การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ ขนาด 800 V

นายชนันนัทธ์ หมู่สุวรรณ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1218-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 800 V PORTABLE IMPULSE VOLTAGE GENERATOR

Mr.Chanannat Musuwan

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-1218-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ ขนาด 800 V
โดย	นายชนันนัทธ์ หมู่สุวรรณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ไชยะ แซ่มซ้อย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วาณิชย์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนันนัทธ์ หมู่สุวรรณ : การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ ขนาด 800 V (DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 800 V PORTABLE IMPULSE VOLTAGE GENERATOR)
อ. ที่ปรึกษา : ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์, 75 หน้า. ISBN 974-17-1218-9

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอ การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ ขนาดแรงดันพิกัด 800 โวลต์ ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าองค์ประกอบต่างๆภายในวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้ และสามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ซ้ำได้ทุกๆ 40 ms เพื่อใช้ในการศึกษาถึงคุณลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยเฉพาะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs ตามมาตรฐาน IEC 60-1 การศึกษาลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์นี้จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา 2545 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170682721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS: IMPULSE / IMPULSE GENERATOR

CHANANNAT MUSUWAN : DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 800 V PORTABLE IMPULSE VOLTAGE GENERATOR.

THESIS ADVISOR: KOMSON PETCHARAKS, Dr.Sc.Techn, 75 pp.

ISBN 974-17-1218-9

This thesis proposes a design and construction of a 800 V portable impulse generator. The component value of this impulse generator can be adjusted and this generator can generate impulse waves every 40 ms. The portable impulse generator is constructed for the studying of properties of the impulse voltage wave, especially the 1.2/50μs lightning impulse waveforms, according to the standard of IEC 60-1. The studies of impulse waveforms are useful for designing of a high voltage equipment.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical Engineering Student's signature .....

Field of study Electrical Power Engineering Advisor's signature .....

Academic year 2002 Co-advisor's signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ทั้งแนวทางในการทำวิจัย การให้คำแนะนำในการแก้ปัญหา และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลังที่ให้การสนับสนุนด้านเงินทุนการวิจัย

ผู้วิจัยได้รับการช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก คุณอรรณพ ลิ้มสีมารัตน์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ในการทดลอง คุณกมล กำธรเจริญ ที่ได้ให้ข้อแนะนำ และคำแนะนำเกี่ยวกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เจ้าหน้าที่ และ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงที่ได้ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือในทุกเรื่อง ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บิดา มารดา ที่ให้โอกาสและสนับสนุนการทำวิจัยเสมอมา จนการวิจัยเป็นผลสำเร็จ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... Error! Bookmark not defined.
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... Error! Bookmark not defined.
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญรูป ..... ฎ

บทที่1 1
บทนำ 1
1.1 บทนำทั่วไป 1
1.2 ที่มาของปัญหา 1
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
บทที่ 2 3
หลักการสร้างและทฤษฎีการกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 3
2.1 หลักการทั่วไปของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 3
2.1.1 แรงดันอิมพัลส์ 3
2.1.2 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 4
2.2 เครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์แบบพกพาได้ 6
บทที่ 3 9
การออกแบบ และประกอบสร้าง 9
3.1 เงื่อนไขในการออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ 9
3.2 การออกแบบในส่วนวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 10
3.2.1 การออกแบบตัวเก็บประจุ C_b 11
3.2.2 การออกแบบตัวเก็บประจุ C_s 12
3.2.3 การออกแบบความต้านทาน R_d, R_e 12

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ หน้า

3.2.4 การออกแบบความเหนี่ยวนำที่ต่อเพิ่มในวงจร 13

3.2.5 การออกแบบส่วน ดิไวเดอร์ ความต้านทาน 14

3.2.6 การออกแบบวงจรอัดประจุ 15

3.2.7 การออกแบบ SCR 16

3.2.8 การออกแบบวงจรขับ SCR และ IGBT 18

3.3 การออกแบบส่วนของวงจรควบคุม 20

บทที่ 4 23

การทดสอบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบ 23

4.1 การทดสอบสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 μs 23

4.1.1 กรณี C_s มีค่าเป็น 5 nF 23

4.1.2 กรณี C_s มีค่าเป็น 10 nF 24

4.1.3 กรณี C_s มีค่าเป็น 22 nF 24

4.1.4 กรณี C_s มีค่าเป็น 47 nF 25

4.1.5 กรณี C_s มีค่าเป็น 100 nF 26

4.1.6 กรณี C_s มีค่าเป็น 220 nF 26

4.1.7 กรณี C_s มีค่าเป็น 600 nF 27

4.1.8 กรณี C_s มีค่าเป็น 1100 nF 28

4.2 การทดสอบสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบตัด 29

4.2.1 กรณีเวลาตัดรูปคลื่น (T_c) เท่ากับ 1 μs 30

4.2.2 กรณีเวลาตัดรูปคลื่น (T_c) เท่ากับ 10 μs 30

4.2.3 กรณีเวลาตัดรูปคลื่น (T_c) เท่ากับ 20 μs 31

4.2.4 กรณีเวลาตัดรูปคลื่น (T_c) เท่ากับ 50 μs 32

4.3 การทดสอบสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs โดยใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่มเข้าไป 32

