูปที่ 3-13 และ 3-14

$$\begin{aligned}
 V_{\text{peak}} &= 944\text{m} \times 500 = 472 \text{ V} \\
 T_1 &= 0.865 \times 1.67 = 1.44 \text{ } \mu\text{s} \\
 T_2 &= 54.21 \text{ } \mu\text{s}
 \end{aligned}$$

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่ารูปคลื่นที่ได้ใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้ C-Divider ในการวัด แต่หน้าคลื่นแรงดันนั้นจะเกิดการแกว่งเล็กน้อย เมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้ C-Divider

3.2 การออกแบบวงจรคัปปลิงและดีคัปปลิง

3.2.1 การออกแบบวงจรคัปปลิง

วงจรคัปปลิงนั้นจะแบ่งเป็น 2 กรณี คือในกรณีนอร์มัล และในกรณีคอมมัล ในกรณีนอร์มัลนั้นจะใช้ตัวเก็บประจุขนาด 18 μF เป็นวงจรคัปปลิง ส่วนในกรณีคอมมัลนั้นจะใช้ตัวเก็บประจุขนาด 9 μF และตัวต้านทานขนาด 10 Ω ต่ออนุกรมกัน เพราะฉะนั้นในการออกแบบวงจรคัปปลิงเราจะออกแบบโดยแบ่งเป็นตัวเก็บประจุ 9 μF 2 ชุด และตัวต้านทาน 10 Ω 1 ชุด เราจะหาค่าพิกัดได้จาก การ Simulate ดังตารางที่ 3-3

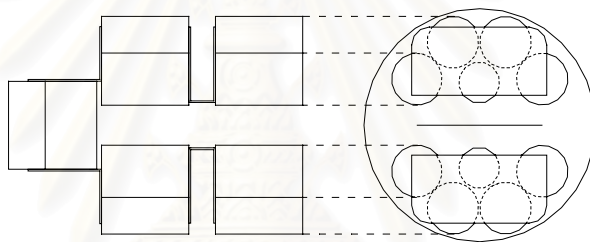
ตัวเก็บประจุนี้เราเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพรพีลีน ซึ่งจากขนาดที่สามารถหาได้เราออกแบบโดยเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 10 μF 630 V 4 ตัว ขนานกับตัวเก็บประจุขนาด 5.1 μF

630 V 1 ตัว จะได้ 1 ชุด และได้ค่าความจุรวมคือ 45.1 μF แรงดันพีกัด 630 V นำแต่ละชุดมาต่ออนุกรมกัน 5 ชุด ได้ค่าความจุรวม 9.02 μF พีกัดแรงดัน 3,150 V

ตารางที่ 3-3 : ค่าพีกัดของวงจรคัปปลิงในกรณีต่างๆ

	V (kV _{peak})	I (kA _{peak})
C = 18 μF	2	2.7
C = 9 μF	1.33	0.5
R = 10 Ω	5	0.5

ในการต่อแต่ละชุดนั้นจะบัดกรีตัวเก็บประจุกับแผ่นทองแดงชนิดบางแล้วพับแผ่นทองแดงขึ้นมาดังรูปที่ 3-15 เมื่อประกอบครบ 5 ชุด จัดตามรูปแล้วบรรจุใส่ในท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5" ตัวเก็บประจุที่สร้างเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 3-16



รูปที่ 3-15 : การต่อตัวเก็บประจุแต่ละชั้น

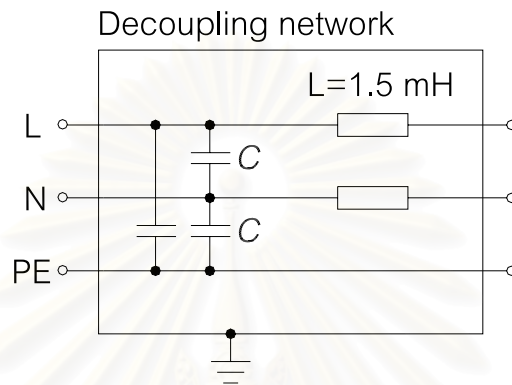


รูปที่ 3-16 : ตัวเก็บประจุคัปปลิงที่ประกอบเสร็จแล้ว

ส่วนตัวต้านทานนั้นใช้ตัวต้านทานชนิดกระเบื้องเลือกขนาด 50 Ω 10 W 5 ตัว มาต่อขนานกันเพื่อให้ความเหนียวนำลดลง

3.2.2 การออกแบบวงจรดีคัปลิง

วงจรดีคัปลิงนั้นเป็นวงจรกรองซึ่งมีตัวเหนี่ยวนำ L และ ตัวเก็บประจุ C ตัวเหนี่ยวนำนั้นตามมาตรฐานกำหนดขนาด คือ 1.5 mH ตัวเหนี่ยวนำนี้จะต้องทนกระแสลัดวงจรในเวลาช่วงสั้นๆ ได้ คือ ช่วงเวลาก่อนเซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานได้ แต่ตัวเหนี่ยวนำนี้ก็ทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสด้วย เมื่อเกิดการลัดวงจร จากการ Simulation กระแสลัดวงจรสูงสุดซึ่งมีโอกาสสูงถึง 466 A_{rms}

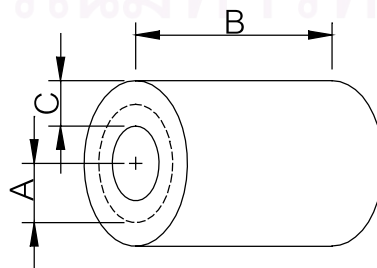


รูปที่ 3-17 : แสดงวงจรดีคัปลิง

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำนี้เลือกใช้สายทองแดงขนาด 16 SWG (ϕ 0.064") ออกแบบตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบการพันหลายชั้น โดยพันบนท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{3}{4}$ " (ϕ วงนอกเท่ากับ 1") สูตร คือ

$$L(\mu H) = \frac{0.8 \times (NA)^2}{6A + 9B + 10C} \quad \text{สมการที่ 2 [6]}$$

- โดย N = จำนวนรอบของขดลวด A = รัศมีเฉลี่ยของขดลวด (นิ้ว)
 B = ความยาวของขดลวดพันอยู่ (นิ้ว)
 C = ความหนาของขดลวด (นิ้ว)



รูปที่ 3-18 : แสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวเหนี่ยวนำ

ให้ n_1 แทนจำนวนขดลวดในแต่ละชั้น, n_2 แทนจำนวนชั้นของขดลวด, r แทนรัศมีของขดลวดวงในสุด และ ϕ แทนเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด (ในที่นี้ใช้ลวดทองแดง 16 SWG, $\phi = 0.064$ ") จะได้ว่า

$$N = n_1 n_2, A = r + C/2, B = n_1 \phi, \text{ และ } C = n_2 \phi$$

ออกแบบโดยเลือกความยาวของขดลวดเท่ากับ 3.94 นิ้ว (10 ซม.), $B = 3.94$ จะได้ $n_1 = 61.6$ รอบ และจะได้

$$n_2 = N/61.6, \text{ ดังนั้น } C = N/962.5 \text{ และ } A = 0.5 + N/1,925$$

แทนค่า $L = 1,500$ และ ค่า A, B, C แก่สมการจะได้ $N = 410$ รอบ จะได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ

$$N = 410 \text{ รอบ, } n_1 = 62 \text{ รอบ, } n_2 = 7 \text{ ชั้น}$$

เพราะฉะนั้นตัวเหนี่ยวนำเราจะใช้ลวดทองแดงขนาด 16 SWG พันบนท่อ PVC ขนาด $3/4$ " พันทั้งหมด 7 ชั้น โดยแต่ละชั้นพันประมาณ 62 รอบ

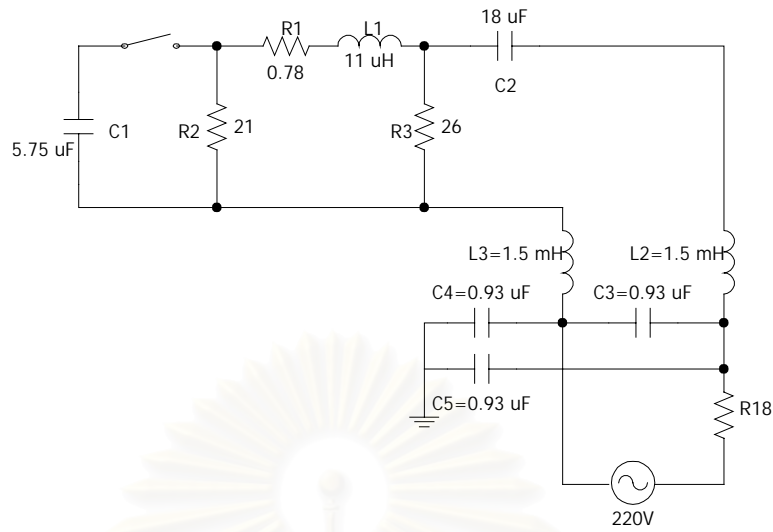
ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำนี้ เราสามารถดาวน์โหลดโปรแกรม Barry's Inductor Simulation เพื่อช่วยในการออกแบบได้ [6]

โดยข้อควรระวังในการพันตัวเหนี่ยวนำนี้คือ เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำนี้ต้องทนแรงดันเสิร์จได้ที่ 6 kV เราพันทั้งหมดประมาณ 410 รอบ ดังนั้นใน 1 รอบจะมีแรงดันประมาณ 14-15 V ใน 1 ชั้นจะมีแรงดันประมาณ 910 V เพราะฉะนั้นที่จุดปลายสุดของแต่ละชั้นจะมีแรงดันถึง 1,820 V ซึ่งฉนวนของลวดทองแดงอาจเกิดเบรคตัวนี้ได้ ในการการพันตัวเหนี่ยวนำนี้จึงควรมีการฉนวนระหว่างชั้นให้ดี



รูปที่ 3-19 : แสดงวงจรดีคัปลิงที่สร้างเสร็จแล้ว

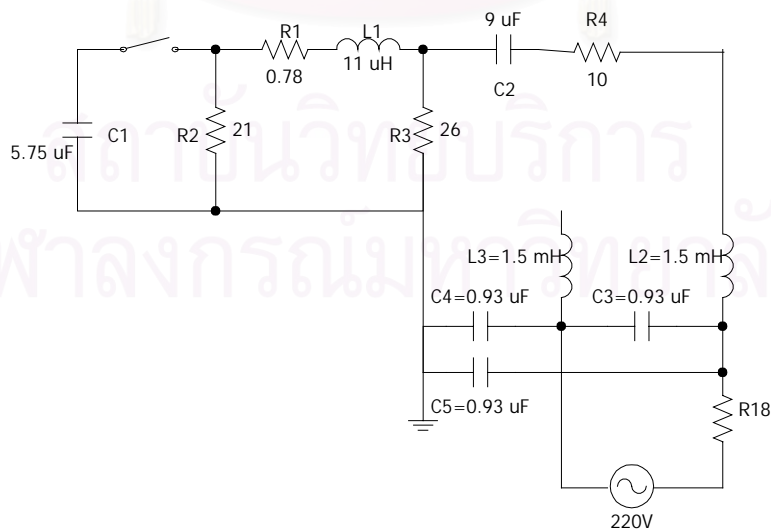
ในขั้นแรกเราจะออกแบบตัวเก็บประจุโดยการ Simulate ซึ่งวงจรในการ Simulate นั้นเราจะใส่แหล่งกำเนิดโดยพิจารณาในแต่ละกรณี คือในกรณีนอร์มัล และในกรณีคอมมัลด์



รูปที่ 3-20 : แสดงวงจรที่ Simulate ในกรณีอินอร์มัล

ในการ Simulate วงจรในรูปที่ 3-20 นี้ ค่าเสิร์จที่เข้าระบบจะขึ้นกับค่าความต้านทาน R18 ถ้าค่านี้สูงเสิร์จผ่านความเหนี่ยวนำเข้ามาจะสูง ถ้าค่าความต้านทานนี้เป็นศูนย์ค่าเสิร์จที่เข้ามาจะเป็นศูนย์เช่นกัน ในทำนองเดียวกันในกรณีคอมมัลนั้นการ Simulate ก็ได้ผลเช่นเดียวกัน ค่าเสิร์จที่เข้าระบบจะขึ้นกับ R18

และจากการ Simulate เราเลือกค่า C ที่ 0.93 μF ที่แรงดันสูงสุด คือ 3.28 kV ออกแบบโดยใช้ตัวเก็บประจุขนาด 5.6 μF 630 V ต่ออนุกรมกัน 6 ตัว จะได้ $C = 5.6/6 = 0.93 \mu\text{F}$ แรงดัน $V = 630 \times 6 = 3,780 \text{ V}$ วงจรดีคัปลิง



รูปที่ 3-21 : แสดงวงจรที่ Simulate ในกรณีคอมมัล

จากวงจรในรูปที่ 3-20 และ รูปที่ 3-21 เราจะทดลอง โดยใช้วาริแอก (Variac) แทนแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 220V โดยเราจะยังไม่ป้อนแรงดันขาเข้าให้กับวาริแอก และเราจะวัดค่าแรงดันเสิร์จที่เข้ามาทางด้านขาออกของวาริแอก และแรงดันเสิร์จที่ผ่านวาริแอกมาทางด้านขาเข้าของวาริแอก และวัดโดยปรับวาริแอกที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ

3.2.2.1 การทดสอบในกรณีคอมมัล

ตารางที่ 3-4 แสดงผลการทดลองในกรณีต่างๆ ทดสอบโดยชาร์จแรงดันกระแสตรง 1,970 V (วัดโดยใช้โวลต์จดีไวเดอร์ชนิดความต้านทาน ใช้ความต้านทานเมทัลฟิล์ม 4.7 M Ω 1% 1W 5ตัว ต่อเป็นตัวต้านทาน R1 และขนาด 10 k Ω 1% 1W ต่อเป็นตัวต้านทาน R2 และชาร์จที่แรงดันด้านแรงต่ำ 840mV) จะสังเกตว่าที่ขั้วขาเข้าของวาริแอกนั้น ค่าแรงดันเสิร์จที่วัดได้จะมีค่าสูงมากเนื่องจาก วาริแอกทำหน้าที่เหมือนหม้อแปลงขยายแรงดันด้านขาเข้า ซึ่งการอัตราการขยายนี้ก็จะขึ้นกับเปอร์เซ็นต์การปรับวาริแอกด้วย เพราะฉะนั้นในกรณีที่เราทดสอบโดยใช้วาริแอก และปรับแรงดันที่ค่าต่างๆ (เช่นในการทดสอบอุปกรณ์ที่มีพิกัดแรงดัน 110 V ใช้วาริแอกปรับที่ 50%) อาจจะทำให้แรงดันเสิร์จที่เข้าระบบมีค่าสูงขึ้นได้

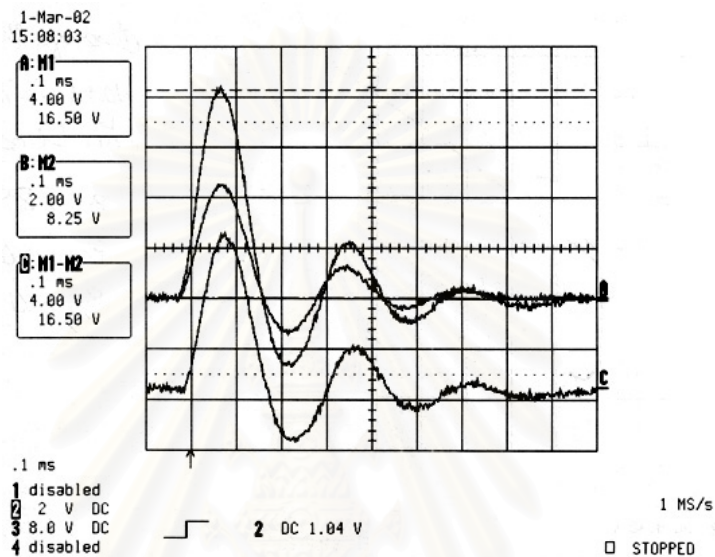
ตารางที่ 3-4 : แสดงผลการทดสอบในกรณีคอมมัล

เปอร์เซ็นต์วาริแอก	ขาออกวาริแอก			ขาเข้าวาริแอก		
	V _{LG}	V _{NG}	V _{LN}	V _{LG}	V _{NG}	V _{LN}
15%	1,208	634	564	4,390	642	3,753
30%	1,220	621	599	2,294	613	1,694
60%	1,225	617	603	1,532	603	930
100%	1,229	617	603	1,229	609	609
เปิดวงจร	1,234	626	608	-	-	-

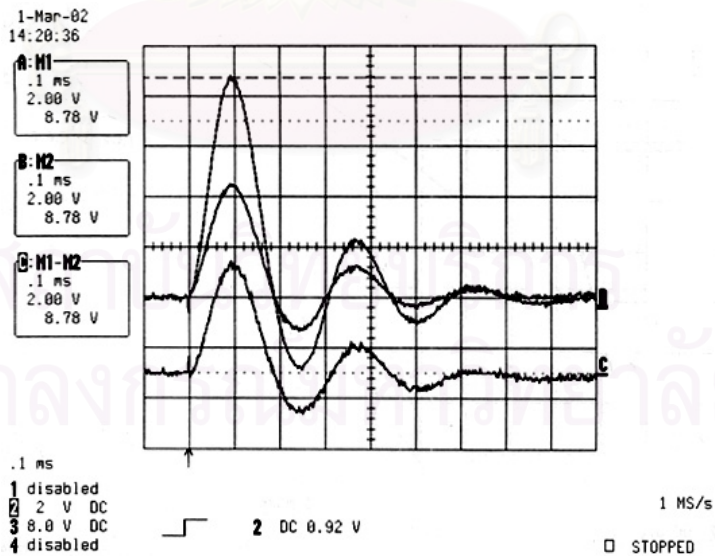
และจะสังเกตว่าแรงดันเสิร์จที่ขาออกของวาริแอกนั้นจะสูงขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ของวาริแอก เพราะวาริแอกจะมีค่าความเหนี่ยวนำสูง และแปรตามเปอร์เซ็นต์ในการปรับด้วย ถ้าเราปรับวาริแอกที่ 0% จะทำให้เสมือนลัดวงจร จะทำให้เสิร์จที่เข้าวาริแอกมีค่าน้อยมากเกือบศูนย์ และเมื่อปรับวาริแอกมากขึ้นแรงดันเสิร์จที่เข้าสู่ขาออกของวาริแอกจะสูงมากขึ้นตามไปด้วย แต่เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำของวาริแอกมีค่าสูงมาก (1 H ที่100%) ทำให้ในช่วงที่ค่าเปอร์เซ็นต์วาริแอกสูงๆ นั้นจะไม่เห็นผลชัดเจนนัก แต่จะตรงข้ามกับทางด้านขาออกของวาริแอก ซึ่งจะถูกลดขยายแรงดันให้สูงขึ้นในอัตราแปรผกผันกับเปอร์เซ็นต์ของวาริแอก ในขณะเดียวกันเนื่องจากวาริแอกนั้นมีขั้ว

นิวทอร่วมกันระหว่างขาเข้าและขาออกทำให้แรงดันเสิร์จระหว่างนิวทอรกับกราวด์ (V_{NG}) ที่ด้านขาเข้าและขาออกของวาริแอกมีค่าใกล้เคียงกัน

และผลการทดลองเราซาร์จแรงดันที่ 1,970 V จะได้แรงดันอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดขณะเปิดวงจรคือ 1,820 V_{peak} จะได้ว่าเสิร์จที่เข้าสู่วาริแอกสูงถึง 67.5% ที่วาริแอก 100 % ซึ่งเกินค่ามาตรฐานอยู่มาก (ในกรณีนี้จะต้องไม่เกิน 620 V)



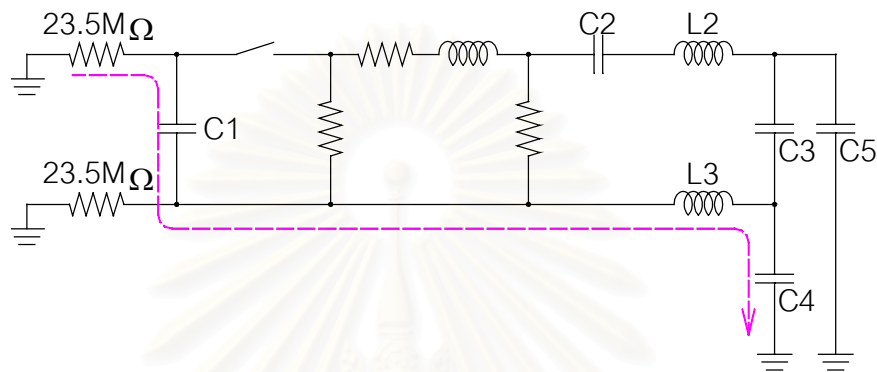
รูปที่ 3-22 : แสดงแรงดันอิมพัลส์ที่ขาเข้าของวาริแอกที่ 30%



รูปที่ 3-23 : แสดงแรงดันอิมพัลส์ที่ขาออกของวาริแอกที่ 30%

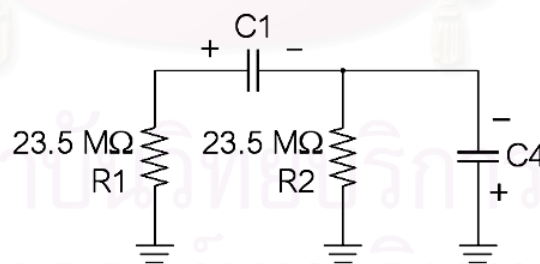
3.2.2.2 การทดสอบในกรณีอินอร์มัล

การทดสอบในกรณีนี้เนื่องจากทางด้านซ้ายขาออกของเครื่องกำเนิดต้องไม่ต่อสายดิน เพราะฉะนั้นในการวัดแรงดันชาร์จ์ประจุ ในการทดลองนี้จะใช้โวลต์เตจดีไวเดอร์ 2 ชุด แต่ละชุด มีค่า R1 เท่ากับ $23.5\text{ M}\Omega$ และ R2 เท่ากับ $10\text{ k}\Omega$ โดยแต่ละชุดจะวัดแรงดันเทียบกับดิน และค่าแรงดันคร่อม C1 คือค่าที่ได้จากดีไวเดอร์ทั้งสองมาลบกัน