4.3.1 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 10 μH 33

4.3.2 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 22 μH 33

4.3.3 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 32 μH 34

4.3.4 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 40 μH 35

4.3.5 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 50 μH 35

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ หน้า

4.3.6 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 60 μH ... 36
4.3.7 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 72 μH ... 37
4.3.8 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 80 μH ... 37
4.3.9 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 90 μH ... 38
4.3.10 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 100 μH ... 39
4.4 การทดสอบสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่หน้าคลื่นสั้นที่สุด ,ยาวที่สุด ... 40
4.4.1 การสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีหน้าคลื่นสั้นที่สุด ... 40
4.4.2 การสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีหน้าคลื่นยาวที่สุด ... 42
4.5 การทดสอบสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่หางคลื่นสั้นที่สุด ,ยาวที่สุด ... 43
4.5.1 การสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีหางคลื่นสั้นที่สุด ... 43
4.5.2 การสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีหางคลื่นยาวที่สุด ... 45
4.6 การทดสอบสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ซ้ำ ... 46
บทที่ 5 ... 48
สรุป และข้อเสนอแนะ ... 48
5.1 สรุป ... 48
5.2 ข้อเสนอแนะ ... 49
รายการอ้างอิง ... 50
ภาคผนวก ... 51
ก ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PH50KD ... 52
ข ตารางแสดงคุณสมบัติ SCR เบอร์ IRF16TTS12 ... 62
ค ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 ... 68
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ... 75

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2-1 ค่าคงที่ของรูปคลื่น K_1 ,K_2 6

3-1 ค่าตัวเก็บประจุ C_b ที่ออกแบบไว้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริง 12

3-2 ค่าตัวเก็บประจุ C_b ที่ใช้จริงในวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 12

3-3 ค่าตัวเก็บประจุ C_s ที่ใช้จริงในวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 12

3-4 ค่าพลังงานสูงสุดที่อุปกรณ์ได้รับจากอิมพัลส์แรงดัน 800 V 13

3-5 ค่าความเหนี่ยวนำ L ที่ใส่ในวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 14

3-6 คุณสมบัติการเปิดปิดวงจรของ IGBT เบอร์ IRG4PH50KD 15

3-7 พิกัดของ SCR เบอร์ IRF16TTS12 17

3-8 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ IC เบอร์ TLP250 19

4-1 ค่า R_d (Ω) ที่ใช้สร้างหน้าคลื่น 1.2 μs ที่ค่า C_s และ C_b ต่างๆ
เมื่อใช้ R_e ที่แสดงในตารางที่ 4-2 29

4-2 ค่า R_e (Ω) ที่ใช้สร้างหางคลื่น 50 μs ที่ค่า C_s และ C_b ต่างๆ
เมื่อใช้ R_d ที่แสดงในตารางที่ 4-1 29

4-3 การเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำ (μH) ที่คำนวณได้ 40

4-4 ค่าหน้าคลื่น (μs) สั้นที่สุดที่ C_s, C_b ต่างๆกัน 41

4-5 ค่าหน้าคลื่น (μs) ยาวที่สุดที่ C_s, C_b ต่างๆกัน 43

4-6 ค่าหางคลื่น (μs) สั้นที่สุดที่ C_s, C_b ต่างๆกัน 44

4-7 ค่าหางคลื่น (μs) ยาวที่สุดที่ C_s, C_b ต่างๆกัน 46

5-1 คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ ที่จัดสร้างขึ้น 43

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2-1 รูปคลื่นอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60-1 3

2-2 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 4

2-3 วงจรการทำงานของ Recurrent surge generator TYPE 48 ของ บริษัท HAEFELY..... 7

3-1 วงจรรวมของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้..... 10

3-2 วงจรที่ใช้ในการจำลองสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 11

3-3 โวลเตท ดิไวเดอร์แบบความต้านทาน อัตราส่วน 1000:5 14

3-4 การต่อความต้านทานระหว่างเกท และอีมิเตอร์ของ IGBT 16

3-5 กราฟแสดงลักษณะทั่วไปของเกท ของ SCRเบอร์ IRF16TTS12..... 17

3-6 วงจรลั่นไก SCR..... 18

3-7 วงวจรภายใน IC เบอร์ TLP250 18

3-8 วงจรขับ SCR..... 19

3-9 วงจรขับ IGBT..... 20

3-10 ผังเวลาการทำงานของ IGBT ,SCR1 ,SCR2..... 21

3-11 ผังการทำงานของโปรแกรมในส่วนวงจรควบคุม..... 22

4-1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs กรณี C_s มีค่า 5 nF 23

4-2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs กรณี C_s มีค่า 10 nF 24

4-3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs กรณี C_s มีค่า 22 nF 24

4-4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs กรณี C_s มีค่า 47 nF 25

4-5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs กรณี C_s มีค่า 100 nF 26

4-6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs กรณี C_s มีค่า 220 nF 26

4-7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs กรณี C_s มีค่า 600 nF 27

4-8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs กรณี C_s มีค่า 1100 nF 28

4-9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบตัด กรณี Tc เท่ากับ 1 μs..... 30

4-10 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบตัด กรณี Tc เท่ากับ 10 μs..... 30

4-11 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบตัด กรณี Tc เท่ากับ 20 μs..... 31

4-12 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบตัด กรณี Tc เท่ากับ 50 μs..... 32