รูปที่ 3-24 : แสดงการวัดแรงดันชาร์จ์ประจุในกรณีอินอร์มัล

แต่การวัดวิธีนี้จะทำให้เกิดลูป (Loop) ในวงจรขึ้น แรงดันกระแสตรงจะไปชาร์จ์ตัวเก็บประจุที่คล้าย C4 ตามลูปในรูปที่ 3-24 เนื่องจากค่าตัวต้านทาน $23.5\text{ M}\Omega$ มีค่าสูงมาก และเราสามารถคิดเป็นกรณีกระแสตรงได้ ดังนั้นเราสามารถละเลยค่าความเหนี่ยวนำ L3 ของวงจรที่คล้ายได้ ฉะนั้นจะได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 3-25



รูปที่ 3-25 : แสดงวงจรที่เกิดลูปในกรณีอินอร์มัล

จากรูปที่ 3-25 จะเห็นว่าเมื่อชาร์จ์แรงดันให้กับ C1 แรงดันนี้จะไปชาร์จ์ให้กับ C4 ด้วย ชาร์จ์โดยผ่าน R1 $23.5\text{ M}\Omega$ แรงดัน C4 นี้จะเพิ่มขึ้นช้าๆ เพราะ R1 มีค่าสูง และทำให้ดีไวเดอร์ชุดที่ 2 จะเห็นแรงดันเป็นแรงดันที่ตกคร่อม C4 นี้

$$V_{C1} = V_{R1} - V_{C4} = V_{R1} - V_{R2}$$

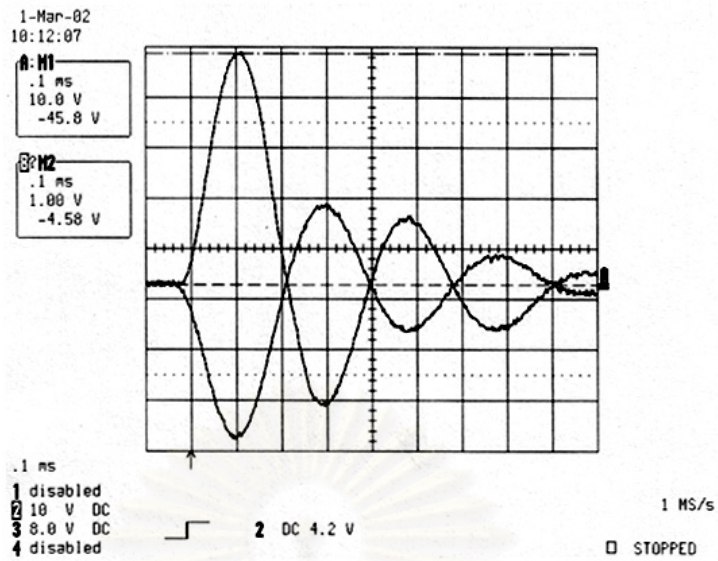
จะเห็นว่าในการวัดนั้นดิโวลต์ที่หนึ่ง และชุดที่สองจะอ่านค่าได้ไม่เท่ากันจะต่างกันมาก เพราะดิโวลต์ที่สองจะเห็นแรงดันเป็นแรงดันคร่อม C4 ซึ่งแรงดัน V_{C4} นี้จะเพิ่มขึ้นช้ากว่า แรงดัน V_{C1} มาก

แต่ในขณะที่เราสับสวิตช์ป้อนอิมพัลส์ออกไป C1 จะคายประจุออกหมดในทันที แต่ขณะเดียวกัน C4 จะไม่สามารถคายประจุทันที่ได้ แต่จะคายประจุอย่างช้าๆ ผ่าน R1 กลับไปชาร์จ C1 และคายประจุผ่าน R2 เพราะฉะนั้นถ้าเราชาร์จ C1 เร็วเกินไปก่อนที่ C4 จะคายประจุออกหมดจะทำให้แรงดัน V_{C4} เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อาจทำให้ตัวเก็บประจุ C4 มีแรงดันเกินพิกัดและเกิดความเสียหายได้ ในการทดสอบวงจรครั้งนี้เราจะยังใช้ วิธีการวัดด้วยดิโวลต์ความต้านทาน 2 ชุดนี้อยู่ เนื่องจากยังไม่ใช้แรงดันสูงมากนัก แต่ในการทดลองจริงเราจะใช้การวัดโดยใช้แอมป์มิเตอร์

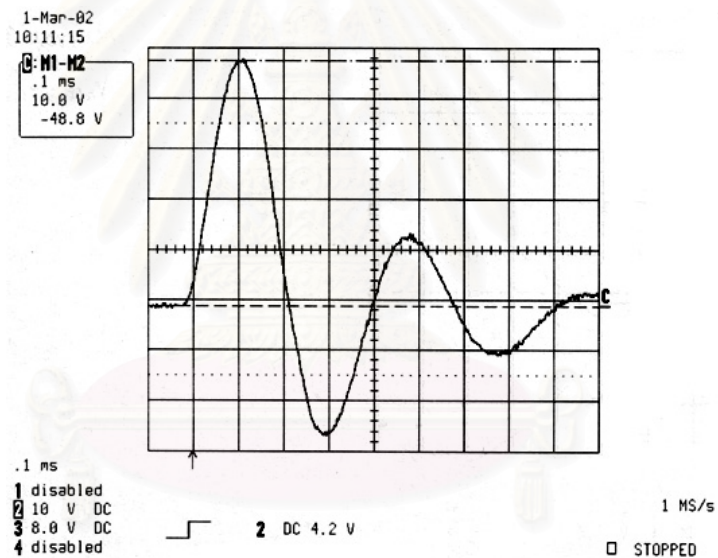
ตารางที่ 3-5 : แสดงผลการทดสอบในกรณีนอร์มัล

เปอร์เซ็นต์ วาริแอด	ขาออกวาริแอด			ขาเข้าวาริแอด		
	V_{LG}	V_{NG}	V_{LN}	V_{LG}	V_{NG}	V_{LN}
15%	489	430	922	6,366	424	6,783
30%	511	428	942	2,519	441	2,965
60%	543	539	1,076	941	459	1,418
100%	550	542	1,090	509	499	1,004
เปิดวงจร	571	467	1,026	-	-	-

การทดลองนี้เราชาร์จแรงดัน C1 ประมาณ $1,080 V_{DC}$ จะได้แรงดันอิมพัลส์ประมาณ $1,000 V_{peak}$ จะเห็นว่าแรงดันอิมพัลส์ที่เข้าสู่ระบบด้านขาออกของวาริแอด มีค่าสูงถึง 57% ซึ่งเกินค่ามาตรฐาน ส่วนทางด้านขาเข้าของวาริแอดจะมีค่าแรงดันอิมพัลส์สูงมากกว่าในกรณีคอมมัลด์มาก ทั้งๆ ที่แรงดันชาร์จในกรณีนอร์มัลมีค่าน้อยกว่า (กรณีคอมมัลด์ชาร์จที่ $1,970 V_{DC}$) เพราะในกรณีนอร์มัล เราป้อนอิมพัลส์เข้าที่ขั้ว L-N โดยตรง แรงดัน V_{LN} จึงมีค่าสูงกว่าในกรณีคอมมัลด์ และแรงดันที่ถูกขยายคือแรงดัน V_{LN} ดังนั้นแรงดันที่ขั้วขาเข้าของวาริแอดในกรณีนอร์มัลจึงมีค่าสูงกว่าในกรณีคอมมัลด์มาก

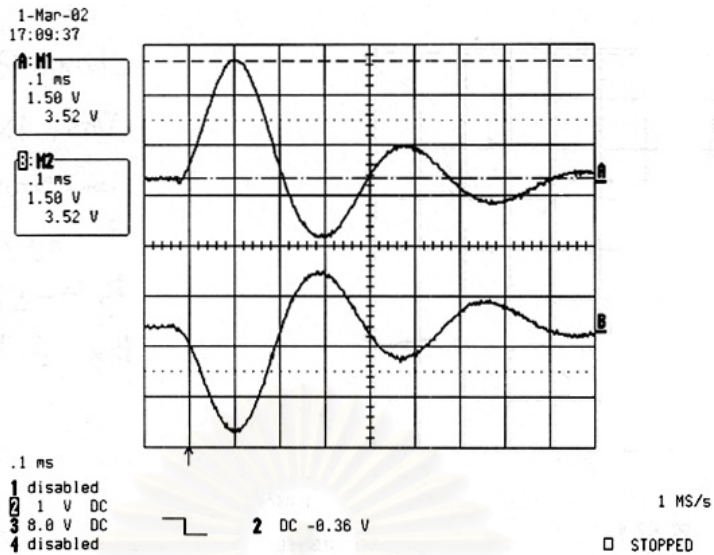


รูปที่ 3-26 : แสดงแรงดัน V_{LG} , V_{NG} ที่ขั้วขาเข้าออกของวารีแอกที่ 15%

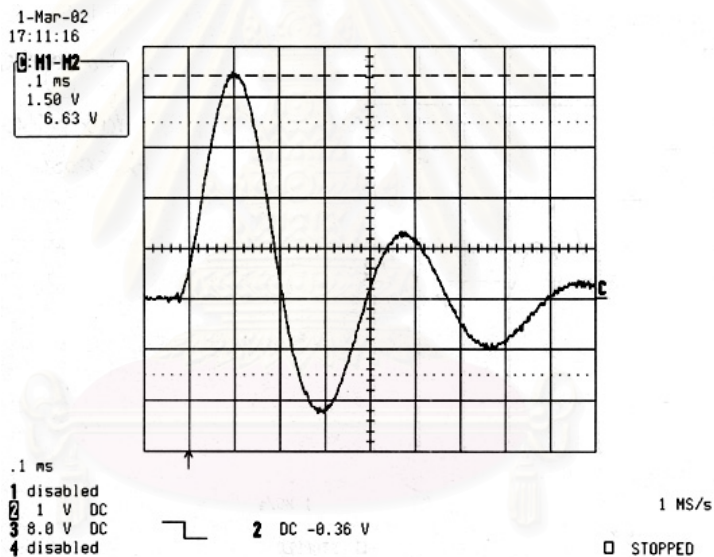


รูปที่ 3-27 : แสดงแรงดัน V_{LN} ที่ขั้วขาเข้าของวารีแอกที่ 15%

จะเห็นว่าในการใช้วารีแอกในการปรับแรงดันนั้น จะต้องระมัดระวังในการขยายแรงดันทางด้านแหล่งจ่ายด้วย ถ้าใช้วารีแอกในกรณีที่ไม่ถึง 100%



รูปที่ 3-28 : แสดงแรงดัน V_{LG} , V_{NG} ที่ขั้วขาออกของวารีแอกคที่ 15%



รูปที่ 3-29 : แสดงแรงดัน V_{LN} ที่ขั้วขาออกของวารีแอกคที่ 15%

จากผลการทดลองจะเห็นว่าเสิร์จที่เข้าสู่ระบบนั้นยังมีค่าสูงเกินมาตรฐาน ดังนั้นจะทำการ Simulate ใหม่โดยคิดในกรณีเลวร้ายที่สุดคือในกรณีเปิดวงจร (ไม่ต่อแหล่งจ่าย ไม่ต่อวารีแอกค) จะได้ผลการ Simulate ในกรณีนี้ จะได้ว่าค่าความจุควรจะมีมากกว่า $15 \mu\text{F}$

และทำการออกแบบวงจรดีคัปปลิงใหม่โดยให้ค่าความจุของตัวเก็บประจุทั้ง 3 คือ $22.4 \mu\text{F}$ และผลการทดสอบจะเสนอในหัวข้อการทดสอบและวิเคราะห์ผลต่อไป

บทที่ 4

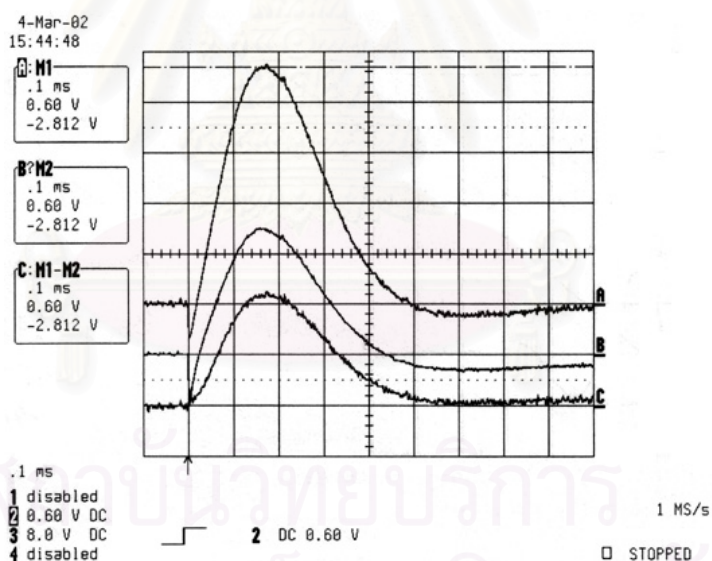
การทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในหัวข้อนี้เราจะทำการทดสอบ โดยการป้อนแรงดันไฟ 220V 50Hz โดยตรงไม่ผ่านวาริแอดค ป้อนเข้าที่วงจรถีคป์ลิงเพื่อเป็นการทดสอบในสภาวะทำงานจริงและดูผลในกรณีต่างๆ

4.1 การทดสอบเสิร์จที่เข้าระบบ

4.1.1 กรณีคอมมัล

การทดสอบในหัวข้อนี้เราจะทำการทดลองโดยการทดสอบในกรณีที่เลวร้ายที่สุด คือ เปิดวงจรถ้าด้านขาเข้าของวงจรถีคป์ลิง ผลการทดลองที่แรงดันอิมพัลส์ขาเข้าประมาณ 6 kV แสดงในรูปที่ 4-1



รูปที่ 4-1 : แสดงรูปคลื่นอิมพัลส์ที่เข้าระบบ V_{LG} , V_{NG} และ V_{LN}

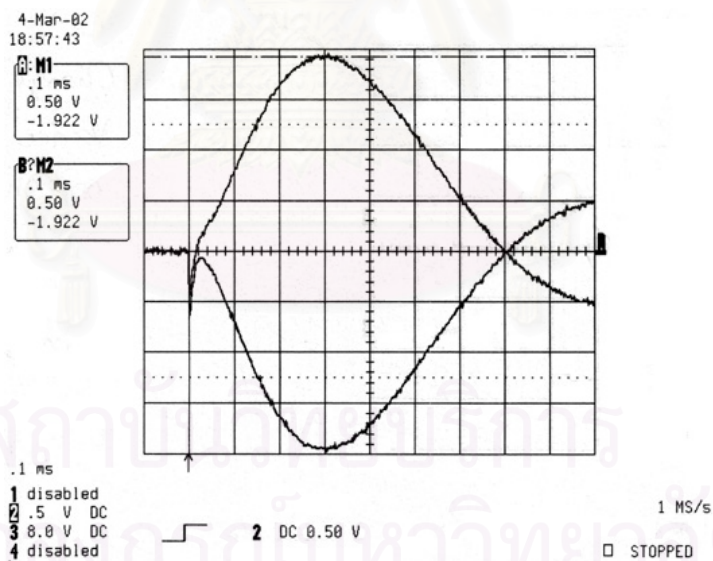
ในการวัดนั้นเราใช้ดิโวลต์แบบตัวเก็บประจุวัด V_{LG} และ V_{NG} และนำสัญญาณทั้งสองมาลบกันได้ V_{LN} จากรูปเราใช้ดิโวลต์ความต้านทานวัดแรงดันมีอัตราส่วน 1:139 และซาร์จแรงดันที่ประมาณ 6,630 V จะได้ แรงดันอิมพัลส์ขณะเปิดวงจรถองเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม คือ 6,110 V

$$\begin{aligned}
 V_{\text{Impulse}} &= 6,110 \text{ V} \\
 V_{\text{LG}} &= 2.812 \times 139 = 391 \text{ V} && \text{คิดเป็น 6.40\%} \\
 V_{\text{NG}} &= 1.494 \times 139 = 207 \text{ V} && \text{คิดเป็น 3.39\%} \\
 V_{\text{LN}} &= 1.322 \times 139 = 184 \text{ V} && \text{คิดเป็น 3.01\%}
 \end{aligned}$$

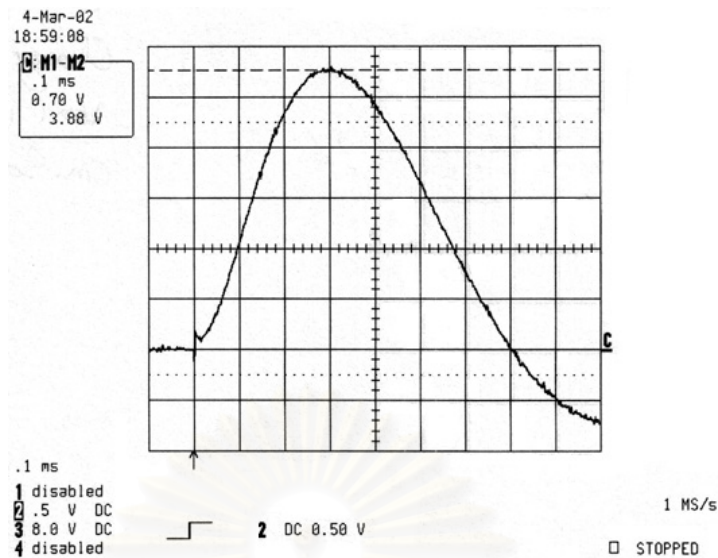
จะเห็นว่าแรงดันเล็กร์จที่เข้าระบบมีค่าไม่เกิน 15% ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน จากรูปคลื่นแรงดันในรูปที่ 4-1 นั้นจะสังเกตว่าที่บริเวณหน้าคลื่นนั้น จะเกิดยอดแหลมทางด้านลบในช่วงครู่ซึ่งเกิดจากการต่อสายดินจะกล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป และจะสังเกตว่า V_{LN} นั้นจะไม่เห็นยอดแหลมเพราะ V_{LN} ไม่ได้ถูกวัดโดยตรงแต่วัดโดยการนำ $V_{\text{LG}}, V_{\text{NG}}$ มาลบกัน

4.1.2 กรณีนอร์มัล

เช่นเดียวกับในกรณีคอมมัลเราจะทดสอบในกรณีที่เลวร้ายที่สุด คือเปิดวงจรทางด้านขาเข้าของวงจรดีคัปปลิง ผลการทดลองที่แรงดันอิมพัลส์ขาเข้าประมาณ 6 kV แสดงในรูปที่ 4-2 และรูปที่ 4-3



รูปที่ 4-2 : แสดงรูปคลื่นอิมพัลส์ที่เข้าระบบ $V_{\text{LG}}, V_{\text{NG}}$



รูปที่ 4-3 : แสดงรูปคลื่นอิมพัลส์ที่เข้าระบบ V_{LN}

ชาร์จแรงดันที่ 6,630 V

$$V_{\text{Impulse}} = 6,110 \text{ V}$$

$$V_{LG} = 1.922 \times 139 = 267 \text{ V} \quad \text{คิดเป็น } 4.37\%$$

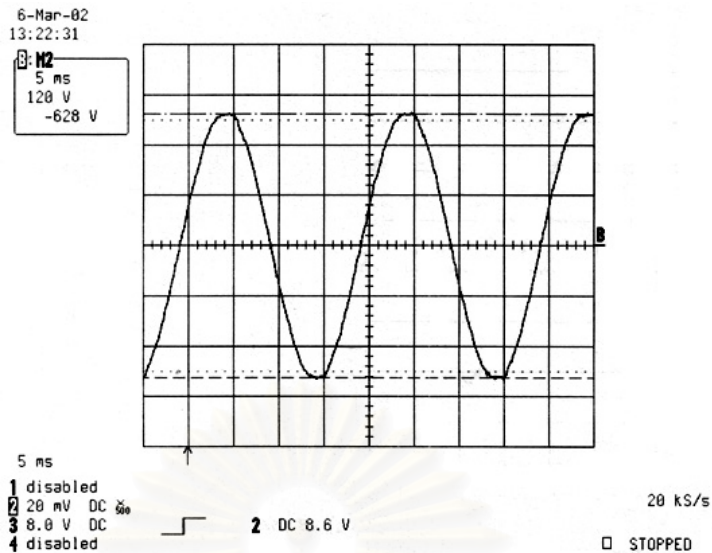
$$V_{NG} = 1.945 \times 139 = 270 \text{ V} \quad \text{คิดเป็น } 4.42\%$$

$$V_{LN} = 3.880 \times 139 = 539 \text{ V} \quad \text{คิดเป็น } 8.82\%$$

จะเห็นว่าแรงดันเลิร์จที่เข้าระบบมีค่าไม่เกิน 15% ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน จากรูปคลื่นแรงดันในรูปที่ 4-21 นั้นจะสังเกตว่าที่บริเวณหน้าคลื่นนั้น จะเกิดยอดแหลมทางด้านลบในช่วงครู่ที่เกิดจากการต่อสายดินจะกล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป และจะสังเกตว่า V_{LN} นั้นจะมียอดแหลมอยู่เล็กน้อยและเป็นบวกเพราะ เรวัด V_{LG} และ V_{NG} ไม่พร้อมกันทำให้ยอดแหลมไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงหักล้างกันไม่หมด

4.2 การทดสอบแรงดัน AC ที่เข้าสู่เครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม

การทดสอบนี้เราจะดูว่าแรงดันที่เข้าสู่เครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมเป็นอย่างไร รูปคลื่นแรงดัน AC 220 V 50 Hz จากระบบที่วัดได้แสดงในรูปที่ 4-4