4-13 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 10 μH 33

4-14 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 22 μH 33

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4-15 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 32 μH 34
4-16 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 40 μH 35
4-17 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 50 μH 35
4-18 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 60 μH 36
4-19 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 72 μH 37
4-20 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 80 μH 37
4-21 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 90 μH 38
4-22 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 100 μH 39
4-23 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ที่หน้าคลื่นสั้นที่สุด 40
4-24 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ที่หน้าคลื่นยาวที่สุด 42
4-25 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ที่หางคลื่นสั้นที่สุด 43
4-26 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ที่หางคลื่นยาวที่สุด 45
4-27 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ที่สร้างซ้ำทุก 40 ms 46
4-28 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ที่ได้จากการสร้างรูปคลื่นซ้ำ 47

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า มักจะได้รับผลกระทบจากเสิร์จฟ้าผ่าอยู่เสมอ ทั้งจากโดนฟ้าผ่าโดยตรง และจากการเหนี่ยวนำ อุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านี้จะมีการออกแบบการป้องกันจากแรงดันเกินจากฟ้าผ่า ซึ่งโดยทั่วไปการออกแบบการป้องกันจะให้ความสำคัญกับระดับแรงดันเกินเป็นหลัก เพราะก่อให้เกิดความเสียหายได้มากที่สุด อย่างไรก็ตามแรงดันเกินจากฟ้าผ่านอกจากจะมีระดับแรงดันที่สูงกว่าปกติแล้ว ยังมีลักษณะเป็นแรงดันอิมพัลส์ คือมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อเวลาอย่างรวดเร็ว จึงก่อให้เกิดความเสียหายกับฉนวนได้ ความเสียหายที่อุปกรณ์ได้รับจะขึ้นกับลักษณะการตอบสนองต่อรูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่า

อุปกรณ์ไฟฟ้าโดยทั่วไปมักจะมีค่าอิมพีแดนซ์แตกต่างกัน ทำให้การตอบสนอง และการกระจายแรงดัน ของรูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าแตกต่างกันไป ดังนั้นจึงมีการกำหนดมาตรฐานของรูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่า เพื่อใช้ในการทดสอบการป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น มาตรฐาน IEC 60-1 [1] ที่กำหนดให้ รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่ามีลักษณะ 1.2/50 μs ดังนั้นการศึกษาถึงคุณลักษณะของรูปแรงดันฟ้าผ่า ที่มีผลต่อการตอบสนองของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่อรูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่า จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการพัฒนาระบบป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆในอนาคต

1.2 ที่มาของปัญหา

ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับวงจรกำเนิดอิมพัลส์มานานแล้ว และจากผลการวิจัย ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงได้สร้างชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ที่สามารถเปลี่ยนค่าองค์ประกอบต่างๆในวงจรได้ แต่เนื่องจาก ชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้น มีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักมาก ทำให้เคลื่อนย้ายไม่สะดวก รวมถึง ค่าใช้จ่ายในการสร้างองค์ประกอบในวงจรแต่ละตัวยังมีต้นทุนสูง ชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นี้จึงไม่เหมาะในการวิจัย และ ศึกษา ในเรื่องของสภาะทรานเซียนส์ ของรูปคลื่นอิมพัลส์ ด้วยสาเหุตนี้จึงสมควรจัดสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์แบบพกพาได้ โดยใช้อุปกรณ์ภายในประเทศเพื่อให้งานวิจัยและศึกษาเกี่ยวกับสภาวะทรานเซียนส์ มีความรวดเร็วและ มีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

โครงงานนี้จะทำการ ออกแบบ และสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์แบบพกพาได้ ขนาดพิกัดแรงดัน 800 V โดยสามารถสร้าง แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/50 μs ตามมาตรฐาน IEC 60-1 และสามารถสร้างรูปคลื่นซ้ำได้ทุกๆ 40 ms และทำการทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์แบบพกพาได้ที่สร้างขึ้น

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ และเครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์แบบพกพาได้
2. ออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์แบบพกพาได้ โดยใช้อุปกรณ์ที่มีจำหน่ายภายในประเทศ
3. จัดสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์แบบพกพาได้ ตามที่ได้ออกแบบไว้
4. ทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์ที่สร้างขึ้น
5. วิเคราะห์ผลการทดสอบและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น
6. สรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์แบบพกพาได้ ที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการศึกษาและงานวิจัยอื่นๆทำให้เกิดความคล่องตัว และรวดเร็ว ทำให้การศึกษาและการวิจัยมีประสิทธิภาพมากขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

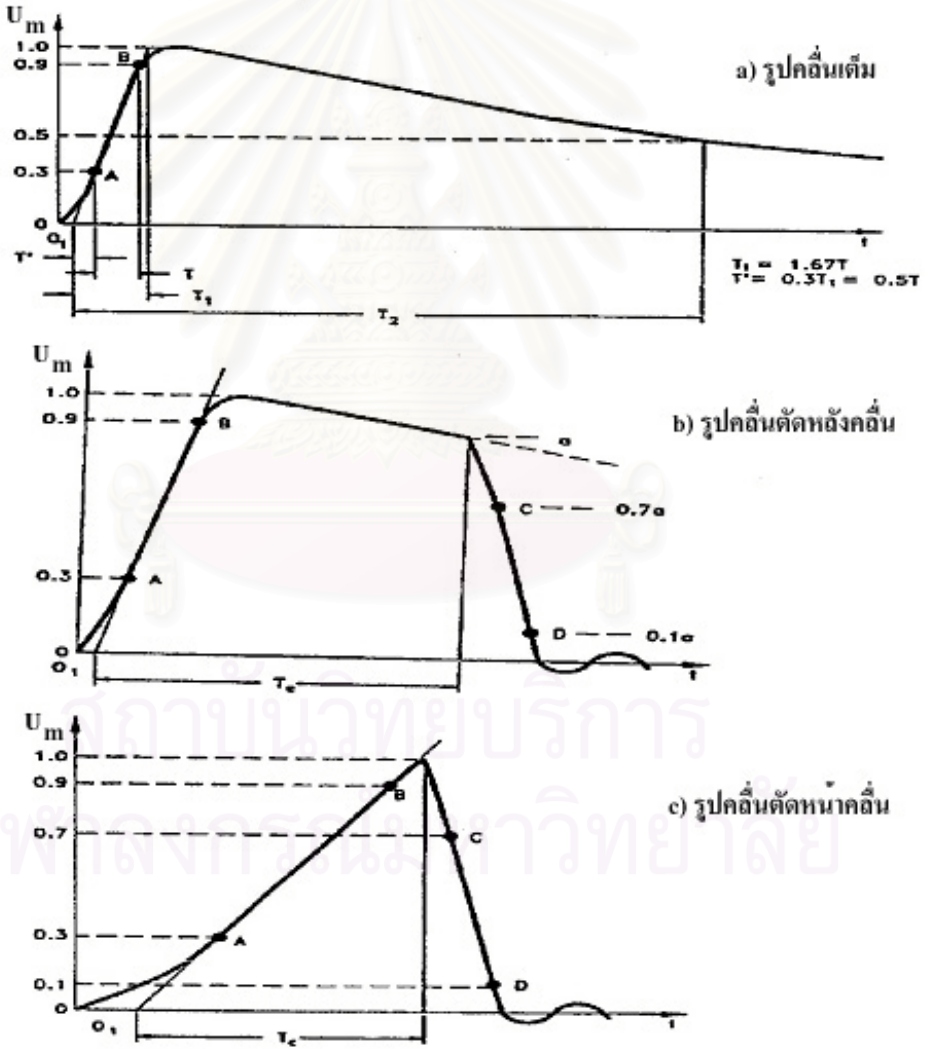
บทที่ 2

ทฤษฎี และหลักการสร้างแรงดันอิมพัลส์

2.1 หลักการทั่วไป

2.1.1 แรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์ เป็นแรงดันทรานเซี้ยนส์ที่มีแรงดันเพิ่มขึ้นตามเวลาอย่างรวดเร็ว โดยอาจมีลักษณะเป็นรูปคลื่นเต็มหรือรูปคลื่นตัด คุณลักษณะต่างๆของแรงดันอิมพัลส์ ถูกกำหนดโดยมาตรฐาน IEC 60-1 ดังแสดงในรูปที่ 2-1 ซึ่งมีการกำหนดค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2-1 รูปคลื่นอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60-1

- ขั้วของแรงดัน หมายถึง ชนิดของแรงดันเป็นขั้วบวกหรือขั้วลบ
- ขนาดแรงดัน U_m หมายถึง ค่าแรงดันสูงสุดของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์
- เวลาหน้าคลื่น T_1 หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 2-1 a) โดยมีค่าเป็น 1.67 เท่าของช่วงเวลาที่แรงดันมีค่า 30% ไปถึง 90%
- เวลาหางคลื่น T_2 หมายถึงช่วงเวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นเสมือนของรูปคลื่นผ่านค่ายอดของแรงดันจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2-1 a)
- ช่วงเวลาคลื่นตัด T_c หมายถึงช่วงเวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นเสมือนจนกระทั่งถึงจุดที่รูปคลื่นตัดลง ดังรูปที่ 2-1 b)

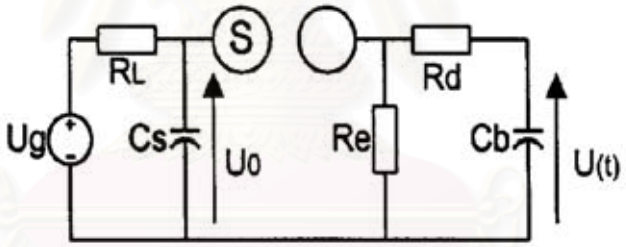
สำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ตามมาตรฐาน IEC 60-1 กำหนดไว้ดังนี้

เวลาหน้าคลื่น (T_1) 1.2 μs $\pm$ 0.36 μs

เวลาหางคลื่น (T_2) 50 μs $\pm$ 10 μs

2.1.2 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

เราสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้ โดยอาศัยสภาวะทรานเซียนส์ ของวงจร RC ที่แสดงในรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