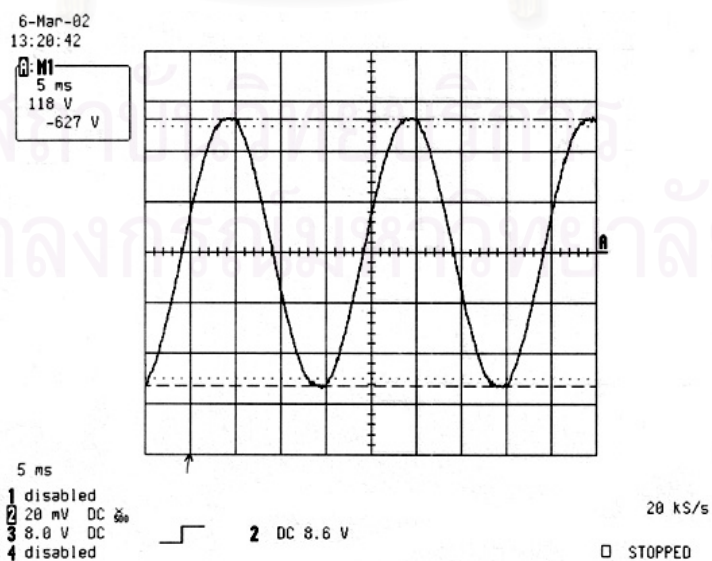


รูปที่ 4-4 : แสดงรูปคลื่นแรงดัน AC จากแหล่งจ่าย

4.2.1 กรณีคอมมัลด์

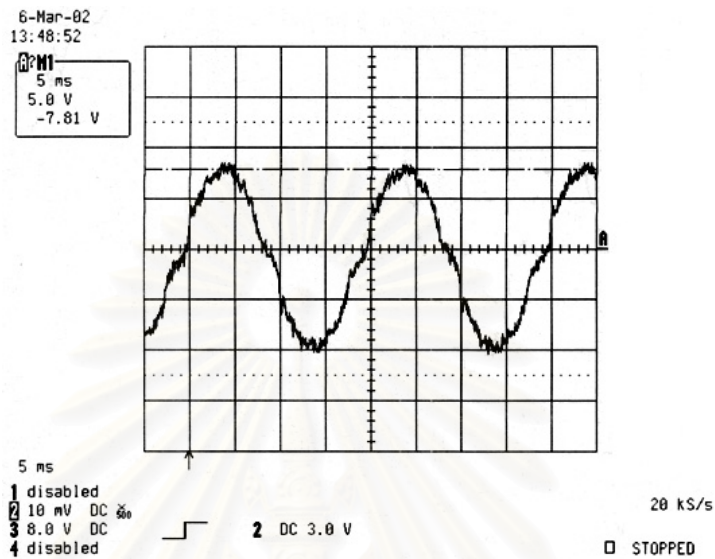
ในกรณีคอมมัลด์นี้จะมีตัวต้านทานขนาด 10 โอห์มต่อที่วงจรถัดด้วย (ดูรูปที่ 3-19) การวัดนั้นเราจะใช้ Differential Probe ในการวัดอัตราส่วน 1:500 ค่าแรงดันที่จุดต่างๆ ที่วัดได้แสดงในรูปที่ 4-5 ถึงรูปที่ 4-8

รูปที่ 4-5 แสดงรูปคลื่นแรงดัน V_{LN} ที่ผ่านวงจรถัดค้ปลิงมาจะสังเกตว่ารูปคลื่นที่ได้จะใกล้เคียงกับรูปคลื่นจากแหล่งจ่ายแรงดันตกในตัวเหนี่ยวนำน้อยมาก

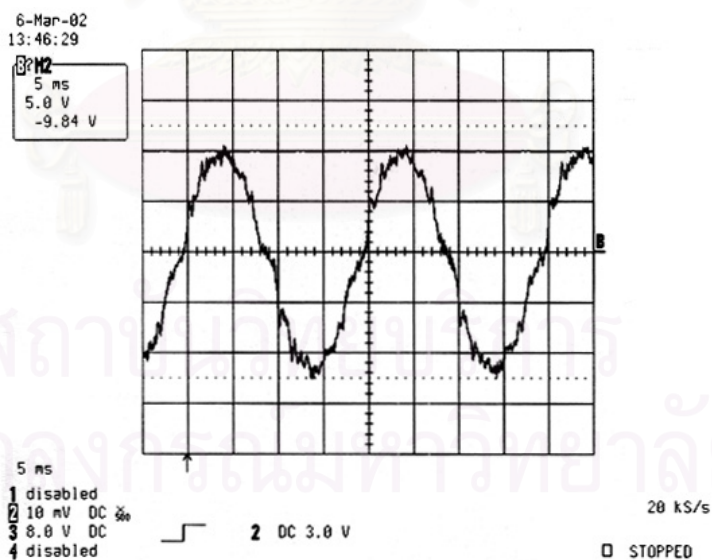


รูปที่ 4-5 : รูปแสดงแรงดัน V_{LN} ที่ผ่านวงจรถัดค้ปลิง

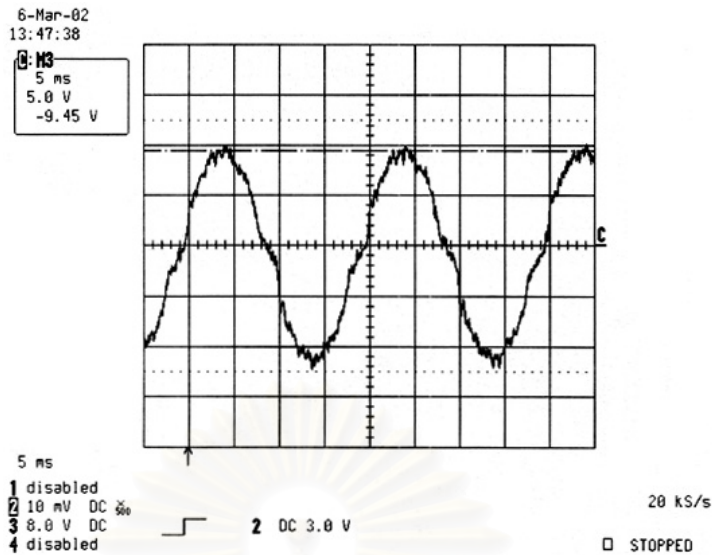
แต่รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานต่างๆ ทางด้านเครื่องกำเนิดอิมพัลส์นั้น ลักษณะรูปคลื่นจะมีฮาร์โมนิก (Harmonic) และมีสัญญาณรบกวนความถี่สูง รูปคลื่นที่ได้จะไม่เรียบเหมือนรูปคลื่นแรงดัน V_{LN}



รูปที่ 4-6 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 10 โอห์ม

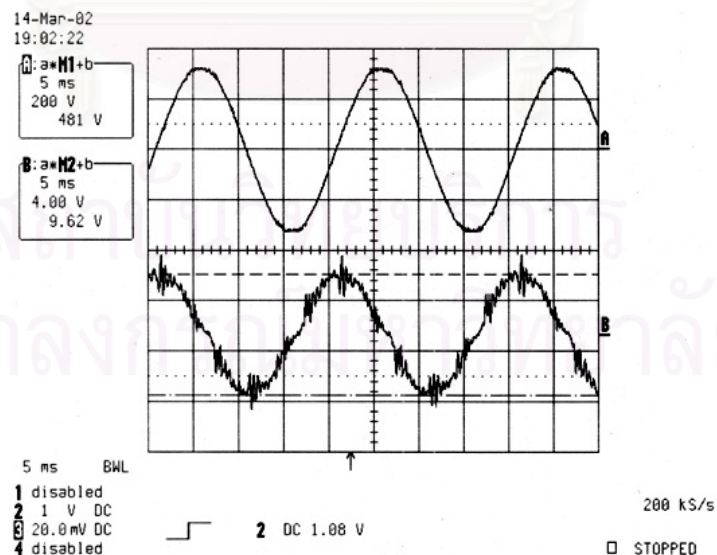


รูปที่ 4-7 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 25 โอห์ม



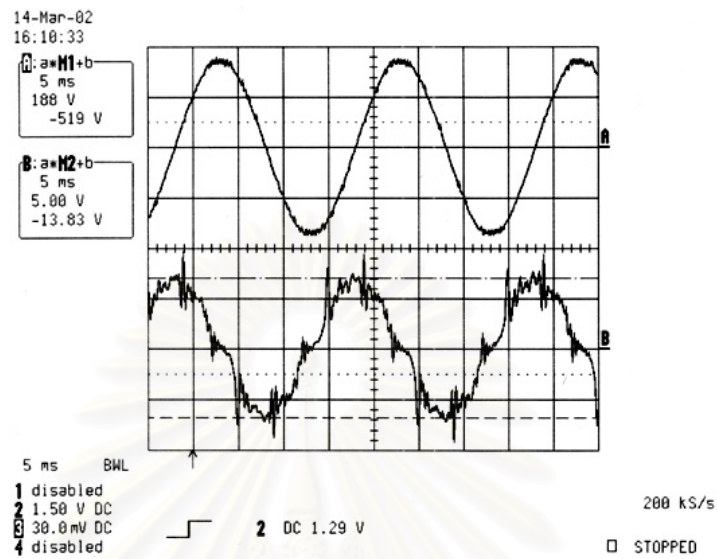
รูปที่ 4-8 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 21 โอห์ม

สาเหตุที่ทำให้รูปคลื่นไม่เรียบนั้นเพราะมีฮาร์โมนิคมาจากสายนิวทรอล รูปที่ 4-9 แสดงแรงดัน V_{NG} ซึ่งวัดทางด้านแหล่งจ่ายไฟ และวัดโดยใช้ ดีไวเดอร์ตัวเก็บประจุ 2 ชุดวัดเทียบกับสายดิน ในรูปที่ 4-9 รูปคลื่น A คือ V_{LG} และ รูปคลื่น B คือ V_{NG} จากรูปจะเห็นว่าแรงดันทั้งสองมีเฟสไม่ตรงกัน เพราะที่แรงดันนิวทรอลกับดินนั้นจะมีอิมพีแดนซ์ต่ำๆ อยู่ค่าหนึ่งซึ่งอิมพีแดนซ์ค่านี้อาจจะต่อขนานกับตัวเก็บประจุ C4 (รูปที่ 3-21) ทำให้อิมพีแดนซ์ ระหว่าง L-G และ N-G มีค่าต่างกันมีมุมเฟสต่างกันจึงทำให้ V_{LG} และ V_{NG} มีเฟสต่างกัน



รูปที่ 4-9 : แสดงรูปคลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟ V_{LG} , V_{NG}

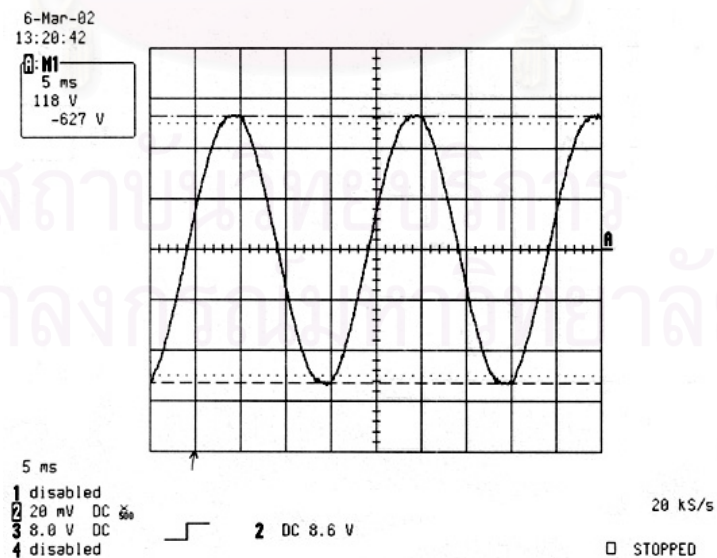
รูปที่ 4-10 แสดงรูปคลื่นแรงดัน V_{LG} และ V_{NG} ที่ผ่านวงจรถัดไปหลังจาก ฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากระบบไฟของแหล่งจ่ายเองไม่ได้เกิดจากวงจรเครื่องกำเนิด



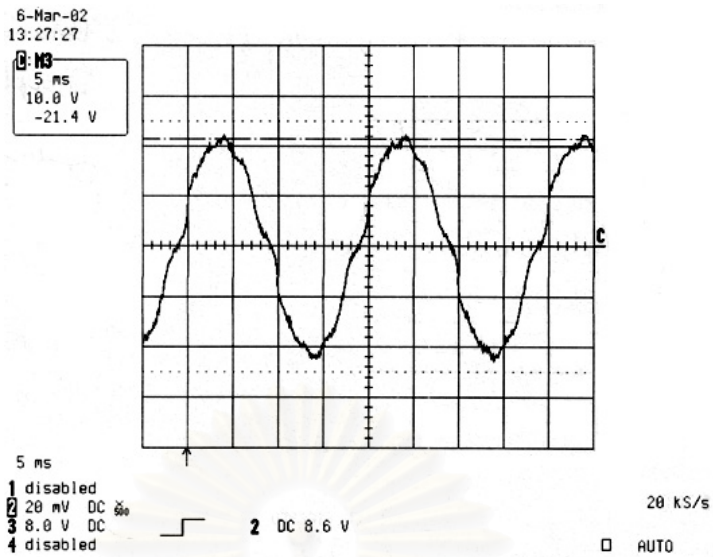
รูปที่ 4-10 : แสดงรูปคลื่นแรงดันเมื่อผ่านวงจรถัดไป V_{LG} , V_{NG}

4.2.2 กรณีนอร์มัล

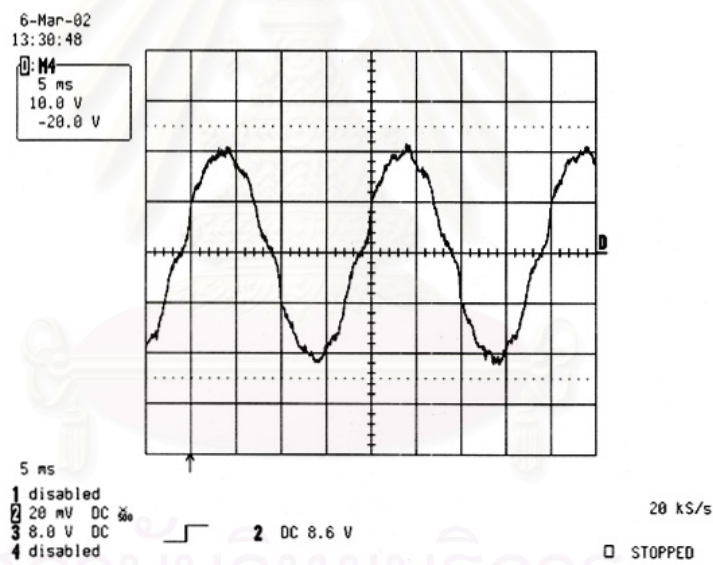
วัดแรงดันเช่นเดียวกับกรณีคอมมัล รูปคลื่นแรงดันแสดงในรูปที่ 4-11 ถึง รูปที่ 4-13



รูปที่ 4-11 : รูปแสดงแรงดัน V_{LN} ที่ผ่านวงจรถัดไป



รูปที่ 4-12 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 25 โอห์ม



รูปที่ 4-13 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 21 โอห์ม

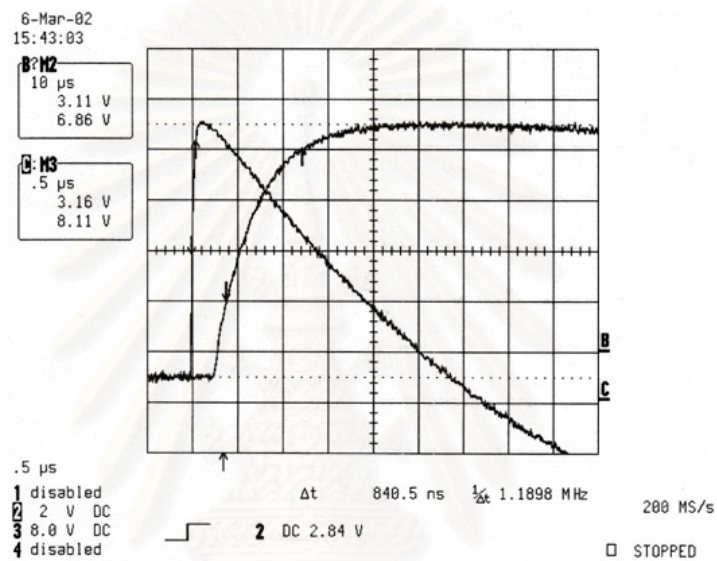
จะเห็นว่ารูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานนั้นจะมีฮาร์โมนิค ในลักษณะเดียวกันกับในกรณีนอร์มัล ซึ่งเกิดจากฮาร์โมนิคของระบบจ่ายแรงดัน

4.3 การทดสอบรูปคลื่นที่ผ่านวงจรถักปริง

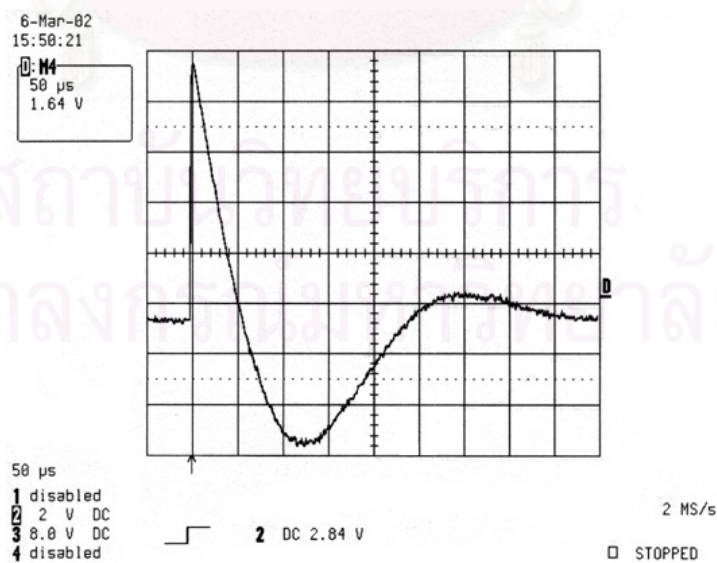
ในหัวข้อนี้เราจะดูรูปคลื่นหลังจากที่ผ่านวงจรถักปริงแล้ว ซึ่งมาตรฐานไม่ได้กำหนดว่าควรจะมีลักษณะเช่นใด

4.3.1 กรณีคอมมัลด์

ในกรณีนี้เราวัดโดยต่อวงจรถักปริง และดีคัปปลิง แต่จะยังไม่ป้อนแรงดัน AC และจะวัดแรงดันที่ผ่านวงจรถักปริงโดยวัดที่ขาออกของวงจรถักปริงกับสายดิน



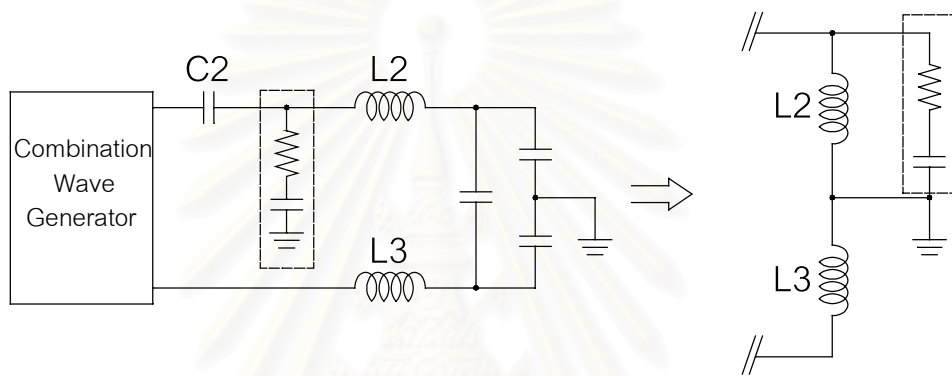
รูปที่ 4-14 : แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ผ่านวงจรถักปริง



รูปที่ 4-15 : แสดงการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ผ่านวงจรถักปริง

4.3.2 กรณีเนอร์มัด

เช่นเดียวกับกรณีคอมมัล กรณีเนอร์มัดนี้เราจะวัดโดยต่อวงจรคัปปลิง และดีคัปปลิง แต่จะยังไม่ป้อนแรงดัน AC แต่ในการวัดในกรณีเนอร์มัดนี้เราต้องวัดแรงดัน V_{LN} แต่ในการวัดเครื่องมือวัดเราต้องเทียบกับสายดิน เราจึงต้องวัด V_{LG} และ V_{NG} แล้วจึงนำสัญญาณทั้งสองมาลบกัน ในขณะที่การวัดแรงดันชาร์จ์ประจุนั้น เพื่อไม่ให้เกิดลูปในการชาร์จ์ประจุตั้งที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 3.2.2.2 เราจะใช้มิลลิแอมป์มิเตอร์วัดโดยต่อตัวต้านทานขนาด 47 เมกกะโอห์มเพื่อจำกัดกระแส ค่ากระแสสูงสุดประมาณ 0.14 มิลลิแอมป์