หลักการทำงานของ วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ในรูปที่ 2-2 สามารถอธิบายได้ดังนี้ เริ่มต้นเราจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ให้กับตัวเก็บประจุ C_s เมื่อได้ระดับแรงดันตามที่ต้องการแล้ว สปาร์กแกป S ที่ทำหน้าที่เหมือนสะพานไฟจะทำงาน โดยปิดวงจร ทำให้ประจุที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุ C_s ถ่ายเทผ่านความต้านทาน R_d ไปสู่ตัวเก็บประจุ C_b ซึ่งเป็นลักษณะของการชาร์จประจุในวงจร RC ทั่วไป ทำให้เกิดสภาวะทรานเซียนส์ในส่วนหน้าคลื่น เมื่อแรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_s ลดลงจนมีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_b ตัวเก็บประจุทั้งสองจะคายประจุผ่านความต้านทาน R_e โดยประจุที่สะสมอยู่ใน C_s จะถ่ายเทผ่าน R_e โดยตรง ส่วนประจุที่สะสมอยู่ใน C_b จะถ่ายเทผ่าน R_d และ R_e อันเป็นลักษณะของวงจร RC ช่วงการคายประจุ ทำให้เกิดเป็นสภาวะ

ทรานเซียนส์ในช่วงหางคลื่น ฉะนั้นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้คือผลรวมของสภาวะทรานเซียนส์ ของวงจร RC ช่วงชาร์จประจุและช่วงคายประจุ

จากหลักการของวงจรจะเห็นได้ว่า ค่า C_b และ R_d จะเป็นตัวกำหนดเวลาหน้าคลื่น ส่วนค่า C_s และ R_e จะเป็นตัวกำหนดช่วงเวลาหลังคลื่น โดยจากวงจรที่เป็นลักษณะ RC เราสามารถวิเคราะห์และ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [2]

$$U(t) = \frac{U_0}{K\ (\alpha_2 - \alpha_1)} \{e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}\} \tag{2.1}$$

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{B_1}{2} m \left\{ \left(\frac{B_1}{2} \right)^2 - B_0 \right\}^{\frac{1}{2}} \tag{2.2}$$

โดยที่

$$B_1 = \frac{R_d C_b + R_e C_b + R_e C_s}{R_d R_e C_b C_s} \tag{2.3}$$

$$B_0 = \frac{1}{R_d R_e C_b C_s} \tag{2.4}$$

$$K = R_d C_b \tag{2.5}$$

สมการที่ 2.1 ถึง 2.5 เป็นสมการแสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามเวลาโดยขึ้นกับค่าองค์ประกอบต่างๆของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ในทางกลับกันเราสามารถคำนวณหาค่าองค์ประกอบ R_e และ R_d ได้จากสมการที่ 2.1 ถึง 2.4 ได้ในสมการที่ 2.6 และ 2.7 ดังนี้

$$R_d = \frac{1}{2C_b} \left\{ \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right)^2 - \frac{4\left(C_s + C_b\right)}{\alpha_1 \alpha_2 C_s}} \right\} \tag{2.6}$$

$$R_e = \frac{1}{2(C_s + C_b)} \left\{ \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right)^2 - \frac{4\left(C_s + C_b\right)}{\alpha_1 \alpha_2 C_s}} \right\} \tag{2.7}$$

สำหรับวงจรในรูปที่ 2-2 เมื่อเราทราบค่างองค์ประกอบต่างๆแล้วเราสามารถหาเวลาหน้าคลื่น (T_1) และ เวลาหางคลื่น (T_2) ได้ดังนี้

$$T_1 = K_2 R_d \frac{C_b C_s}{C_b + C_s} \tag{2.8}$$

$$T_2 = K_1 R_e \left(C_b + C_s \right) \tag{2.9}$$

และประสิทธิภาพของวงจรโดยประมาณหาได้จาก

$$\eta = \frac{C_s}{(C_s + C_b)} \tag{2.10}$$

โดย K_1 ,K_2 เป็นค่าคงที่ของรูปคลื่น แสดงในตารางที่ 2-1

T_1 / T_2 (μs)	K_1	K_2	$1/\alpha_1$(μs)	$1/\alpha_2$(μs)
1.2/5	1.44	1.49	3.48	0.80
1.2/50	0.73	2.96	68.2	0.405
1.2/200	0.70	3.15	284	0.381
250/2500	0.87	2.41	2877	104

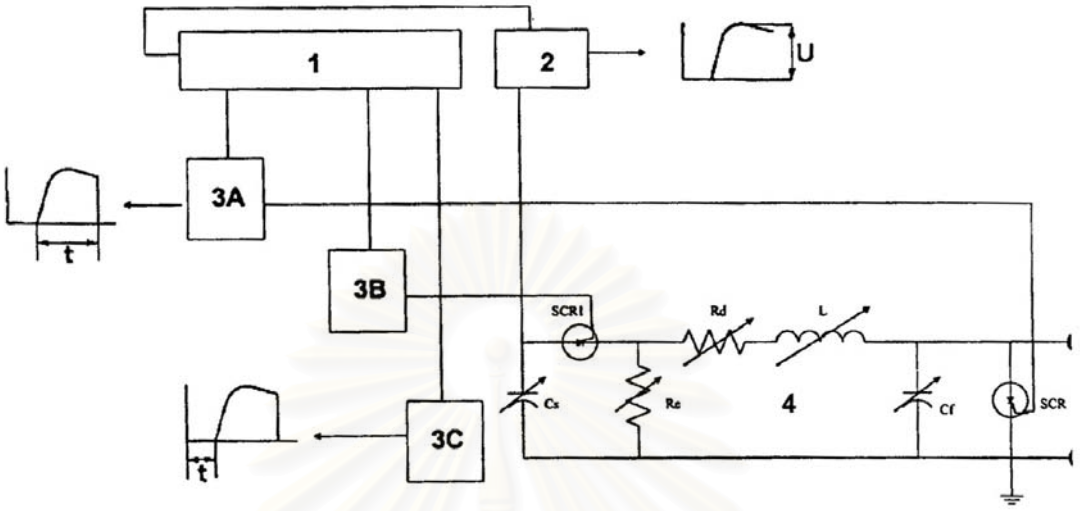
ตารางที่ 2-1 ค่าคงที่ของรูปคลื่น K_1 ,K_2