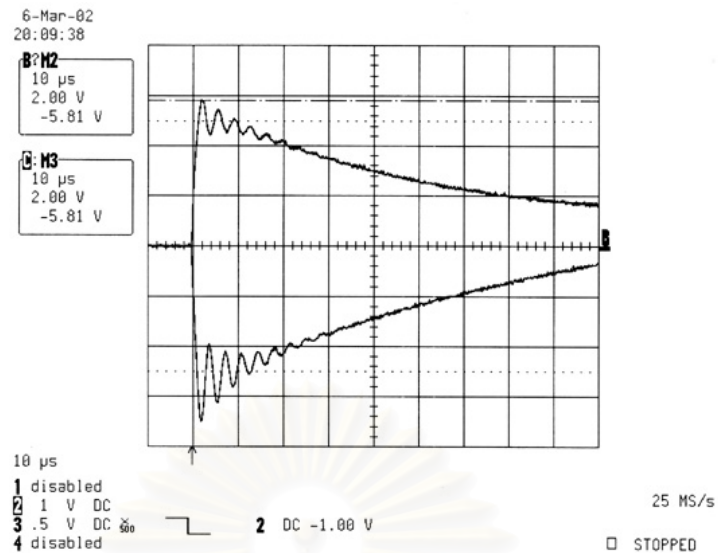


รูปที่ 4-17 : แสดงวงจรในการวัดด้วยดิโอดเรอร์ตัวเก็บประจุ 1 ชุดในกรณีเนอร์มัด

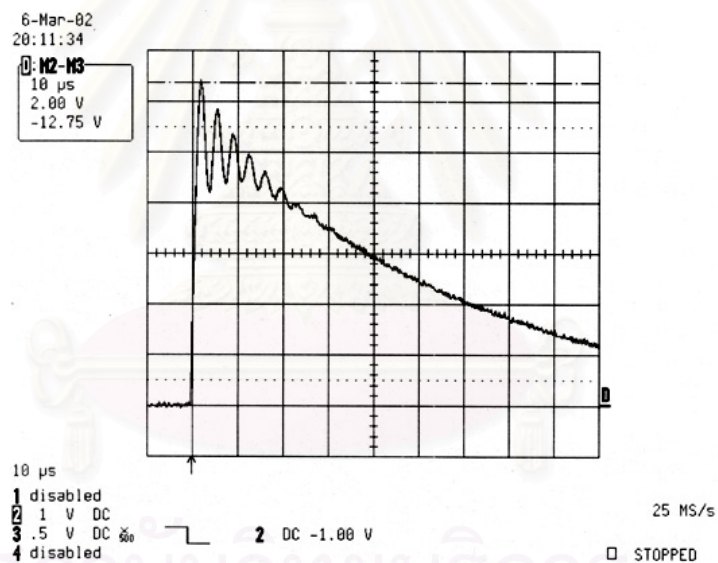
ในการวัดรูปคลื่นแรงดันนั้นจะใช้ดิโอดเรอร์ตัวเก็บประจุซึ่งในการวัดนั้นเราจะวัด V_{LG} และ V_{NG} ทีละครั้งไม่ได้เพราะจะเกิดลูปทำให้เกิดการแกว่งในการวัดได้ รูปที่ 4-17 ที่ความถี่สูงตัวเก็บประจุดีคัปปลิงเหมือนลวดวงจรจะได้วงจรสมมูล คือวงจรทางด้านขวาจะเห็นว่าเกิดลูปขึ้น วิธีคิดความถี่ที่เกิดการแกว่งอย่างง่าย คือ $T = 2\pi\sqrt{LC}$ โดย L คือค่าความเหนี่ยวนำสมมูลคิดจาก L2 ขนาน L3 จะได้ $L = 0.75 \text{ mH}$ ส่วนค่า C คือค่าความจุของดิโอดเรอร์มีค่าเท่ากับ 220 pF แทนค่าจะได้ $T = 2.552 \mu\text{s}$

จากรูปที่ 4-18 แสดงแรงดันในการวัดโดยใช้ดิโอดเรอร์ตัวเก็บประจุ โดยวัดแยกกันสองครั้งซึ่งจะทำให้เกิดการแกว่งและเมื่อคำนวณหา V_{LN} ก็จะมีการแกว่งด้วยโดยการแกว่งทั้งสองจะเสริมกัน ดังแสดงในรูปที่ 4-19 เพราะฉะนั้นในการวัดต้องระวังเรื่องการแกว่งด้วยซึ่งอาจจะเพิ่มสูงถึง 2 เท่าของค่าสูงสุดในกรณีที่ไม่เกิดการแกว่ง ซึ่งอาจทำให้เกิดการเสียหายได้

ดังนั้นในการวัดแรงดันอิมพัลส์ในกรณีเนอร์มัดนี้ควรจะวัดโดยใช้ดิโอดเรอร์ 2 ชุดวัดพร้อมกันแล้วนำสัญญาณทั้งสองมาลบกัน ในการวัดโดยใช้ดิโอดเรอร์ 2 ชุดนั้นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ก็ยังคงเกิดการแกว่งอยู่ แต่เมื่อนำสัญญาณทั้งสองชุดมาลบกันจะไม่เกิดการแกว่ง



รูปที่ 4-18 : แสดงแรงดันอิมพัลส์ V_{LG} และ V_{NG}

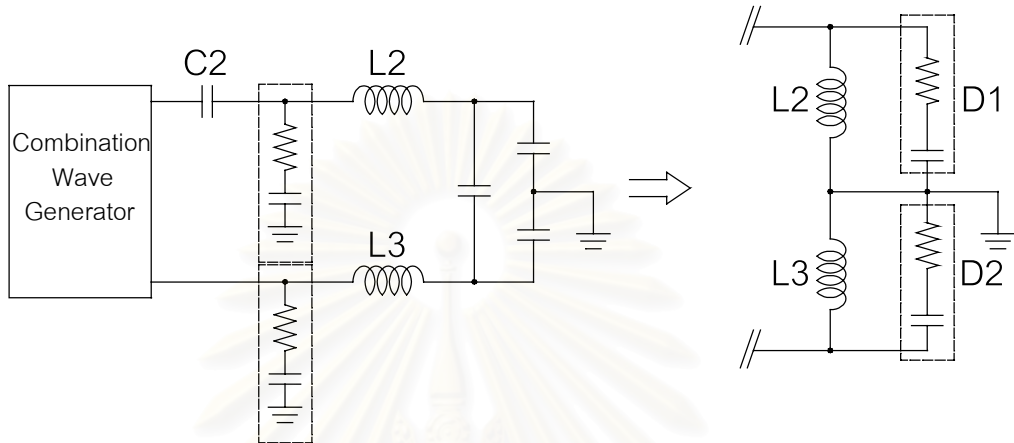


รูปที่ 4-19 : แสดงแรงดันอิมพัลส์ V_{LN}

การวัดโดยใช้ดีไวเดอร์ 2 ชุดแสดงในรูปที่ 4-20 ในทำนองเดียวกันที่ความถี่สูงจะละเอียดตัวเก็บประจุตีปลิงได้ จะได้วงจรอย่างง่ายแสดงทางด้านขวาจะเห็นว่าวงจรจะเป็นวงจรบริดจ์ (Bridge Circuit) ซึ่งถ้าต้องการไม่ให้เกิดการแกว่งในการวัดเลยก็ต้องให้วงจรบริดจ์สมดุล เงื่อนไขของบริดจ์สมดุลจากรูปที่ 4-20 คือ

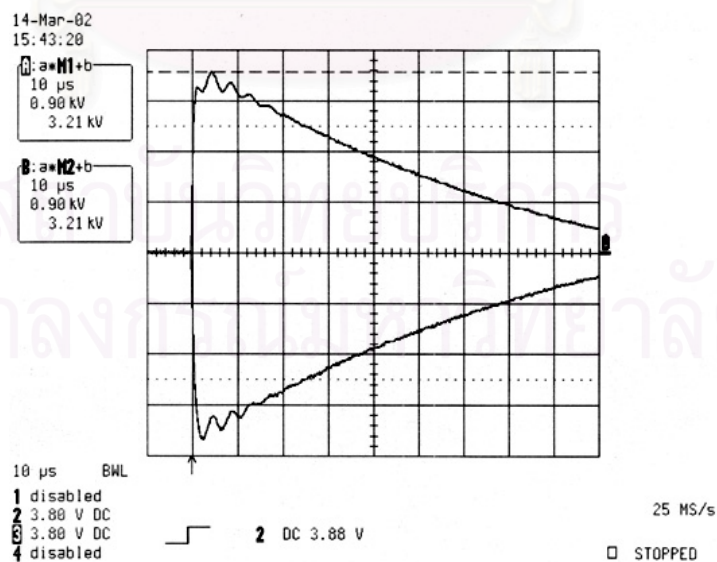
$$Z_{L2}Z_{D2} = Z_{L3}Z_{D1}$$

โดย Z_{L2} คือค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ L2
 Z_{L3} คือค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ L3
 Z_{D2} คือค่าอิมพีแดนซ์ของดีโอดี D2
 Z_{D3} คือค่าอิมพีแดนซ์ของดีโอดี D3

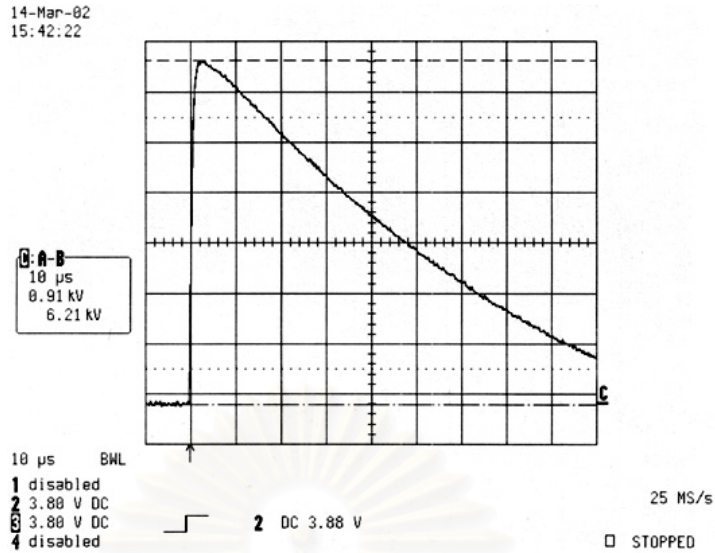


รูปที่ 4-20 : แสดงวงจรในการวัดด้วยดีโอดีตัวเก็บประจุ 2 ชุดในกรณีนอร์มัล

ในการวัดจริงนั้นเนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำทั้งสองตัวมีค่าไม่เท่ากันจริง และดีโอดีทั้งสองชุดก็มีค่าอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากัน (ชุดแรกอัตราส่วน 1:139 ชุดที่สองอัตราส่วน 1:142.6) ทำให้ผลที่ได้ก็ยังคงเกิดการแกว่งอยู่

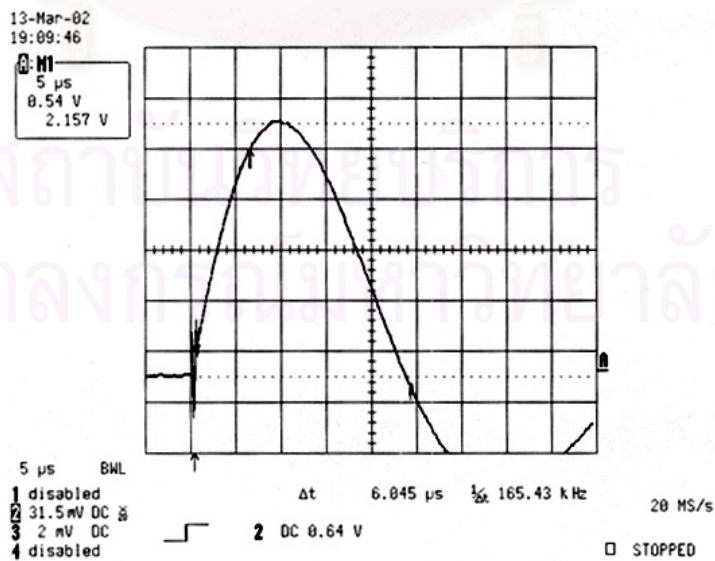


รูปที่ 4-21 : แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ V_{LG} , V_{NG}



รูปที่ 4-22 : แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ V_{LN}

จากรูปที่ 4-21 เนื่องจากดิไวเดอร์มีอัตราส่วนไม่เท่ากันเราจึงต้องนำอัตราส่วนของแต่ละตัว มาคูณก่อนรูปคลื่น A คือ 139xM1 ขณะที่รูปคลื่น B คือ 143xM2 (ตัวเลขในการคูณมีเลขนัยสำคัญ 3 ตำแหน่ง) M1 และ M2 คือรูปคลื่นที่เก็บไว้ในเครื่องในที่นี้คือ V_{LG} และ V_{NG} ในรูปจะเห็นว่ารูปคลื่นแรงดัน V_{LG} และ V_{NG} ยังคงเกิดการแกว่งอยู่แต่รูปคลื่นที่แกว่งนั้นจะมีเฟสตรงข้ามกันอยู่ ดังนั้นจะทำให้ V_{LN} ไม่เกิดการแกว่ง รูปที่ 4-22 แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ V_{LN} ซึ่งจะเห็นว่าไม่แกว่ง และค่าแรงดันสูงสุดที่วัดได้ คือ 6.21 kV สำหรับหน้าคลื่น T1 นั้นวัดได้ 1.411 μs และหลังคลื่น T2 วัดได้ 45 μs



รูปที่ 4-23 : แสดงรูปคลื่นอิมพัลส์กระแสที่ผ่านวงจรถับคั้งในกรณีนอร์มัล

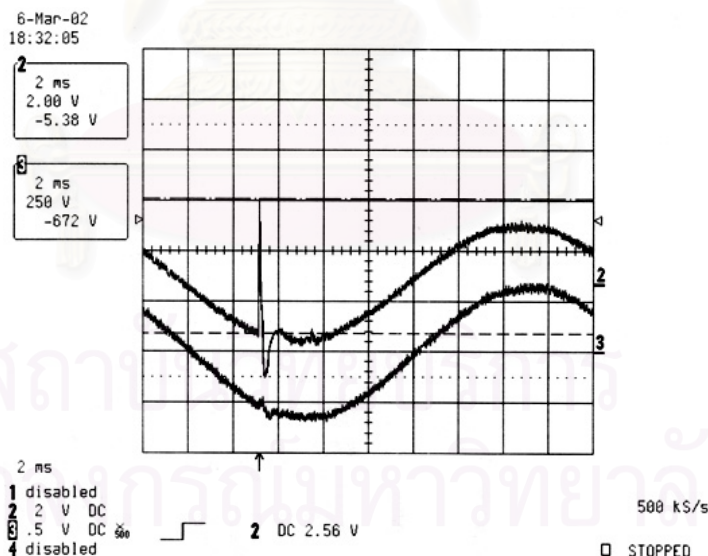
สำหรับรูปคลื่นกระแสนั้นแสดงในรูป 4-23 ค่ากระแสสูงสุด คือ 2.7 kA และค่าเวลาหน้าคลื่น $T1 = 6.045 \times 1.25 = 7.56 \mu\text{s}$ และเวลาหลังคลื่น $T2 = 18 \mu\text{s}$

4.4 การทดสอบป้อนอิมพัลส์ในขณะที่ต่อแหล่งจ่ายไฟ

ในการทดลองนี้เราจะทดลองโดยป้อนแรงดันอิมพัลส์เข้าไปในขณะที่มีแรงดันกระแสสลับจากระบบ วงจรที่ใช้ในการทดลองคือในรูปที่ 3-20 และรูปที่ 3-21

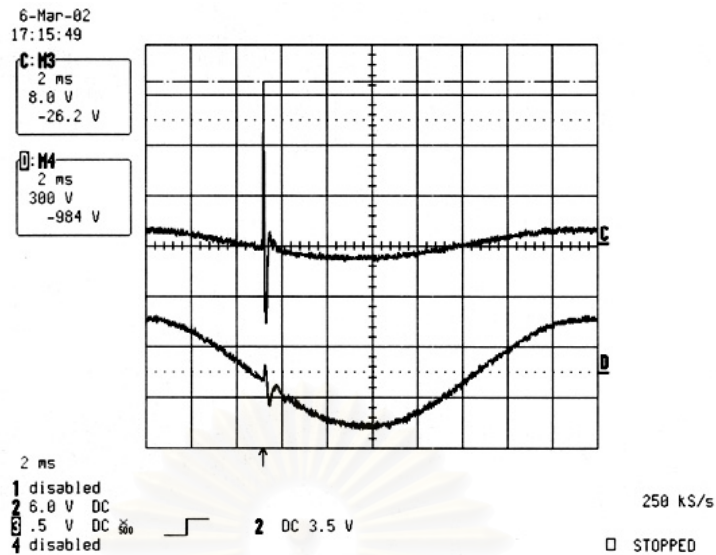
4.4.1 กรณีคอมมัลต์

ในกรณีคอมมัลต์นี้ทำการทดสอบตามรูปที่ 3-21 แต่เปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุวงจรตีปลิงเป็น $22.4 \mu\text{F}$ โดยทดลองที่ระดับแรงดันต่างๆ มุมเฟสต่างๆ ในการวัดเราจะวัดแรงดันที่ผ่านวงจรตีปลิงเข้ามาซึ่งก็คือ V_{LG} ทางด้านวงจรตีปลิง ซึ่งจะใช้ดีไวเดอร์ตัวเก็บประจุอัตราส่วน 1:139 และดูค่าแรงดันเลิร์จที่ผ่านวงจรตีปลิงเข้าสู่ระบบซึ่งจะวัดโดยใช้ Differential Probe เนื่องจากในการทดลองนี้เราใช้โซลินอยด์ในการสวิตช์ เพราะฉะนั้นเราไม่สามารถควบคุมมุมเฟสในการสวิตช์ได้ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4-24 ถึง รูปที่ 4-27

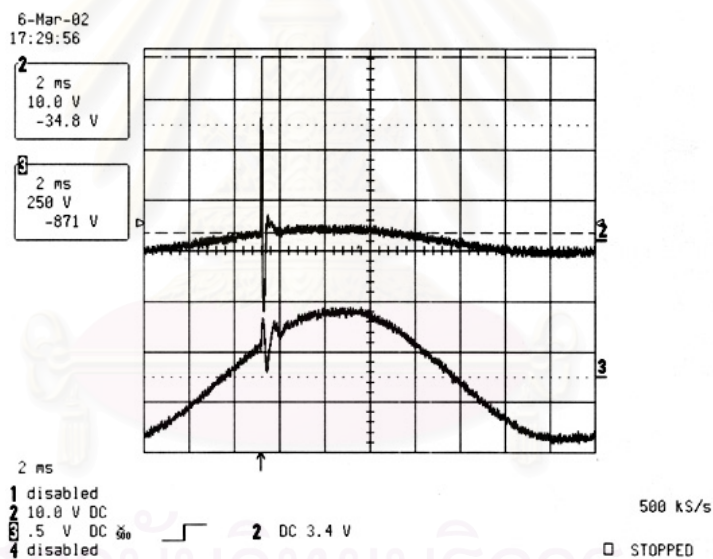


รูปที่ 4-24 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรตีปลิงและที่ผ่านเข้าระบบที่มุมประมาณ 240 องศา

รูปที่ 4-24 ค่าแรงดันสูงสุด คือ $5.38 \times 139 = 748 \text{ V}$ สำหรับแรงดันที่ผ่านเข้าระบบนั้นมีค่าน้อยมาก และเนื่องจากเราใช้โซลินอยด์ในการสวิตช์จึงมีโอกาสในการเกิดเลิร์จภายหลังการปล่อยอิมพัลส์ซึ่งเกิดเพราะหน้าสัมผัสของของ โซลินอยด์เกิดการสั่น

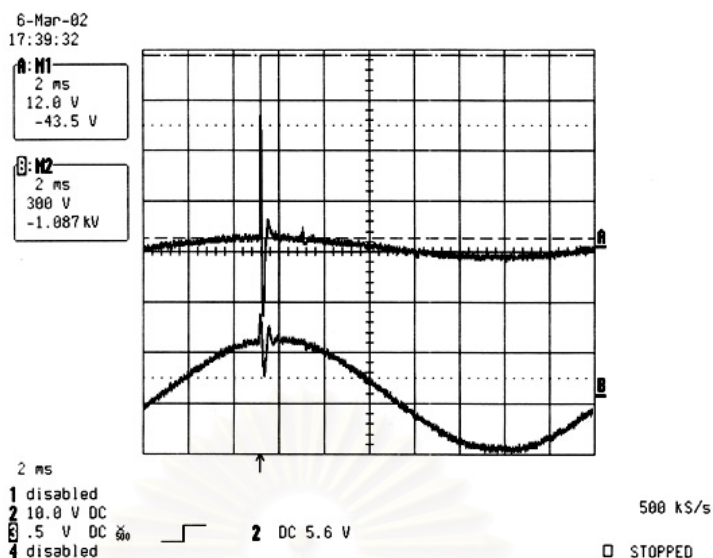


รูปที่ 4-25 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถัดดับลิงและที่ผ่านเข้าระบบที่มุ่มประมาณ 225 องศา



รูปที่ 4-26 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถัดดับลิงและที่ผ่านเข้าระบบที่มุ่มประมาณ 45 องศา

รูปที่ 4-25 แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่มุ่มประมาณ 225 องศา จากรูปค่าแรงดันสูงสุด คือ $26.2 \times 139 = 3.64 \text{ kV}$ และแรงดันที่ผ่านเข้าระบบ คือ 95 V คิดเป็น 2.6% รูปที่ 4-26 แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่มุ่มประมาณ 45 องศา และค่าแรงดันสูงสุด คือ $34.8 \times 139 = 4.84 \text{ kV}$ ในขณะที่แรงดันที่ผ่านเข้าระบบ คือ 150 V คิดเป็น 3.1%



รูปที่ 4-27 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถัดคัปปลิงและที่ผ่านเข้าระบบที่มุมประมาณ 90 องศา

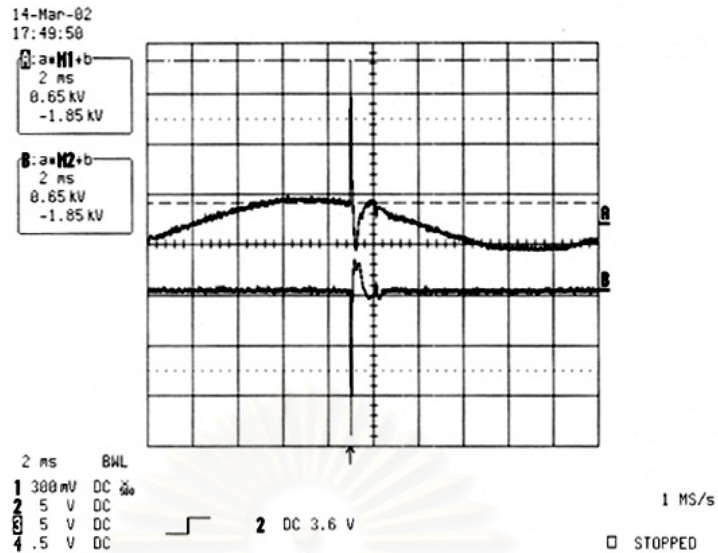
รูปที่ 4-27 นี้แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่มุมประมาณ 90 องศา และค่าแรงดันสูงสุด คือ $43.5 \times 139 = 6.05 \text{ kV}$ และค่าแรงดันที่ผ่านเข้าระบบ คือ 180 V คิดเป็น 3%