จากสมการที่ 2.8 เราสามารถปรับค่า T_1 โดยการเปลี่ยนค่า C_s ,C_b และ R_d เช่นเดียวกับ T_2 ที่เราสามารถปรับได้โดยการเปลี่ยนค่า C_s ,C_b และ R_e สำหรับวงจรในรูปที่ 2-2 เราจะไม่คิดถึงผลจากความเหนี่ยวนำที่อาจเกิดขึ้นในทางปฏิบัติ ซึ่งอาจส่งผลให้รูปคลื่นที่ออกมาเกิดผิดเพี้ยน หรือเกิดการแกว่งในวงจร RLC

2.2 เครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์แบบพกพาได้

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ มีวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เหมือนกับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทั่วๆไป ดังนั้นจึงมีหลักการในการสร้างแรงดันอิมพัลส์เหมือนกันด้วย แต่พิกัดแรงดันที่สร้างได้จะมีต่ำกว่ามาก เนื่องจากจุดประสงค์การใช้งานเน้นไปที่ลักษณะของรูปคลื่นมากกว่าพิกัดด้านแรงดัน การศึกษาการทำงานของ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้

สามารถศึกษาจาก เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ซ้ำ (Recurrent surge generator) ของบริษัท HAEFELY TYPE 48 [3] ซึ่งมีวงจรและวิธีการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 วงจรการทำงานของ Recurrent surge generator TYPE 48 ของ บริษัท HAEFELY

บล็อกต่างๆในรูปที่ 2-4 มีหน้าที่ดังต่อไปนี้

1 คือ วงจรส่วนควบคุมกลาง

2 คือ วงจรส่วนควบคุมการชาร์จแรงดันให้ C_s

3A คือ วงจรส่วนควบคุมเวลาการตัดรูปคลื่น

3B คือ วงจรส่วนควบคุมSCR1

3C คือ วงจรส่วนควบคุมเวลาหน่วงหน้าคลื่น

4 คือ วงจรส่วนสร้างแรงดันอิมพัลส์

ตัวเก็บประจุ C_s ,C_b และ ความต้านทาน R_d ,R_e สามารถปรับเป็นค่าต่างๆ และสามารถต่อค่าความต้านทาน หรือ ตัวเก็บประจุภายนอกได้ เพื่อให้สามารถควบคุมรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ให้มีเวลาหน้าคลื่น และเวลาหางคลื่นตามที่ต้องการ นอกจากนั้นยังสามารถต่อความเหนี่ยวนำ L เข้าไปในวงจรกรณีที่ต้องการให้รูปคลื่นเกิดการออสซิลเลต ในส่วนที่ 4 ของรูปที่ 2-3 เป็นวงจรเดียวกัน กับในรูปที่ 2-2 แต่จะมีส่วนแตกต่างจากวงจรในรูปที่ 2-2 คือ จะใช้ SCR แทนการใช้ สปาร์กแกป S เนื่องจากพิกัดแรงดันในวงจรมีค่าต่ำจึงสามารถใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มาใช้แทนได้ นอกจากนี้ยังมี SCR ต่อขนาน กับ ตัวเก็บประจุโหลด เพื่อให้สามารถสร้างรูปคลื่นแบบตัดได้ วงจรภายในบล็อกที่ 2 ,3A ,3B และ3C จะถูกควบคุมโดยวงจรส่วนควบคุมกลาง (บล็อกที่ 1) ในรูปที่ 2-3 ซึ่งต่างจากวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ทั่วไป

วงจรควบคุมต่างๆทำหน้าที่ดังนี้ บล็อกที่ 1 ทำหน้าที่ควบคุมและประสานงานให้กับ วงจรในบล็อกที่ 2 และ 3 วงจรภายในบล็อกที่ 2 ทำหน้าที่ควบคุมระดับแรงดันอัดประจุ C_s ให้ได้แรงดันตามที่ต้องการ บล็อกที่ 3A ควบคุมเวลาตัดรูปคลื่น (T_e) โดยสั่งเปิดปิด SCR2 บล็อกที่ 3C ควบคุมเวลาหน่วงหน้าคลื่น และ บล็อกที่ 3B จะควบคุมการเปิดปิด SCR1 ที่ทำหน้าที่เหมือน สปาร์กแกป S การใช้วงจรควบคุมเหล่านี้ทำให้สามารถสร้างรูปคลื่นอิมพัลส์ที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น และยังสามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ซ้ำได้ โดยการปรับการหน่วงเวลาหน้าคลื่น

Recurrent surge generator มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

พิกัดแรงดันอัดประจุ 500 V.

ช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1) ที่ทำได้ ประมาณ 0.2 – 1500 μs.

ช่วงเวลาหลังคลื่น (T_2) ที่ทำได้ ประมาณ 0.3 – 9000 μs.