ตามมาตรฐานนั้นกำหนดค่าแรงดันเสิร์จที่จะเข้าระบบไว้ คือ “ค่าแรงดันเสิร์จจะสามารถผ่านเข้าไปสู่แหล่งจ่ายได้ไม่เกิน 15% ของค่าสูงสุดของแรงดันทดสอบขณะไม่ได้ต่ออุปกรณ์ทดสอบและแหล่งจ่ายไฟ หรือไม่เกินสองเท่าของค่าสูงสุดของแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ โดยให้ถือค่าที่สูงกว่าเป็นเกณฑ์” ซึ่งจะสังเกตว่าไม่ได้กำหนดไว้ในกรณีต่อแหล่งจ่ายไฟด้วย

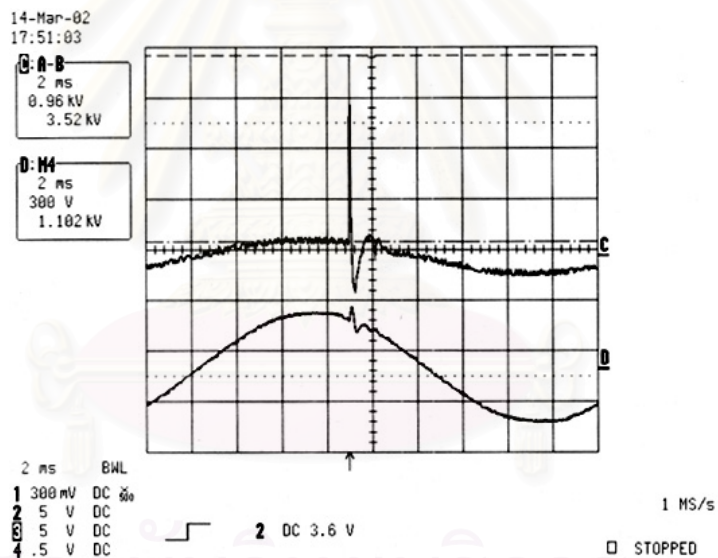
4.4.2 กรณีนอร์มัล

ในกรณีนอร์มัลนี้ทำการทดสอบตามรูปที่ 3-20 แต่เปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุวงจรถัดคัปปลิงเป็น $22.4 \mu\text{F}$ โดยทดลองที่ระดับแรงดันต่างๆ มุมเฟสต่างๆ ในการวัดเราจะวัดแรงดันที่ผ่านวงจรถัดคัปปลิงเข้ามาซึ่งก็คือ V_{LN} ในการวัดเราต้องใช้ดิโวลต์เมตรชนิดตัวเก็บประจุ 2 ชุดวัดแรงดัน V_{LG} และ V_{NG} แล้วจึงนำมาลบกัน ส่วนค่าแรงดันเสิร์จที่ผ่านวงจรถัดคัปปลิงเข้าสู่ระบบจะวัดโดยใช้ Differential Probe ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4-28 ถึง รูปที่ 4-35

รูปที่ 4-28 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถัดคัปปลิงรูปคลื่น A คือ V_{LG} และรูปคลื่น B คือ V_{NG} ซึ่งมีค่าแรงดันสูงสุดคือ 1.85 kV และ 1.89 kV ตามลำดับ ลักษณะของหางคลื่นจะไม่ค่อยเรียบเท่าที่ควรเป็นเพราะเราใช้โซลินอยด์ในการสวิตช์ ส่วนในรูปที่ 4-29 รูปคลื่น C คือ V_{LN} และรูปคลื่น D คือแรงดันที่ผ่านเข้าสู่ระบบ ซึ่งมีค่าแรงดันสูงสุด คือ 3.52 kV และ 102 V ตามลำดับ

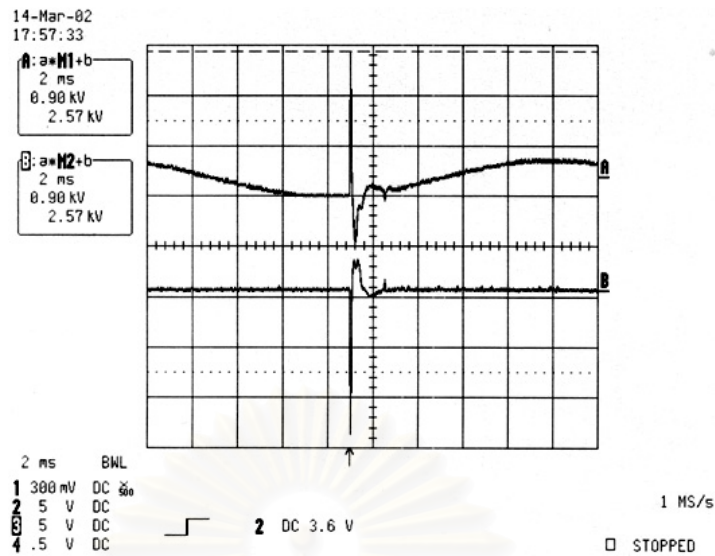


รูปที่ 4-28 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถัดไปถึง V_{LG} , V_{NG} ที่มุมประมาณ 110 องศา

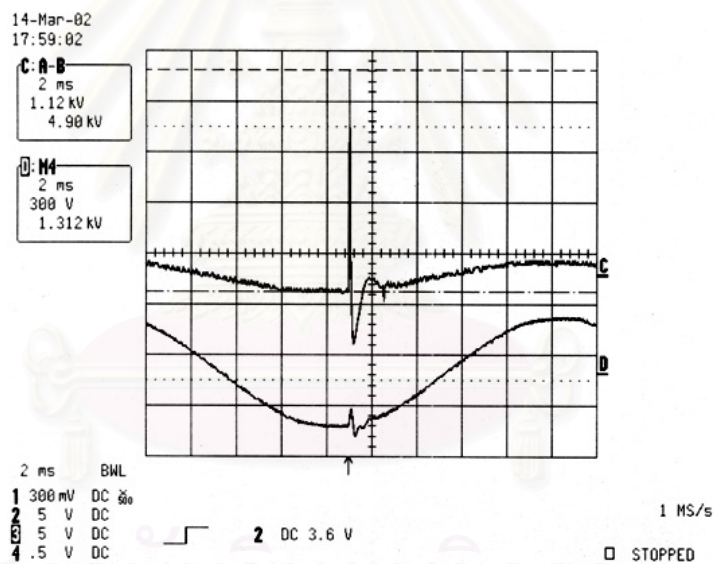


รูปที่ 4-29 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถัดไปถึง V_{LN} และที่ผ่านเข้าระบบที่มุมประมาณ 110 องศา

รูปที่ 4-30 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถัดไปถึงรูปคลื่น A คือ V_{LG} และรูปคลื่น B คือ V_{NG} ซึ่งมีค่าแรงดันสูงสุดคือ 2.57 kV และ 2.60 kV ตามลำดับ ส่วนในรูปที่ 4-31 รูปคลื่น C คือ V_{LN} และรูปคลื่น D คือแรงดันที่ผ่านเข้าสู่ระบบ ซึ่งมีค่าแรงดันสูงสุด คือ 4.90 kV และ 108 V ตามลำดับ

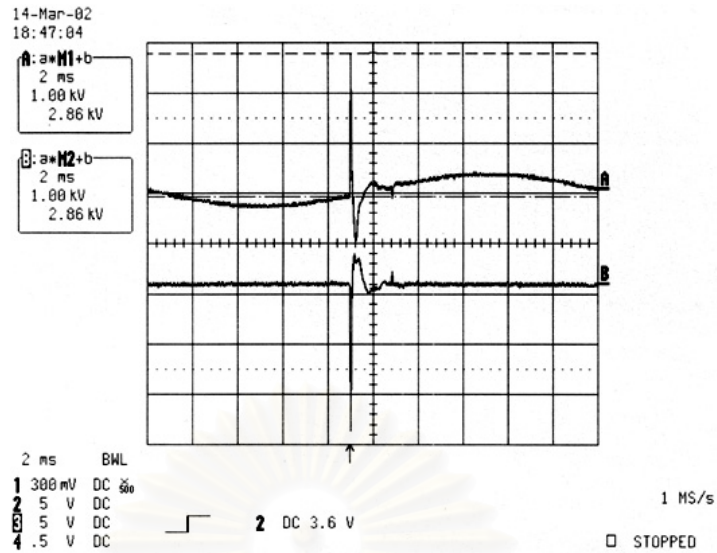


รูปที่ 4-30 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถัดไปถึง V_{LG} , V_{NG} ที่มุมประมาณ 270 องศา

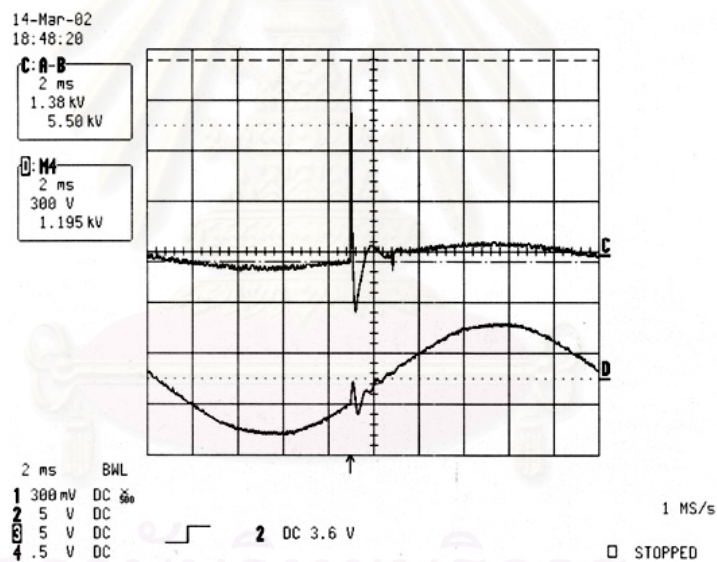


รูปที่ 4-31 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถัดไปถึง V_{LN} และที่ผ่านเข้าสู่ระบบที่มุมประมาณ 270 องศา

รูปที่ 4-32 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถัดไปถึงรูปคลื่น A คือ V_{LG} และรูปคลื่น B คือ V_{NG} ซึ่งมีค่าแรงดันสูงสุดคือ 2.86 kV และ 2.94 kV ตามลำดับ ส่วนในรูปที่ 4-33 รูปคลื่น C คือ V_{LN} และรูปคลื่น D คือแรงดันที่ผ่านเข้าสู่ระบบ ซึ่งมีค่าแรงดันสูงสุด คือ 5.50 kV และ 127 V ตามลำดับ

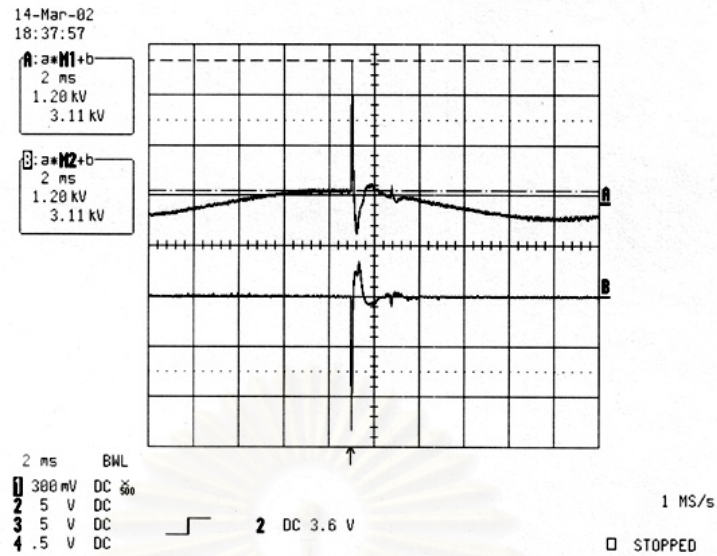


รูปที่ 4-32 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถัดไปถึง V_{LG} , V_{NG} ที่มุมประมาณ 0 องศา

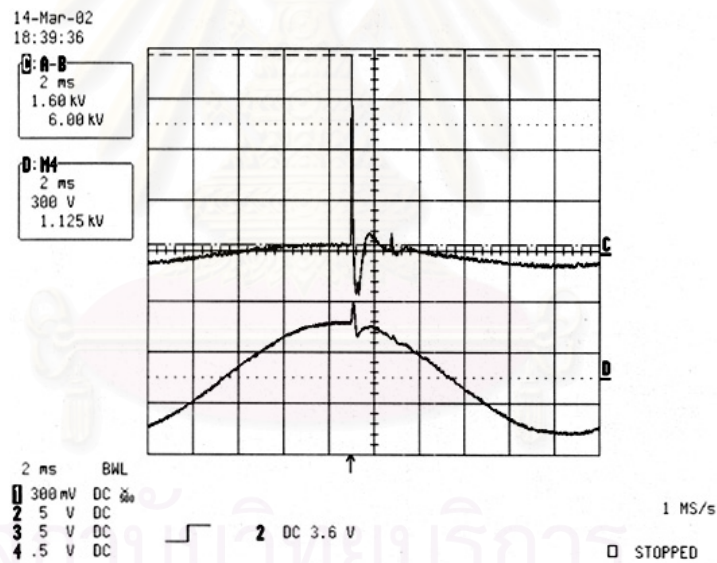


รูปที่ 4-33 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถัดไปถึง V_{LN} และที่ผ่านเข้าระบบที่มุมประมาณ 0 องศา

รูปที่ 4-34 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถัดไปถึงรูปคลื่น A คือ V_{LG} และรูปคลื่น B คือ V_{NG} ซึ่งมีค่าแรงดันสูงสุดคือ 3.11 kV และ 3.22 kV ตามลำดับ ส่วนในรูปที่ 4-33 รูปคลื่น C คือ V_{LN} และรูปคลื่น D คือแรงดันที่ผ่านเข้าสู่ระบบ ซึ่งมีค่าแรงดันสูงสุด คือ 6.00 kV และ 120 V ตามลำดับ



รูปที่ 4-34 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถัดดับถึง V_{LG} , V_{NG} ที่มุมประมาณ 90 องศา

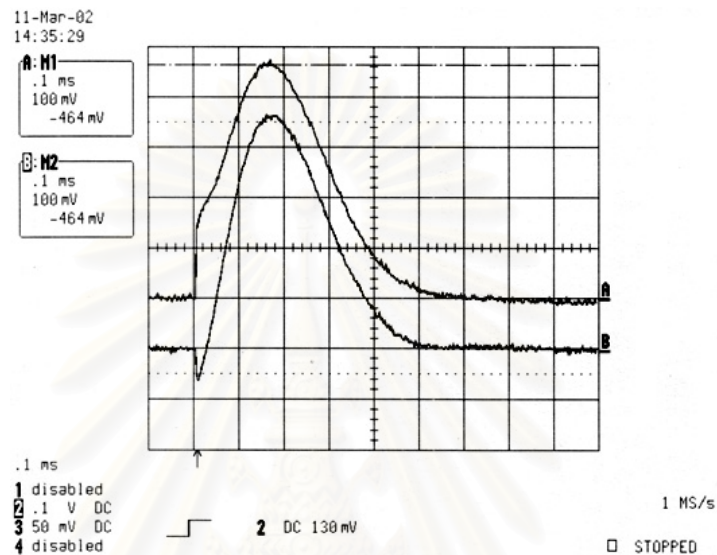


รูปที่ 4-35 : แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถัดดับถึง V_{LN} และที่ผ่านเข้าระบบที่มุมประมาณ 90 องศา

จากผลการทดลองจะเห็นว่าแรงดันเลิร์จที่เข้าระบบในขณะที่ต่อแหล่งจ่ายไฟด้วยนั้นจะมีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ไม่ต่อแหล่งจ่าย (หัวข้อที่ 4.1) และในการใช้โซลินอยด์ในการสวิตช์จะเกิดยอดแหลมขึ้นในช่วงหลังคลื่นได้และไม่สามารถควบคุมมุมเฟสในการสวิตช์ได้

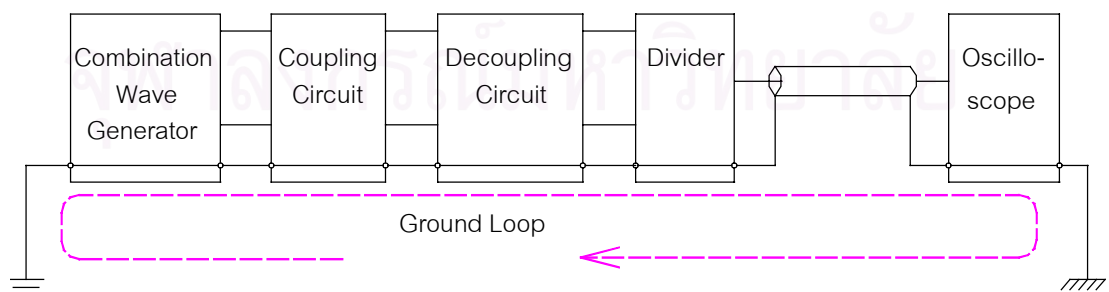
4.5 ผลของรูปแบบการต่อสายดิน

จากหัวข้อ 4.1 จะเห็นว่าในการวัดจะเกิดยอดแหลมทางลบชั่วคราว ซึ่งเกิดจากผลของการต่อสายดิน จะมีโอกาสเกิดได้ทั้งทางบวกและลบ ดังแสดงในรูปที่ 4-36 จะเห็นว่ารูปแรงดันที่วัดได้เสมือนมีรูปคลื่นอิมพัลส์ 1.2/50 μs เหนียวนาเข้ามาอาจจะเกิดขึ้นทางด้านบวกหรือลบก็ได้



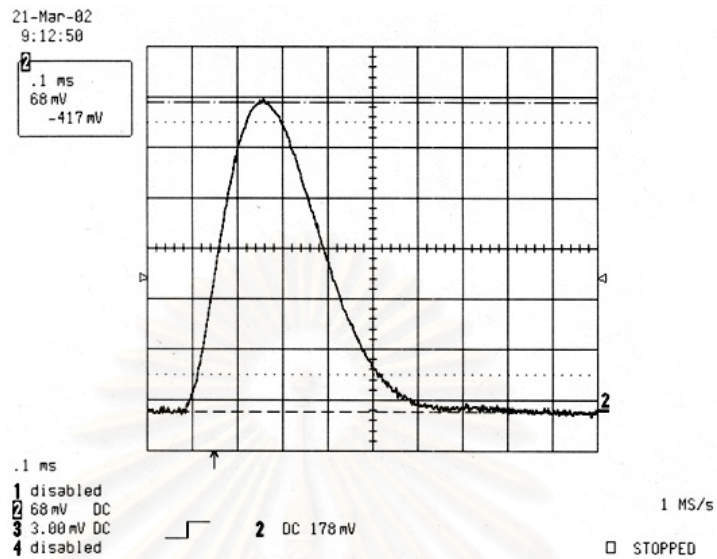
รูปที่ 4-36 : แสดงรูปคลื่นที่มีสัญญาณรบกวนในลักษณะต่างๆ

สัญญาณที่เกิดขึ้นเกิดจากระบบสายดินของการวัดเนื่องจากชุดทดสอบเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมนั้น เราต่อสายดินที่หนึ่งแต่ในขณะที่ที่ออสซิลโลสโคปก็ต่อสายดินจากระบบไฟ ซึ่งจะทำให้เกิดจากราวด์ลูป (Ground Loop) ดังรูปที่ 4-37 โดยปกติออสซิลโลสโคปนั้นจะต้องต่อผ่านหม้อแปลงขดลวดแยก โดยถ้าหม้อแปลงขดลวดแยกที่ใช้นั้นมีขั้วขาออกใช้ระบบสายดินร่วมกับกราวด์ของขั้วขาเข้าจะเกิดปัญหาราวด์ลูปนี้ขึ้น



รูปที่ 4-37 : แสดงการเกิดกราวด์ลูป (Ground Loop)

ในการทดลองได้ทดลองเปลี่ยนหม้อแปลงขดลวดแยกเป็นแบบที่ขั้วขาออกไม่ต่อสายดิน จะไม่เกิดปัญหานี้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4-38



รูปที่ 4-38 : แสดงรูปคลื่นที่วัดได้ในกรณีที่ใช้หม้อแปลงขดลวดแยกแบบขั้วขาออกไม่ต่อสายดิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การทดลองโดยใช้ SCR ในการสวิตช์

5.1 ลักษณะทั่วไปของ SCR

SCR เป็นไทรสเตอร์ (Thyristor) ชนิดหนึ่งซึ่งทำหน้าที่ในการสวิตช์วงจร สัญลักษณ์ของ SCR แสดงในรูปที่ 5-1 SCR จะมี 3 ขาคือ ขาเกต (Gate, G) ขาแอนโนด (Anode, A) และขาแคโทด (Cathode, K)



รูปที่ 5-1 : แสดงสัญลักษณ์ของ SCR

เราอาจอธิบายลักษณะการทำงานของ SCR โดยคร่าวๆ ได้ดังนี้

- 1) ถ้าแรงดัน $V_{GK} \leq 0$ จะไม่มีกระแสไหลผ่าน SCR แม้ว่าจะมีแรงดันบวกตกคร่อม V_{AK}
- 2) เมื่อแรงดัน V_{GK} มีค่าเป็นบวกถึงค่าค่าหรือเรียกว่า ระดับล้นไก SCR จะนำกระแสแรงดัน V_{AK} จะลดต่ำลง
- 3) เมื่อ SCR นำกระแสแล้วเราไม่สามารถใช้เกตเพื่อให้ SCR หยุดนำกระแสได้ SCR จะหยุดนำกระแสก็ต่อเมื่อ $V_{GK} <$ ระดับล้นไก และกระแสแอนโนดลดลงเป็นศูนย์ชั่วขณะหนึ่ง
- 4) ถ้าใช้แรงดันแอนโนด V_{AK} ค่าลบ SCR จะไม่นำกระแส