ช่วงเวลารูปคลื่นตัด (T_e) ประมาณ 0 – 100 μs. รูปคลื่นตกลงใน 60 ns.

อัตราการยิงรูปคลื่นซ้ำ 25 Hz สำหรับตัวเก็บประจุภายในเครื่อง และ 3 Hz สำหรับตัวเก็บประจุที่ต่อเข้ามาเอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การออกแบบ และประกอบสร้าง

3.1 เงื่อนไขในการออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพา มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ แต่สามารถปรับเปลี่ยนค่า ความต้านทาน และค่าตัวเก็บประจุ ได้ง่ายและสะดวกกว่า รวมถึงมีวงจรควบคุมการทำงาน กล่าวได้ว่ามีลักษณะเหมือน Recurrent surge generator การออกแบบจึงแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนวงจรควบคุม และส่วนกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ในขั้นต้นเราจะกำหนดคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาที่จะสร้างเสียก่อน เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ จะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

พิกัดแรงดันอัดประจุไฟตรง	800	V
ช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1) ประมาณ	0.30 – 1000	μs
ช่วงเวลาหลังคลื่น (T_2) ประมาณ	0.67 – 11000	μs
ช่วงเวลารูปคลื่นตัด (T_c) ประมาณ	1 – 50	μs
อัตราการสร้างรูปคลื่นซ้ำ	25	Hz
ช่วงเวลาการหน่วงระหว่างรูปคลื่น	40 – 100	ms

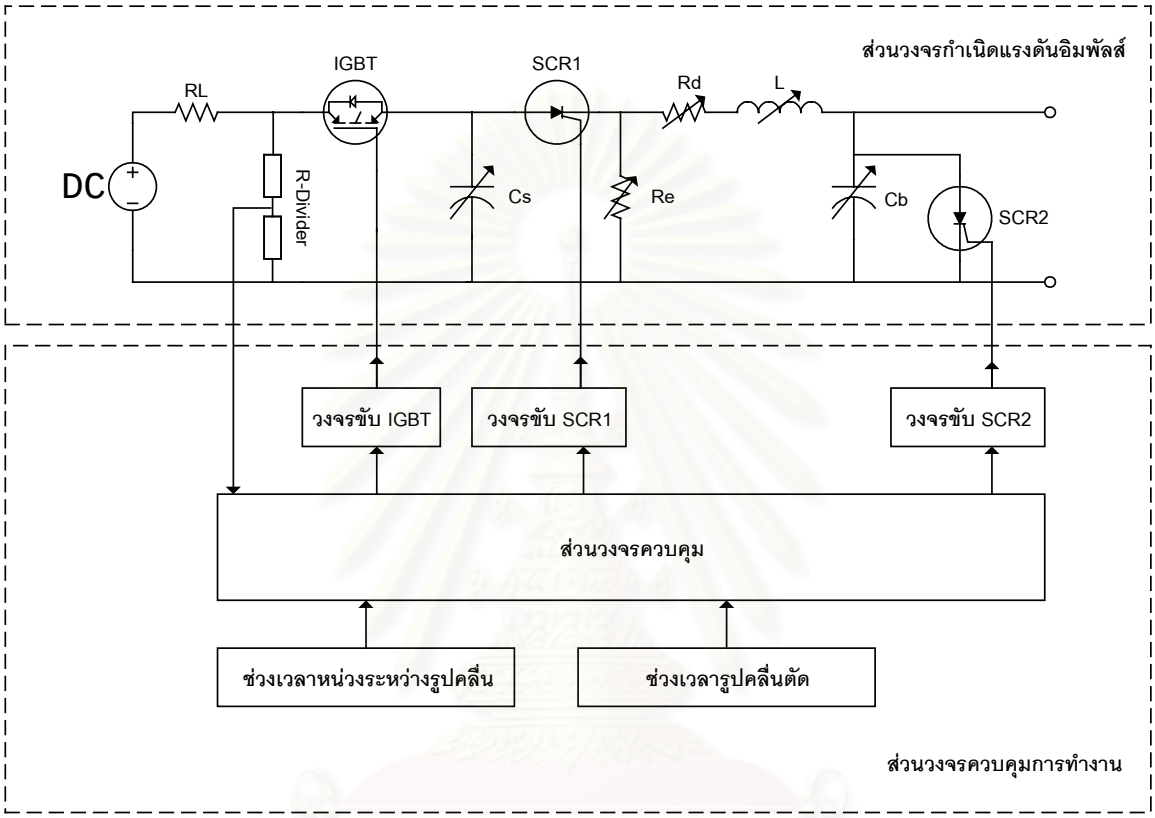
รูปที่ 3-1 เป็นวงจรของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาที่ได้ออกแบบไว้ โดยแบ่งออกเป็น ส่วนวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ และส่วนควบคุมการทำงาน ในส่วนวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะใช้ SCR แทนการใช้ สปาร์กแกป และจะมี SCR ต่อคร่อมกับตัวเก็บประจุ C_b เพื่อให้สามารถสร้างรูปคลื่นตัดได้ สำหรับ IGBT ในวงจรจะใช้ในการปิดเปิดวงจรการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_s ซึ่ง SCR1 SCR2 และ IGBT จะประสานการทำงานโดยวงจรควบคุม ซึ่งเราจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุม

วิธีการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปรับระดับแรงดันอัดประจุที่ตามที่ต้องการ
2. ส่วนวงจรควบคุมรับค่า เวลาหน่วงระหว่างรูปคลื่น (T_d) และเวลาตัดรูปคลื่น (T_c)
3. ดิไวเดอร์ ความต้านทานจะ แบ่งแรงดันอัดประจุ ส่งไปแสดงผลที่วงจรควบคุม
4. IGBT ทำงานเพื่อทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_s
5. เมื่ออัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_s เรียบร้อยแล้ว IGBT จะหยุดทำงาน

6. SCR1 ทำงานเพื่อสร้างแรงดันอิมพัลส์ ตามเวลา T_d ที่ตั้งไว้
7. หากต้องการรูปคลื่นตัด SCR2 จะทำงานตามเวลา T_c ที่ตั้งไว้

หากต้องการสร้างรูปคลื่นซ้ำจะกลับไปเริ่มที่กระบวนการที่ 3 อีกครั้ง แต่ถ้าต้องการเปลี่ยนแปลงค่าเวลาต่างๆ จะกลับไปเริ่มที่กระบวนการที่ 1 ใหม่



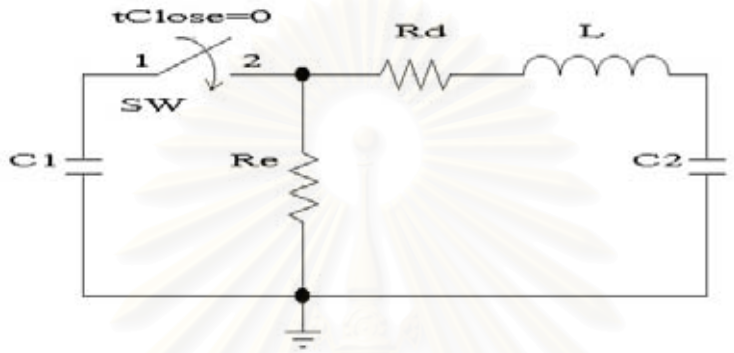
รูปที่ 3-1 วงจรรวมของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้

3.2 การออกแบบในส่วนวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

เมื่อทราบว่าจะสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นแบบใดจากการกำหนด T_1 และ T_2 เราจะเริ่มคำนวณจากค่าตัวเก็บประจุ C_b แล้วตามด้วย C_s ให้มีค่าสอดคล้องกัน จากนั้นจึงคำนวณองค์ประกอบที่เหลือ คือความต้านทาน R_d ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 และความต้านทาน R_e ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.7 ค่าความต้านทาน R_d, R_e ที่ได้ เราจะนำไปจำลองด้วยโปรแกรม MicroSim [4] เพื่อตรวจสอบว่าสามารถสร้างรูปคลื่นตามที่ต้องการได้หรือไม่ สำหรับการปรับหรือเลือกค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ เราจะใช้หน้าสัมผัสของรีเลย์ 5 V แทนการใช้

ซีเลกเตอร์สวิตซ์ (Selector switch) เพื่อลดค่าความเหนี่ยวนำในวงจร และช่วยให้การปรับเปลี่ยนค่าองค์ประกอบสะดวกมากขึ้น

ในเบื้องต้นเราต้องกำหนดพิกัดแรงดันอัดประจุเสียก่อน ซึ่งเราออกแบบไว้ 800 V ดังนั้นอุปกรณ์ที่อยู่ภายในส่วนกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทั้งหมด จะต้องทนกำลังงานของแรงดันอิมพัลส์ขนาด 800 V ได้ พลังงานที่ไหลผ่านในอุปกรณ์แต่ละตัว สามารถหาได้จากการจำลองวงจรในรูปที่ 3-2 โดยให้แรงดันอัดประจุ C_s มีค่าเท่ากับแรงดันพิกัดคือ 800 V



รูปที่ 3-2 วงจรที่ใช้ในการจำลองสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

3.2.1 การออกแบบตัวเก็บประจุ C_b

ตัวเก็บประจุ C_b เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้ในการปรับเวลาหน้าคลื่น โดยเราสามารถนำตัวเก็บประจุ C_b มาต่อขนานกับโหลดตัวเก็บประจุของอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบ เพื่อให้ได้ลักษณะรูปคลื่นเป็นไปตามต้องการ คุณสมบัติของตัวเก็บประจุ C_b จะต้องทนแรงดันไฟตรงได้ไม่ต่ำกว่า 800 V ซึ่งเราเลือกใช้ตัวเก็บประจุแบบโพลีโพรพีลีน ที่มีพิกัดแรงดันที่สูงกว่าตัวเก็บประจุชนิดอื่น สำหรับการเลือกค่า C_b จะเลือกจากค่าที่มีในท้องตลาด และครอบคลุมค่าเก็บประจุของอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบกับแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งโดยทั่วไปมีค่าเก็บประจุดังนี้ [5]

-ลูกถ้วยฉนวนธรรมดา	10 – 100 pF
-ปลอกฉนวนนำไฟฟ้า	150 – 400 pF
-หม้อแปลงกระแส	200 – 600 pF
-เคเบิลแรงสูง	150 – 300 pF/m.
-หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 1 MVA ประมาณ	1000 pF
100 MVA ประมาณ	10000 pF
-อุปกรณ์วัดแรงดัน (voltage divider)	50 – 500 pF
-สายต่อวงจรแรงสูง	5