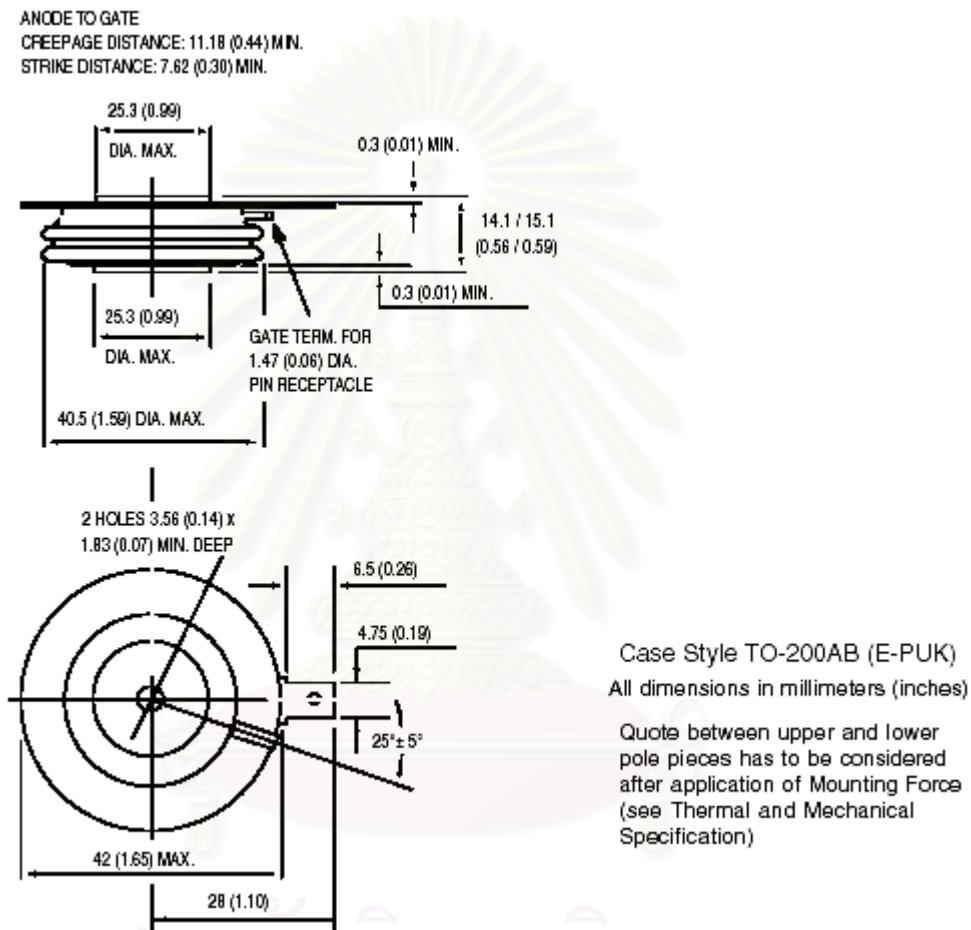
ส่วนสมรรถนะของ SCR นั้นสามารถมีแรงดันได้ถึง 8,000 V และมีกระแสได้ถึง 3,500 A เดียวทีเดียว และสามารถทนกระแสลัดวงจรได้สูงถึง 60 kA_{peak} ที่ความถี่ 50 Hz ในหนึ่งลูกคลื่น แต่ SCR ที่ใช้ในโครงงานนี้นั้นนอกจากจะต้องทนระดับแรงดันได้น้อย 7 kV และทนกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ s ที่ 3 kA ได้ ซึ่งข้อจำกัดทางกระแสนี้เป็นปัญหากับ SCR พอสมควรเพราะ SCR ส่วนใหญ่จะมีพิกัดของ di/dt ไม่สูงนัก สำหรับที่แรงดันอิมพัลส์ 8/20 μ s 3 kA นี้ควรจะมี di/dt อย่างน้อย 700 A/ μ s

SCR ที่สามารถหาได้และมีขายในประเทศนั้น มีขนาดแรงดันพิกัดที่ 1.6 kV สามารถทนกระแสลัดวงจรได้สูงถึง 8 kA ที่ความถี่ 50 Hz ในหนึ่งลูกคลื่น มีพิกัด di/dt สูงถึง 1,000 A/ μ s คือ

SCR เบอร์ ST330C16C1 ในโครงการนี้ได้ใช้ SCR เบอร์นี้ในการทดลอง และในหัวข้อถัดไปจะพูดถึงข้อจำกัดการใช้ SCR เบอร์นี้

5.2 ลักษณะและการใช้งานทางกลของ SCR เบอร์ ST330C16C1

SCR เบอร์ ST330C16C1 นี้มีรูปร่างลักษณะตามรูปที่ 5-2



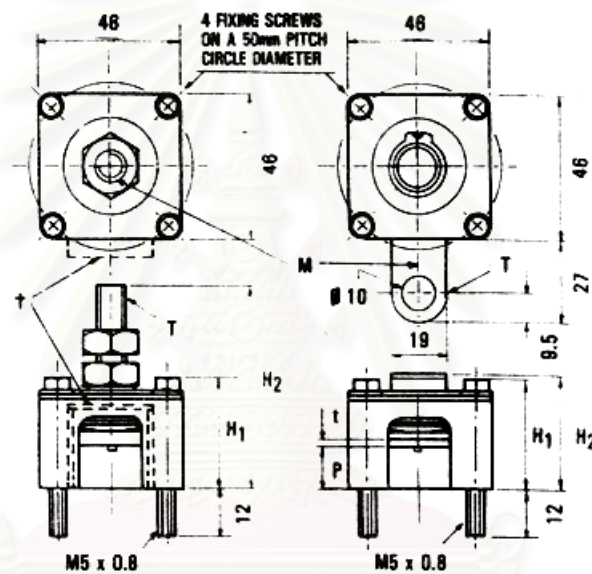
รูปที่ 5-2 : แสดงรูปร่างลักษณะของ SCR เบอร์ ST330C16C1

ซึ่งในการใช้งาน SCR ที่มีตัวถังเป็นกระเบื้องแบบนี้โดยปกติจะต้องมีชุดประกอบยึดติดกับฮีทซิงค์ (Heatsinks) และต้องระวังเรื่องแรงที่กดลงบนตัว SCR ด้วย เพราะถ้าแรงอัดไม่พอจะทำให้ไม่สามารถใช้งานที่พิกัดเต็มที่ได้ โดยปกติถ้า SCR ชนิดนี้ไม่มีแรงอัดเราอาจจะไม่สามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ เพราะฉะนั้นถ้าเราต้องการตรวจสอบอิมพีแดนซ์เพื่อต้องการทราบว่า SCR ยังคงสภาพอยู่หรือเปล่าเราต้องติดตั้งในชุดประกอบแล้วค่อยวัด ในขณะที่เดียวกันถ้าแรงอัดสูงเกินไปก็อาจจะทำให้เกิดการเสียหายได้ ซึ่งค่าพิกัดทางอุณหภูมิ และทางกลนี้แสดงในตารางที่ 5-1 นี้

ตารางที่ 5-1 : แสดงพิกัดทางอุณหภูมิ และทางกล

Thermal and Mechanical Specification

Parameter	ST300C..C	Units	Conditions
T _J Max. operating temperature range	-40 to 125	°C	
T _{stg} Max. storage temperature range	-40 to 150		
R _{thj-hs} Max. thermal resistance, junction to heatsink	0.09 0.04	K/W	DC operation single side cooled DC operation double side cooled
R _{thc-hs} Max. thermal resistance, case to heatsink	0.02 0.01		DC operation single side cooled DC operation double side cooled
F Mounting force, ± 10%	9800 (1000)	N (Kg)	
wt Approximate weight	83	g	
Case style	TO - 200AB (E-PUK)		See Outline Table



Type	H ₁	H ₂	t	P	Marking*	Terminal - T
K22 - 0276	35	65	—	14	A	Stud - M10 x 1.5
K22 - 0287	35	39	3.2	14	A	Lug
K22 - 0311	30	51	—	14	A	Stud - M8 x 1.25
K22 - 0323	35	65	—	15	E	Stud - M10 x 1.5
K22 - 0328	35	39	2.4	15	E	Lug
K22 - 0348	30	51	—	15	E	Stud - M8 x 1.25

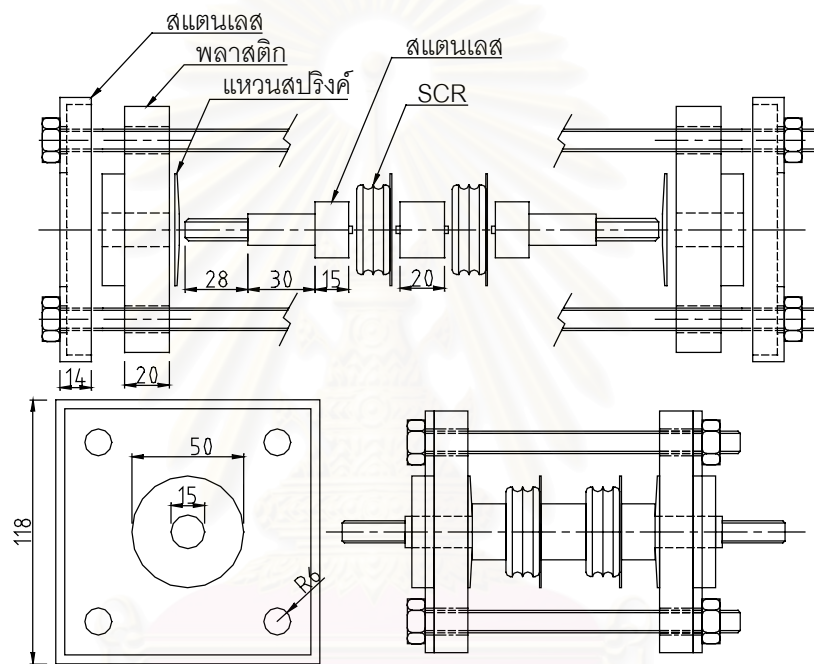
* Marking on top of stud and lug to indicate puk outline.

รูปที่ 5-3 : แสดงชุดประกอบของ SCR

ในการใช้งาน SCR นี้เพียงตัวเดียวเราจะใช้ ชุดประกอบของ SCR ที่ใช้ประกอบกับฮีทซิงค์ ซึ่งพิกัดของกระแสใช้งานจะขึ้นกับการต่อฮีทซิงค์ด้วย คือ ถ้าเราต่อฮีทซิงค์เพียงข้างเดียวก็จะได้ พิกัดกระแสใช้งานค่าหนึ่งในขณะที่ถ้าเราต่อฮีทซิงค์ประกบทั้งสองข้างก็จะได้พิกัดกระแสที่สูงขึ้น เรายังชุดประกอบนี้มาประกอบบนแผ่นอลูมิเนียมแทนฮีทซิงค์ เพราะการการใช้งานของเราเป็นพัลส์ซึ่ง SCR จะไม่ร้อนจึงไม่จำเป็นต้องต่อกับฮีทซิงค์

ในชุดประกอบ SCR นั้นจะมีแหวนสปริงซ้อนกันอยู่ 3 วงเพื่อกระจายแรง ในขณะที่โครงภายนอกก็ทำหน้าที่ป้องกันระยะหดตัวของแหวนสปริง ไม่ให้หดเกินระยะหนึ่ง เพื่อไม่ให้แรงที่กด SCR เกินค่าที่กำหนด ซึ่งจากตารางที่ 5-1 ค่าแรงกดที่กำหนด คือ $9,800$ นิวตัน $\pm 10\%$

สำหรับการใช้งาน SCR พร้อมกันมากกว่าหนึ่งตัวเราจะออกแบบดังรูปที่ 5-4 (ในรูปแบบแสดงการต่อ SCR 2 ชุด ในกรณีที่มีมากกว่านี้ก็ใช้วิธีเดียวกัน) ในการต่อแบบนี้สิ่งที่ต้องระวัง คือ เราต้องขันน็อตแต่ละตัวเท่าๆ กันมิฉะนั้นจะเอียง และในการขันน็อตต้องระวังเรื่องแรงด้วยเพราะถ้าขันแน่นมาก แรงอัดในตัว SCR อาจจะเกินค่าพิกัด อาจทำให้ SCR เกิดความเสียหายได้



รูปที่ 5-4 : แสดงชุดประกอบในกรณีใช้ SCR หลายตัว

5.3 พิกัดต่างๆ และการป้องกันของ SCR เบอร์ ST330C16C1

พิกัดแรงดันของ SCR นี้คือ 1,600 V และค่ากระแสรั่วสูงสุด (ที่อุณหภูมิสูงสุด) คือ 50 mA ส่วนค่าต่างๆ ในสภาวะนำกระแส และไม่นำกระแส แสดงในตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 : แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในสภาวะนำกระแสและไม่นำกระแสของ SCR

On-state Conduction

Parameter	ST330C..C	Units	Conditions
$I_{T(AV)}$ Max. average on-state current @ Heatsink temperature	720 (350)	A	180° conduction, half sine wave
	55 (75)	°C	double side (single side) cooled
$I_{T(RMS)}$ Max. RMS on-state current	1420		DC @ 25°C heatsink temperature double side cooled
I_{TSM} Max. peak, one-cycle non-repetitive surge current	9000	A	t = 10ms No voltage
	9420		t = 8.3ms reapplied
	7570		t = 10ms 100% V_{RRM}
	7920		t = 8.3ms reapplied
I^2t Maximum I^2t for fusing	405	KA ² s	t = 10ms No voltage
	370		t = 8.3ms reapplied
	287		t = 10ms 100% V_{RRM}
	262		t = 8.3ms reapplied
$I^2\sqrt{t}$ Maximum $I^2\sqrt{t}$ for fusing	4050	KA ² √s	t = 0.1 to 10ms, no voltage reapplied
$V_{T(TH)}$ Low level value of threshold voltage	0.91	V	$(16.7\% \times \pi \times I_{T(AV)} < I < \pi \times I_{T(AV)})$, $T_J = T_J \text{ max.}$
$V_{T(TH)}$ High level value of threshold voltage	0.92		$(I > \pi \times I_{T(AV)})$, $T_J = T_J \text{ max.}$
r_{TH} Low level value of on-state slope resistance	0.58	mΩ	$(16.7\% \times \pi \times I_{T(AV)} < I < \pi \times I_{T(AV)})$, $T_J = T_J \text{ max.}$
r_{TH} High level value of on-state slope resistance	0.57		$(I > \pi \times I_{T(AV)})$, $T_J = T_J \text{ max.}$
V_{TM} Max. on-state voltage	1.96	V	$I_{pk} = 1810A$, $T_J = T_J \text{ max.}$, $t_p = 10ms$ sine pulse
I_H Maximum holding current	600	mA	$T_J = 25^\circ C$, anode supply 12V resistive load
I_L Typical latching current	1000		

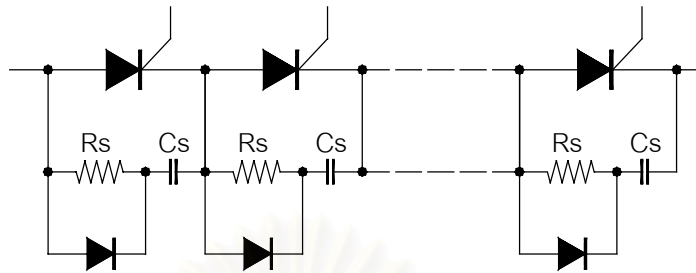
Blocking

Parameter	ST330C..C	Units	Conditions
dv/dt Maximum critical rate of rise of off-state voltage	500	V/μs	$T_J = T_J \text{ max.}$ linear to 80% rated V_{DRM}
I_{RRM} / I_{DRM} Max. peak reverse and off-state leakage current	50	mA	$T_J = T_J \text{ max.}$ rated V_{DRM}/V_{RRM} applied

ค่า dv/dt นั้นถ้ามีค่าสูงเกินค่าพิกัดแล้วอาจจะทำให้ SCR อยู่ในสภาวะนำกระแส และอาจเกิดความเสียหายได้ ซึ่งค่า dv/dt นี้จะเกิดได้จากหลายๆ กรณีเช่น ในขณะที่เปิดเบรกเกอร์ผ่านหม้อแปลง ในขณะที่ปิดเบรกเกอร์ หรือเกิดจากกรณีที่ใช้ SCR อนุกรมกันหลายๆ ตัวแต่ SCR แต่ละตัวทำงานไม่พร้อมกันแม้จะสั่งด้วยสัญญาณที่พร้อมกันก็ตาม

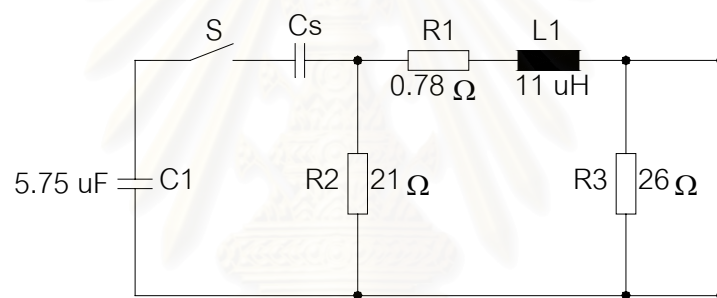
สำหรับการป้องกัน dv/dt นี้เราป้องกันด้วยการติดตั้งวงจร snubber (Snubber Circuit) ในการออกแบบสำหรับวงจรปิดป้องกันทั่วไปแสดงในรูปที่ 5-5 เมื่อเกิดแรงดันเพิ่มขึ้นกระแสจะไหลผ่าน

ไดโอดพื้ในตัวเร็วเข้าชาร์จตัวเก็บประจุ C_s ทำให้ C_s จะทำหน้าที่ป้องกัน dv/dt ในขณะที่เมื่อ SCR ทำงานประจุจาก C_s จะคายผ่าน R_s ผ่าน SCR



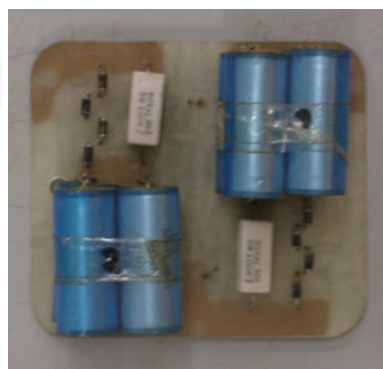
รูปที่ 5-5 : แสดงวงจรปิดป้องกันสำหรับป้องกัน SCR

สำหรับการหาค่า C_s นั้นหาจากการ Simulate วงจรโดยคิดในกรณีที่เลวร้ายที่สุด คือ ตัวอื่นทำงานหมดมีอยู่หนึ่งตัวยังไม่ทำงานวงจร Simulate แสดงในรูปที่ 5-6



รูปที่ 5-6 : แสดงวงจร Simulate หาค่า C_s ในกรณีเลวร้ายที่สุด

จากผลการ Simulate ถ้าเราชาร์จประจุ C_1 ที่ 3 kV ค่า C_s ที่ได้คือ 0.4 μF ถ้าชาร์จประจุที่ 6.3 kV จะได้ค่า C_s คือ 0.9 μF สำหรับพิกัดแรงดันของ C_s นั้นเลือกที่ 2 kV เพราะว่าแรงดันพิกัดของ SCR คือ 1.6 kV แรงดันคร่อม C_s ก็จะไม่มากกว่านี้



รูปที่ 5-7 : แสดงวงจรสับเบออร์ที่สร้างเสร็จแล้ว

ส่วนค่าความต้านทานนั้นคิดจากเมื่อเวลา SCR ทำงาน C_s จะคายประจุค่าความต้านทานนี้จะจำกัดค่ากระแสคายประจุนี้ ออกแบบที่ประมาณ 20 mA และจากแรงดันพิกัด C_s คือ 2 kV จะได้ค่าความต้านทาน คือ 100 k Ω

5.4 วงจรการลั่นไก SCR (Triggering)

สำหรับข้อมูลการลั่นไกของ SCR เบอร์ ST330C16C แสดงในตารางที่ 5-3 ในการส่งสัญญาณลั่นไกให้ขาเกตของ SCR นั้นก็มีข้อจำกัดหลายอย่าง ที่สำคัญคือ ค่า $+V_{GM}$, I_{GM} และ P_{GM} ซึ่งถ้าสูงกว่าค่าที่กำหนดนี้อาจทำให้เกิดความเสียหายได้

ตารางที่ 5-3 : แสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ของการลั่นไก SCR

Triggering

Parameter	ST330C..C	Units	Conditions
P_{GM} Maximum peak gate power	10.0	W	$T_J = T_J \text{ max, } t_p \leq 5\text{ms}$
$P_{G(AV)}$ Maximum average gate power	2.0		$T_J = T_J \text{ max, } f = 50\text{Hz, } d\% = 50$
I_{GM} Max. peak positive gate current	3.0	A	$T_J = T_J \text{ max, } t_p \leq 5\text{ms}$
$+V_{GM}$ Maximum peak positive gate voltage	20	V	$T_J = T_J \text{ max, } t_p \leq 5\text{ms}$
$-V_{GM}$ Maximum peak negative gate voltage	5.0		
I_{GT} DC gate current required to trigger	TYP.	MAX.	$T_J = -40^\circ\text{C}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$ $T_J = 125^\circ\text{C}$ Max. required gate trigger/ current/voltage are the lowest value which will trigger all units 12V anode-to-cathode applied
	200	-	
	100	200	
V_{GT} DC gate voltage required to trigger	2.5	-	$T_J = -40^\circ\text{C}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$ $T_J = 125^\circ\text{C}$
	1.8	3.0	
	1.1	-	
I_{GD} DC gate current not to trigger	10	mA	$T_J = T_J \text{ max}$ Max. gate current/voltage not to trigger is the max. value which will not trigger any unit with rated V_{DRM} anode-to-cathode applied
V_{GD} DC gate voltage not to trigger	0.25	V	

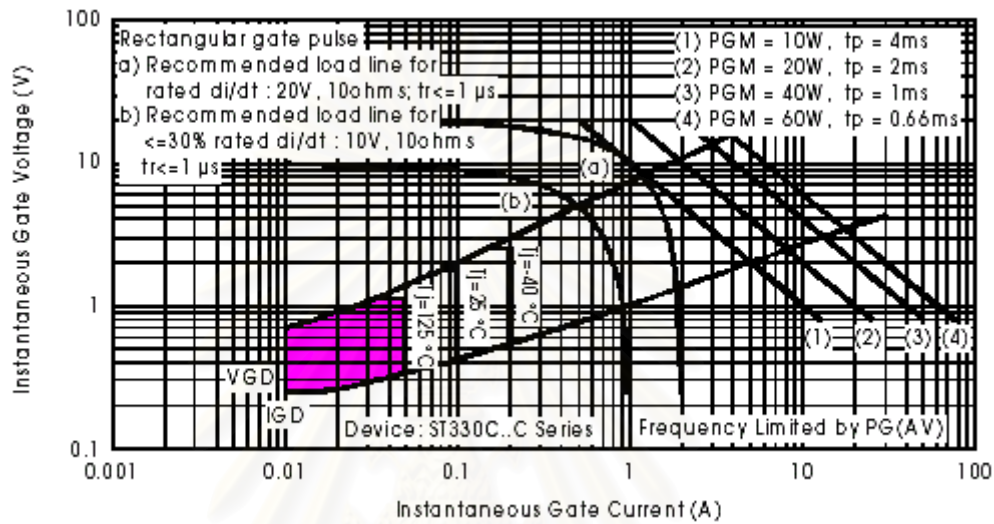
Switching

Parameter	ST330C..C	Units	Conditions
di/dt Max. non-repetitive rate of rise of turned-on current	1000	A/ μs	Gate drive 20V, 20 Ω , $t_r \leq 1\mu\text{s}$ $T_J = T_J \text{ max, anode voltage} \leq 80\% V_{DRM}$
t_d Typical delay time	1.0	μs	Gate current 1A, $di/dt = 1\text{A}/\mu\text{s}$ $V_d = 0.67\% V_{DRM}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$
t_q Typical turn-off time	100		$I_{TM} = 550\text{A, } T_J = T_J \text{ max, } di/dt = 40\text{A}/\mu\text{s, } V_R = 50\text{V}$ $dv/dt = 20\text{V}/\mu\text{s, Gate } 0\text{V } 100\Omega, t_p = 500\mu\text{s}$

ในการออกแบบวงจรลั่นไก โดยปกติการลั่นไกนั้นเราจะส่งสัญญาณเป็นพัลส์ไปที่ขาเกต ในการออกแบบเราจะดูจากกราฟลักษณะทั่วไปของเกต ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5-8 ในการใช้งานในวงจร

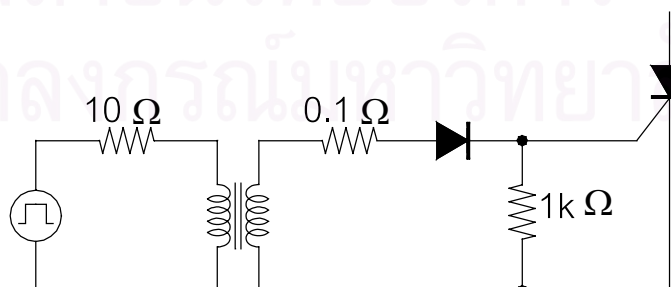
งานนี้เป็นลักษณะพัลส์จะใช้งานที่พิกัด di/dt ดังนั้นค่าที่แนะนำคือ 20 V 10 Ω (ในตารางที่ 5-3 ที่ช่อง di/dt นั้นจะแนะนำที่ 20 V 20 Ω) และที่สำคัญคือค่าความชันหน้าคลื่น ต้องไม่เกิน 1 μ s

สำหรับค่า PGM คือค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเกต ซึ่งปกติเกตจะรับพลังงานสูงสุดได้ที่ค่าค่าหนึ่ง ดังนั้นค่ากำลังงานสูงสุดจึงแปรตามความกว้างของพัลส์ที่ป้อนให้ขาเกต ถ้าพัลส์แคบกำลังงานพิกัดจะสูง จะสังเกตได้ว่า $PGM \times t_p$ จะมีค่าเท่ากัน



รูปที่ 5-8 : แสดงกราฟลักษณะทั่วไปของเกต

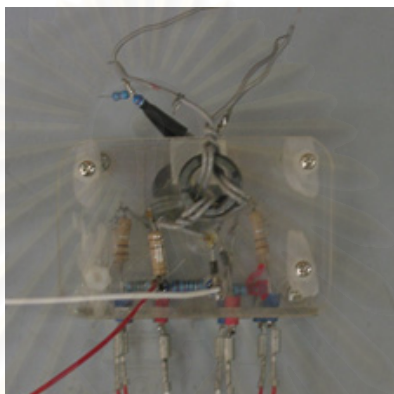
ในการออกแบบวงจรใช้นั้นเนื่องจากเราต้องใช้ SCR ถึง 5 ตัวในการสวิตช์ ในการสั่งให้ SCR ทำงานพร้อมกันนั้นจึงต้องใช้หม้อแปลงช่วย โดยหม้อแปลงที่ใช้จำเป็นต้องเป็น หม้อแปลงพัลส์ (Pulse Transformer) คือสามารถให้รูปสัญญาณที่หน้าคลื่นชันได้ ($t_r \leq 1 \mu s$) และในการออกแบบนี้ พัลส์ที่ไปสั่ง SCR ทำงานก็ต้องเป็นพัลส์แคบๆ เพราะขาออกของเราเป็นอิมพัลส์ซึ่งไม่กว้างมากเช่นกัน ในการออกแบบนี้ผู้ทำวิจัยออกแบบที่ความกว้างพัลส์ประมาณ 6-10 μ s



รูปที่ 5-9 : แสดงวงจรลั่นไก SCR

สำหรับหม้อแปลงพัลส์นี้ออกแบบโดยใช้แกนเฟอร์ไรท์ (Ferrite) วงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร โดยพันด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิด้านละ 3 รอบ (เพราะต้องการให้พัลส์แคบและชัน) พันให้ชิดลวดทั้งสองด้านใกล้กันมากที่สุดเพื่อลดฟลักซ์แม่เหล็กรั่ว

วงจรล้นไกแสดงในรูปที่ 5-9 เราใส่ไดโอดเพื่อป้องกันกระแสไหลย้อนกลับเข้าขาเกต และใส่ตัวต้านทาน $1\text{ k}\Omega$ เพื่อช่วยในการคายประจุที่รอยต่อภายในของ SCR สำหรับตัวต้านทาน $0.1\ \Omega$ ต่อไวเพื่อใช้วัดดูรูปคลื่นกระแส



รูปที่ 5-10 : แสดงวงจรล้นไกที่สร้างเสร็จแล้ว

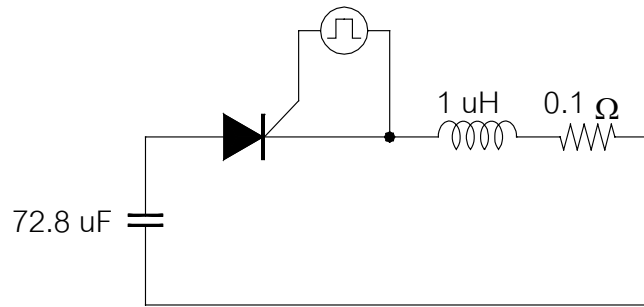
สำหรับสวิตช์คัตนั้นถ้าใช้ในการขับให้ทำงานโดยตรงอาจจะมียอดแหลม (Spike) ในช่วงแรกซึ่งอาจจะทำให้การทำงานของ SCR เพี้ยนไปได้สำหรับวงจรล้นไกจึงต้องมีวงจรเพื่อลดยอดแหลม และต้องควบคุมความกว้างพัลส์เพื่อไม่ให้พัลส์กว้างเกินไป

5.5 ผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดลอง ข้อผิดพลาดต่างๆ ที่ได้ทำมาเพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาการใช้ SCR ในการสวิตช์ต่อไป

5.5.1 ทดลองอิมพัลส์กระแส $8/20\ \mu\text{s}$ ที่ 3 kA

การทดลองนี้ทดลองเพื่อดูว่า SCR สามารถทนกระแสอิมพัลส์ $8/20\ \mu\text{s}$ ที่ 3 kA และตัวเก็บประจุในวงจรหลักสามารถให้กระแสอิมพัลส์ที่ 3 kA ได้หรือเปล่า โดยการใช้ตัวเก็บประจุของวงจรหลัก 1 ชุด ค่าความจุ $72.8\ \mu\text{F}$ ค่าความต้านทาน $0.1\ \Omega$ โห้ม และค่าความเหนี่ยวนำ $1\ \text{ไมโครเฮนรี}$ โดยชาร์จแรงดันที่ $630\ \text{V}$ จะได้อิมพัลส์กระแส $8/20\ \mu\text{s}$ 3 kA

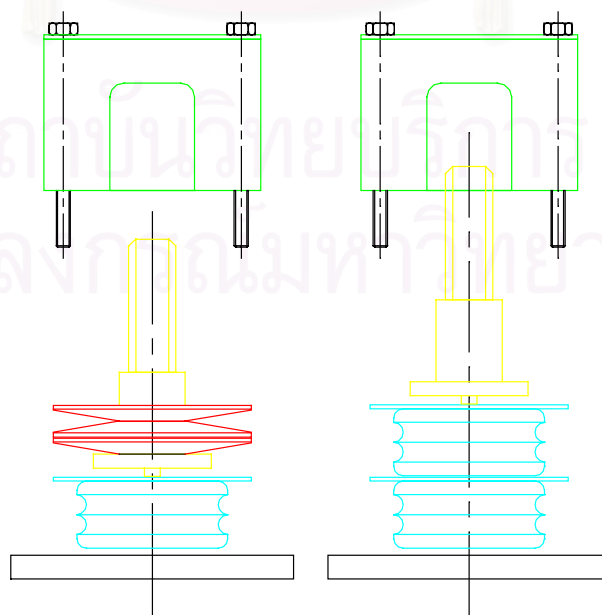


รูปที่ 5-11 : แสดงวงจรอิมพัลส์กระแส

ซึ่งในการทดลองนี้ SCR เบอร์ ST330C16C1 นี้สามารถทนกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs ที่ 3 kA ได้ และได้ทำการทดลองโดยให้ป้อนอิมพัลส์ต่อเนื่อง 15 ครั้ง แต่แต่ละครั้งห่างกัน 1 นาที SCR ก็สามารถทนได้

5.5.2 การทดลองโดยใช้ SCR หลายตัว

สำหรับการทดลองโดยใช้ SCR หลายตัวนั้นในครั้งแรกได้ใช้ SCR 2 ตัวต่อในชุดประกอบแบบตัวเดียวตามรูปที่ 5-12 โดยเอาแหวนสปริงค้ออก เพื่อให้สามารถใส่ SCR ได้สองตัว และในการทดลองนี้ได้ทดลองกับวงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม ทดลองในกรณีเปิดวงจร ในการทดลองใช้งานครั้งแรกนั้น ป้อนแรงดันประมาณ 800 V สามารถใช้งานได้ปกติ ครั้งที่สองป้อนแรงดัน 1,600 V ยังคงใช้งานได้ตามปกติ ได้รูปคลื่นแรงดันตามมาตรฐาน แต่ในการป้อนครั้งที่สามนั้นไม่สามารถป้อนแรงดันให้ตัวเก็บประจุได้ ตรวจสอบดูจึงรู้ว่า SCR เกิดเสียหายไปแล้ว



รูปที่ 5-12 : แสดงการใช้ SCR สองตัวในชุดประกอบ

จากผลที่ได้นี้เมื่อมาวิเคราะห์ดูแล้ว เห็นว่าในการใช้ชุดประกอบแบบตัวเดียวแล้วเอามาใส่ SCR สองตัวต้องเอาแหวนสปริงค้ออก และเมื่อใส่ SCR ไปสองตัวก็จะสูงเกินชุดประกอบ และเมื่อขันน็อตเพื่อให้แน่นนั้นแรงทั้งหมดจะไปกดทับที่ตัว SCR และเมื่อไม่มีจึงไม่สามารถจำกัดแรงที่กดลงบนตัว SCR ได้จึงทำให้แรงกดบนตัว SCR เกินค่าแรงกดพิคัดทำให้ SCR เสียหาย ในขณะเดียวกันชุดประกอบก็เกิดรอยร้าวด้วย เพราะไม่มีแหวนสปริงค้อในการกระจายแรง และในการทดลองนี้ผู้ทดสอบไม่ได้ติดตั้งวงจรสับเบออร์ ซึ่งอาจเป็นผลจาก dv/dt

ในการทดลองต่อมาเราใช้ชุดประกอบที่ออกแบบเอง (รูปที่ 5-4) ในการทดลอง โดยทดลองใช้ SCR สองตัวก่อน ติดตั้งวงจรสับเบออร์ซึ่งสามารถใช้งานได้ตามปกติ ทดลองโดยเพิ่มแรงดันขึ้นเรื่อยๆ จาก 500 V ถึง 3 kV ซึ่งสามารถทำงานได้ตามปกติ สำหรับวงจรล้นโกช่วงนี้ใช้เพียงสวิตช์กดติดปล่อยดับสั่งทำงานจากแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 20V ผ่านตัวต้านทานขนาด 20 โอห์ม ผ่านหม้อแปลงพัลส์เพื่อแยกวงจร

ในการทดลองต่อมาได้ทำการเพิ่ม SCR เป็น 4 ชุดโดยใช้ชุดประกอบที่ออกแบบเอง ขณะที่วงจรล้นโกใช้สวิตช์กดติดปล่อยดับส่งสัญญาณผ่าน IC เบออร์ MC14490P ทำหน้าที่ลดยอดแหลมเนื่องมาจากหน้าสัมผัสของสวิตช์กดติดปล่อยดับ ในขณะเดียวกันก็ทำหน้าที่ควบคุมความกว้างของพัลส์ด้วย จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ไปผ่านวงจรขยายเพื่อให้สามารถขับขาเกตของ SCR ได้พร้อมกัน 4 ตัว ก่อนการทดลองจริงได้ทำการตรวจสอบลักษณะรูปคลื่นแรงดันและกระแสซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของ SCR ขณะที่ SCR ทั้ง 4 ชุดก็ติดตั้งวงจรสับเบออร์ด้วยแต่ยังคงใช้ชุดเดียวกับในการทดลองที่ใช้ SCR 2 ชุด ทดลองโดยเพิ่มแรงดันขึ้นเรื่อยๆ จาก 1.0 kV เพิ่มขึ้นถึง 4.5 kV ใช้งานได้ตามปกติ ในขณะที่จะเพิ่มแรงดันถึง 5.0 kV เกิดเสียงระเบิดขึ้นรูปคลื่นที่วัดได้เป็นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เป็นรูปคลื่นตัดที่หลังคลื่น และเมื่อตรวจสอบสภาพการทำงาน of SCR ก็เกิดเสียหายสภาพการทำงานแล้วทั้ง 4 ตัว สำหรับการวิเคราะห์ในกรณีนี้คิดว่า อาจจะเป็นไปได้ 2 กรณี คือ

1) ในการทดลองครั้งนี้ยังไม่ได้ตรวจสอบเรื่องแรงกดบน SCR ในช่วงแรกอาจจะยังใช้งานได้ และเมื่อทดสอบไปเรื่อยๆ ผลของแรงกดที่มากไปจะทำให้ SCR ค่อยๆ เสียสภาพไป

2) การแบ่งแรงดันใน SCR ไม่ดี ทำให้มี SCR บางตัวรับแรงดันมากเกินไปเกิดและเกิดเบรคดาวน เมื่อเกิดเบรคดาวนเพียงตัวเดียวก็ทำให้ตัวอื่นๆ รับแรงดันเกินและเกิดเบรคดาวนตามกันมา เพราะในการทดลองยังไม่ได้ออกแบบวงจรแบ่งแรงดันที่ดีพอ เพราะกระแสรั่วสูงสุดของ SCR มีค่าสูง ถึง 50mA ถ้าจะออกแบบให้แบ่งแรงดันที่ดีต้องออกแบบให้มีกระแสไหลผ่านตัวต้านทานแบ่งแรงดันสูงกว่าค่ากระแสรั่วนี้มาก

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลองเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสม

จากผลการทดสอบ เครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้ดี ใช้งานได้ตั้งแต่ระดับแรงดัน 0.5 kV ถึง 6.0 kV และระดับกระแส 0.25 kA ถึง 3.0 kA โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดประมาณ 2.06 โอห์ม รูปคลื่นแรงดันที่วัดได้มีค่าเวลาหน้าคลื่น T_1 ประมาณ 1.40 μs ถึง 1.45 μs และช่วงเวลาหลังคลื่น T_2 ประมาณ 52.5 μs ถึง 53.6 μs ส่วนรูปคลื่นกระแสช่วงเวลาหน้าคลื่นที่วัดได้ T_1 ประมาณ 8.37 μs ถึง 8.50 μs และมีช่วงเวลาหลังคลื่น T_2 ประมาณ 20.5 μs ถึง 22 μs จากค่าที่ได้นี้จะเห็นว่าช่วงเวลาหน้าคลื่นแรงดันนั้นมากกว่า 1.2 μs อยู่มาก แต่ยังคงอยู่ในมาตรฐานซึ่งกำหนดไว้ได้ถึง 1.56 μs เนื่องจากว่าเครื่องกำเนิดอิมพัลส์นี้ยังคงใช้การสวิตช์โดยวิธีทางกล คือใช้โซลินอยด์ในการขับทรงกลมให้หน้าสัมผัสมาชนกันซึ่งการใช้สวิตช์ทางกลนี้จะง่ายในการออกแบบแต่จะมีผลเสีย คือ

- 1) ไม่สามารถควบคุมมุมเฟสในการทำงานได้
- 2) รูปคลื่นจะเกิดยอดแหลมซึ่งเกิดจากการสั่นของหน้าสัมผัส
- 3) รูปคลื่นกระแสจะเกิดการแกว่ง (แม้ผลการทดลองจะไม่เกิดการแกว่งในบางครั้ง)
- 4) มีเสียงดัง และทำให้เกิดการสั่นสะเทือน

จะเห็นว่าในการใช้โซลินอยด์ในการสวิตช์นั้นถึงแม้จะมีข้อดีคือราคาถูกและออกแบบง่ายแต่ก็มีข้อเสียอยู่มาก

ในการออกแบบและสร้างตัวต้านทานของเครื่องกำเนิดนั้นเราใช้ตัวต้านทานชนิดกระเบื้องซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจแต่ในการทดลองในกรณีที่อุปกรณ์ทดสอบต่อกับแหล่งจ่ายไฟด้วยนั้นเนื่องจากมีแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟผ่านเข้ามาในวงจรเครื่องกำเนิดบ้าง แต่ตัวต้านทานชนิดกระเบื้องนี้จะร้อนมาก ผู้วิจัยออกแบบตัวต้านทานกระเบื้องนี้ที่ 40 วัตต์ในขณะที่ใช้งานจริงเพียงประมาณ 8 วัตต์ แต่ตัวต้านทานชนิดกระเบื้องนี้ร้อนมาก ในการนำไปประกอบบรรจุลงกล่องควรจะมีการระบายอากาศที่ดี

สำหรับวงจรคัปปลิงและดีคัปปลิงนั้นก็สามารถใช้งานได้ดีที่ระดับแรงดันอิมพัลส์ 6kV กระแส 3kA แต่สำหรับวงจรดีคัปปลิงนั้นผู้วิจัยได้ออกแบบค่าตัวเก็บประจุเอาไว้สูง ซึ่งจะมีข้อดีคือทำให้เสิร์จที่เข้าระบบมีค่าต่ำซึ่ง แต่จะมีข้อเสีย คือจะกินกระแสจากแหล่งจ่ายสูงมาก ซึ่งที่ค่าตัวเก็บ

ประจุ $22.4 \mu\text{F}$ ในสถานะไม่มีโหลดกระแสสูงถึง $3.5 \text{ A}_{\text{rms}}$ สำหรับวงจรคัปปลิงนั้นสามารถนำไปใช้ได้ ในกรณีอุปกรณ์ทดสอบเป็น 3 เฟส แต่วงจรดีคัปปลิงนั้นต้องออกแบบเพิ่มเติม

6.2 สรุปการวัดรูปคลื่น

เนื่องจากการใช้งานจริงนั้นหัวขาออกของเครื่องกำเนิดจะต้องไม่ต่อลงดินแต่เครื่องมือวัดนั้นจะต้องต่อลงดินเสมอ ดังนั้นในการวัดรูปคลื่นแรงดันจะมีปัญหามาก โดยปกติการวัดแรงดันที่หัวไม่ต่อลงดินนั้นเราต้องใช้ Differential Probe ในการวัดแต่ Differential Probe ที่มีในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงนั้นวัดแรงดันได้ไม่สูงนักประมาณ 1.0 kV ในการวัดเราจึงต้องใช้ดิไวเดอร์ ซึ่งการใช้ดิไวเดอร์นี้ทำให้รูปคลื่นเกิดการแกว่งได้ง่าย ซึ่งในการวัดเราต้องเข้าใจในการเกิดการแกว่งของรูปคลื่น ถ้าเราวัดไม่ดีอาจทำให้ค่าแรงดันที่แกว่งสูงจนอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อวงจรได้ ในการวัดรูปคลื่นแรงดันที่ดีในกรณีนั้นเรามีนั้นเราควรใช้ดิไวเดอร์ 2 ชุดในการวัดแต่ละจุดเทียบกับดินแล้วนำรูปคลื่นที่ได้ทั้งสองมาลบกัน ซึ่งอัตราส่วนของดิไวเดอร์ทั้งสองชุดก็ควรจะใกล้เคียงกัน จากการทดลองโดยการใช้ดิไวเดอร์ 2 ชุด จะเห็นว่าในการวัดรูปคลื่นแรงดันที่เข้าอุปกรณ์ทดสอบนั้นจะทำให้เกิดวงจรบริดจ์ขึ้นและทำให้เกิดการแกว่งถ้าวงจรบริดจ์ไม่สมดุลย์ ในการวัดนั้นเป็นการยากมากที่จะทำให้วงจรบริดจ์สมดุลย์ จึงต้องยอมรับให้เกิดการแกว่งได้โดยให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด

สำหรับการวัดกระแส นั้นเราจะใช้ อุปกรณ์วัดกระแส (Current Waveform Transducer) ซึ่งมีค่าอัตราส่วน 20 kA/V ซึ่งสูงมากและในการวัดจะเกิดการแกว่งหน้าคลื่นเสมอซึ่งขึ้นกับอุปกรณ์รูปคลื่นแรงดันที่วัดโดย โคลคอฟสกีคอยล์ ของอีกบริษัทจะไม่เกิดการแกว่ง

ในการวัดกระแสตรงที่ชาร์จตัวเก็บประจุ $C1$ นั้นถ้าเครื่องกำเนิดมีหัวออกหัวหนึ่งต่อลงดินจะสามารถวัดได้ด้วยดิไวเดอร์ชนิดความต้านทานซึ่งต้องต่อลงดิน ในขณะที่ถ้าเราทดสอบในกรณีนั้นหัวขาออกจะต้องไม่ต่อลงดินดังนั้นการวัดด้วยดิไวเดอร์จะเกิดปัญหา แม้ว่าเราจะใช้ดิไวเดอร์ตัวต้านทาน 2 ชุดในการวัด ก็ยังคงเกิดปัญหาอุปในวงจรขึ้นซึ่งจะไปชาร์จตัวเก็บประจุดีคัปปลิงซึ่งค่าแรงดันนี้อาจจะเพิ่มสูงจนทำให้เกิดความเสียหายได้ เนื่องจากเมื่อ $C1$ คายประจุออกไปตัวเก็บประจุดีคัปปลิงนี้จะไม่คายประจุด้วย ดังนั้นเพื่อลดปัญหานี้วิธีการวัดที่ดีควรจะวัดด้วยแอมป์มิเตอร์และมีตัวต้านทานเพื่อจำกัดกระแส และไม่มีหัวต่อลงดิน

ในการต่อสายดินนั้นต้องต่อให้ดีมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ ถ้าต่อไม่ดีอาจทำให้รูปคลื่นผิดเพี้ยนไปได้

6.3 สรุปการใช้งาน SCR

จากการทดลองสามารถทดลองใช้งาน SCR ได้ที่ระดับแรงดันถึง 4.0 kV และสามารถทนกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน 8/20 μ s ได้ที่ 3 kA ในการใช้งาน SCR ต้องพิจารณาถึงพารามิเตอร์และข้อจำกัดต่างๆ จากผู้ผลิต พารามิเตอร์ที่สำคัญในการเลือกใช้งานในโครงการนี้ คือ

1) di/dt

เนื่องจากการใช้งานนั้นเป็นอิมพัลส์กระแสซึ่งมี di/dt สูงสำหรับรูปคลื่นอิมพัลส์กระแสมาตรฐาน 8/20 μ s ขนาด 3 kA นั้นควรมี di/dt อย่างน้อย 700 A/ μ s สำหรับค่ากระแสอิมพัลส์สูงสุดของ SCR ส่วนใหญ่จะมีค่าสูงมากซึ่งสูงพอในการใช้งาน

2) V_{DRM}/V_{RRM} (Maximum Repetitive Peak and Off-State Voltage)

คือค่าแรงดันสูงสุดที่สามารถทนได้โดยไม่เกิดเบรกดาวน์ ทั้งทางด้านฟอร์เวิร์ดไบแอสและรีเวิร์ดไบแอสในสภาวะที่มีการบ้อนแรงดันซ้ำ

สำหรับพารามิเตอร์อื่นๆ จะไม่สำคัญมากใช้การเลือกใช้ แต่จะใช้ในการออกแบบ ในการออกแบบสิ่งที่เราจะต้องพิจารณา คือ

1) dv/dt ซึ่งถ้า dv/dt สูงเกินค่ากำหนดอาจจะทำให้ SCR เกิดการเบรกดาวน์ได้ สามารถป้องกันได้ด้วยวงจร snubber

2) พารามิเตอร์ต่างๆ ในการลั่นไก SCR เพื่อการออกแบบวงจรลั่นไก SCR ซึ่งในการลั่นไก SCR ต้องส่งสัญญาณเป็นพัลส์ ในการใช้งานที่ di/dt สูงๆ สัญญาณการลั่นไกควรมีหน้าคลื่นชันด้วย และความกว้างของพัลส์ก็ไม่ควรจะกว้างมากเกินไปซึ่งอาจทำให้ SCR เกิดความเสียหายได้ และที่สำคัญวงจรลั่นไกต้องมีการแยกส่วนกัน (Isolate)

3) การแบ่งแรงดันใน SCR แต่ละตัวในกรณีที่ใช้ SCR หลายตัวต่ออนุกรมกัน โดยปกติ SCR แม้จะเป็นเบอร์เดียวกันผลิตจากโรงงานเดียวกัน ผลิตพร้อมกัน ก็มีลักษณะสมบัติไม่เหมือนกัน เพราะฉะนั้นการแบ่งแรงดันใน SCR จะไม่เท่ากัน ในการป้องกันการแบ่งไม่เท่านี้สามารถแก้ไขได้โดยการนำตัวต้านทานค่าที่เหมาะสมมาต่อคร่อมกับ SCR แต่ละตัว

4) แรงกดบนตัว SCR ซึ่งขึ้นกับชนิดของ SCR โดยปกติ SCR ที่มีตัวถังเป็นแบบกระปุก (ในรูปที่ 5-2) จะต้องมีพิคของแรงกดมาด้วยเพราะถ้าไม่มีแรงกดบนตัว SCR เลย SCR จะไม่สามารถทำงานได้ แต่ในขณะเดียวกันถ้าแรงกดบนตัว SCR มากเกินไปก็อาจจะทำให้ SCR เสียหายได้ ซึ่งโดยปกติถ้าใช้ชุดประกอบของ SCR เองจะมีการป้องกันเรื่องแรงกดนี้อยู่แล้ว

ในการใช้งาน SCR ในการสวิตซ์สำหรับอิมพัลส์นั้นถึงแม้กระแสจะสูงมากแต่ก็ไม่จำเป็นต้องติดฮีตซิงค์เพราะ SCR จะไม่ร้อนแม้ในการทดลองบ้อนอิมพัลส์กระแส 3 kA ต่อเนื่อง 15 ครั้ง แต่ละครึ่งห่างกัน 1 นาที SCR ก็ไม่ร้อน

สำหรับการทดสอบที่ได้ทำนั้นยังไม่สามารถใช้งาน SCR ต่ออนุกรมกันมากกว่า 3 ชุดได้

6.4 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเครื่องกำเนิดอิมพัลส์คลื่นผสมที่สร้างขึ้นนี้ ยังไม่สามารถใช้งานโดยเลือกมุมเฟสในการทำงานได้ ในการพัฒนาต่อไปควรจะพัฒนาการสวิตซ์ที่สามารถทำงานตามเฟสที่ควบคุมได้ ซึ่งอาจจะใช้ SCR หรืออาจจะใช้ทรานซิสเตอร์ที่สามารถควบคุมมุมเฟสในการทำงานได้ และลดปัญหาการเกิดยอดแหลมเนื่องจากหน้าสัมผัสได้

ในการพัฒนาการใช้งาน SCR ควรจะใช้ SCR ที่มีพิคัดไม่สูงนัก นำมาทดลองเพื่อพัฒนาการใช้งานก่อนที่จะใช้ SCR ขนาดพิคัดจริงในการใช้งานซึ่งมีราคาสูงมาก

จากโครงการนี้จะสามารถพัฒนาชุดทดสอบเพื่อให้ทดสอบอุปกรณ์ทดสอบที่เป็น 3 เฟสได้ เพียงออกแบบวงจรดีคัปปลิงเพิ่มเติม

ชุดทดสอบนี้สามารถพัฒนาไปใช้ทดสอบอุปกรณ์ภายใต้มาตรฐานอื่นๆ ได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] IEEE Std C62.41-1991, IEEE Recommended Practice on Surge Voltage in Low-Voltage AC Power Circuit, 1991.
- [2] IEC 1000-4-5, Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 4: Testing and Measurement Techniques, Section 5: Surge Immunity Test, 1995.
- [3] คมสัน เพ็ชรรักษ์, ชัยพร รจิตรุจิเรข, วัชรพล แซ่หว่าง, เอก เจียมวงษา, อำนวย พัฒนาคุณธรรม, การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20, 2540.
- [4] IEEE Std C62.45-1992, IEEE Guide on Surge Testing for Equipment Connected to Low-Voltage AC Power Circuit, 1992.
- [5] Rudolf F. Graf, Electronic Design Data Book, Van Nostrand Reinhold Company
- [6] Barry's Coilgun Design Site, Barry's Inductor Simulation, Available From: <http://www.oz.net/~coilgun/mark2/inductorsim.htm> [2001, November 23]
- [7] Muhammad H. Rashid, SPICE for Power Electronics and Electric Power, Prentice-Hall International, Inc.
- [8] ดร.โคทม อารียา, วงจรอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม 3: วงจรไม่เชิงเส้นและวงจรกำลัง, บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด, 2535.



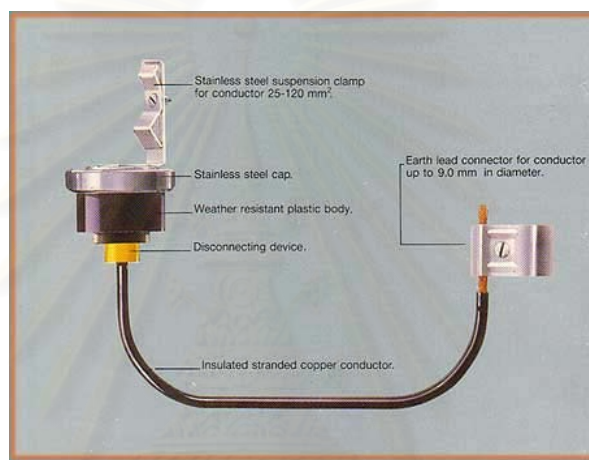
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

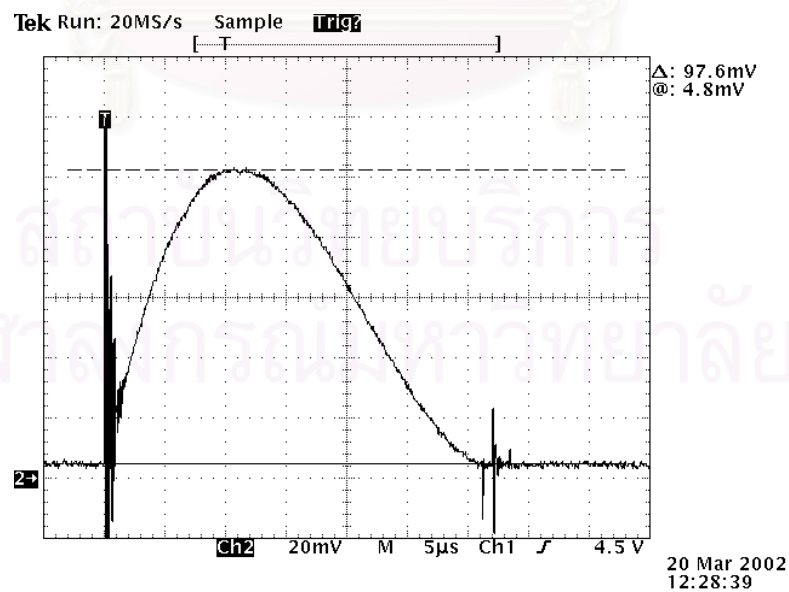
ภาคผนวก

ผลการทดสอบกับดักแรงดันเกิน

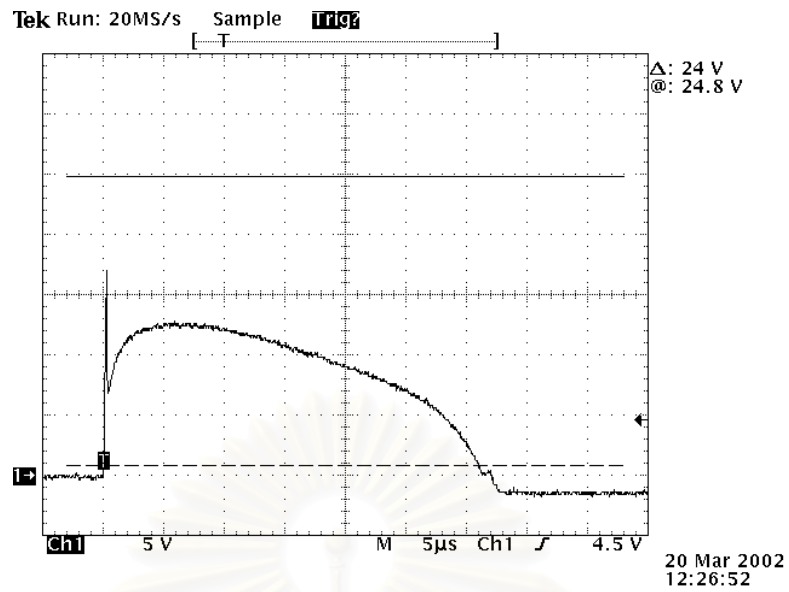
แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสในการทดสอบด้วยกับดักแรงดันเกินสองชนิดคือ SiC (Silicon Carbide) และ ZnO (Zinc Oxide) โดยชนิด SiC รุ่น LAS-001 เป็นแก๊ปและ SiC แสดงในรูปที่ ก-1 ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ ก-2 และรูปที่ ก-3 ทดลองโดยชาร์จแรงดันที่ 6.0 kV จากรูปที่ ก-3 แก๊ปจะทำงานที่แรงดันประมาณ 2.36 kV และได้กระแสอิมพัลส์ 1.95 kA



รูปที่ ก-1 : แสดงกับดักแรงดันเกินชนิด SiC ที่นำมาทดสอบ

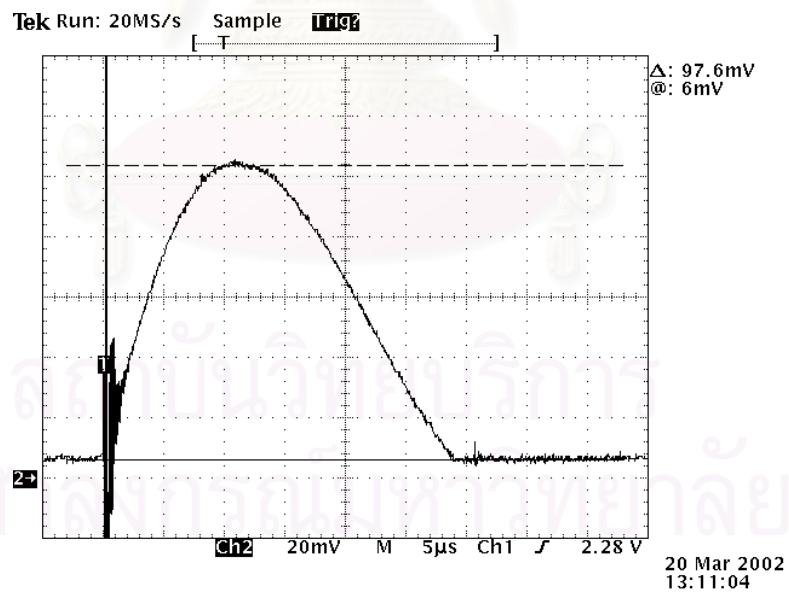


รูปที่ ก-2 : รูปคลื่นกระแสขณะกับดักเสิร์จ SiC ทำงาน

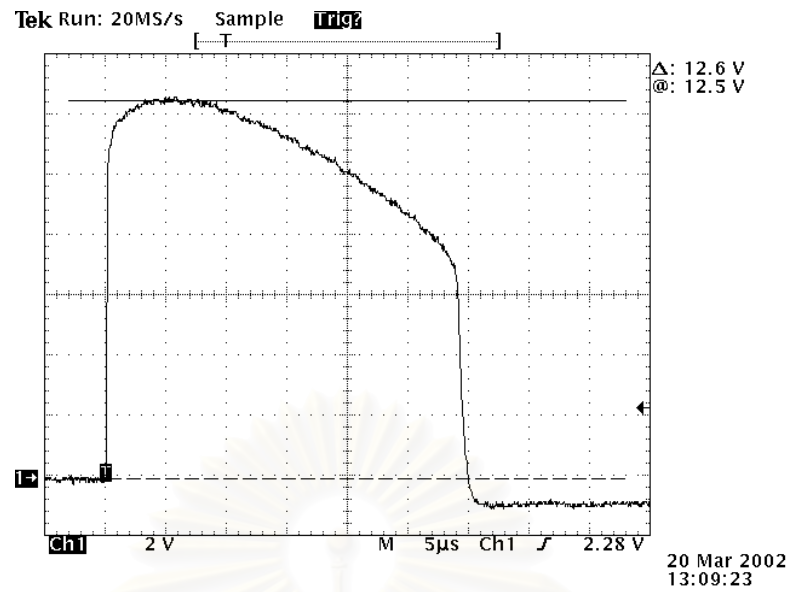


รูปที่ ก-3 : แสดงแรงดันขณะกับดักเสิร์จ SiC ทำงาน

ส่วนกับดักแรงดันเกินชนิด ZnO นั้นเป็นตัวแบบต้นฉบับที่ยังไม่ได้นำมาขายในท้องตลาด ทดลองโดยซาร์จแรงดันที่ 6.0 kV ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ ก-4 และ รูปที่ ก-5 จากผลการ ทดลองค่าแรงดันสูงสุดคือ 1.75 kV และกระแส คือ 1.95 kA

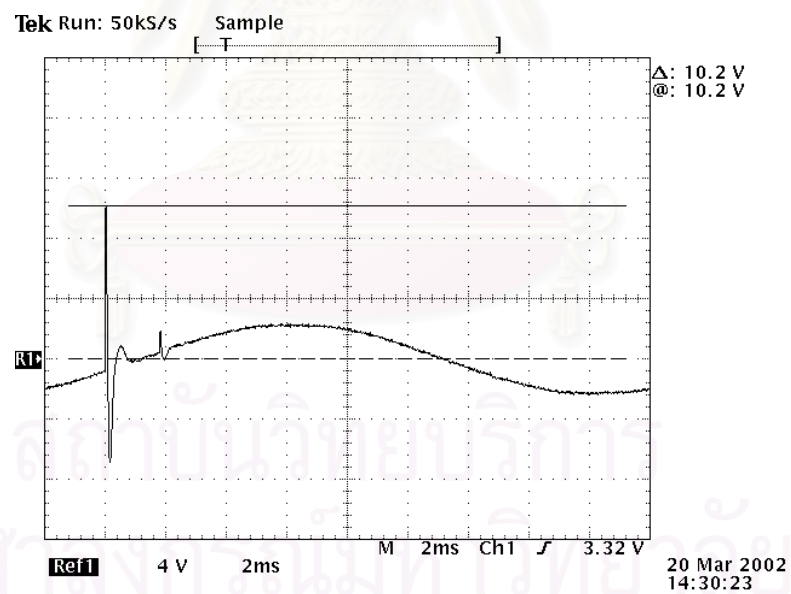


รูปที่ ก-4 : รูปคลื่นกระแสขณะกับดักเสิร์จ ZnO ทำงาน

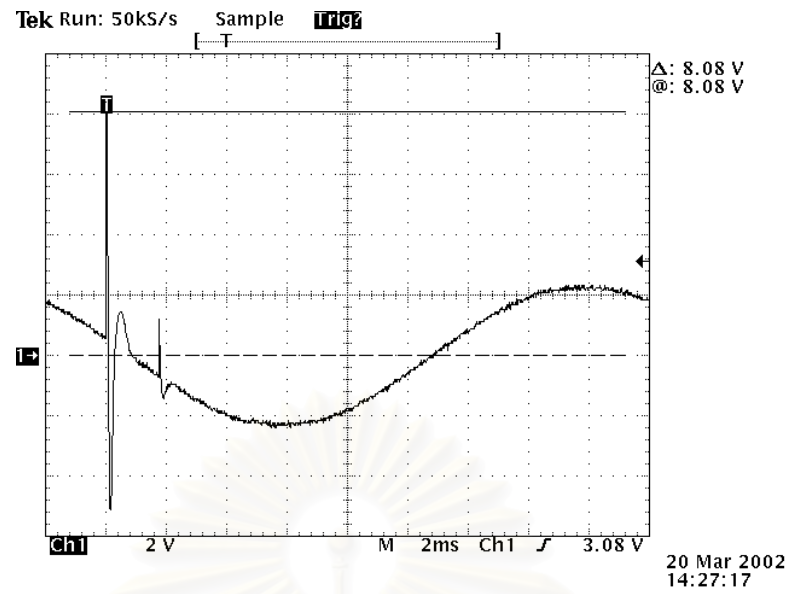


รูปที่ ก-5 : แสดงแรงดันขณะกับดักเสิร์จ ZnO ทำงาน

ในรูปที่ ก-6 และรูปที่ ก-7 แสดงรูปคลื่นทดสอบโดยที่ป้อนแหล่งจ่ายไฟให้กับดักแรงดันเกิน ด้วย โดยทดสอบกับกับดักแรงดันเกินชนิด SiC



รูปที่ ก-6 : แสดงรูปคลื่นทดสอบกับดักแรงดันเกิน SiC ในขณะที่ป้อนแหล่งจ่ายไฟ



รูปที่ ก-7 : แสดงรูปคลื่นทดสอบกับดักแรงดันเกิน SiC ในขณะที่ป้อน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกมล กำธรเจริญ เกิดเมื่อวันที่ 12 เมษายน พ.ศ. 2519 ที่อำเภอหนองแขม จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2539 จากนั้นทำงานที่บริษัท ทัสโก้ เอนจิเนียริง จำกัด ตำแหน่งออกแบบระบบควบคุมและป้องกันในสถานีไฟฟ้า ถึงปี พ.ศ. 2541 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย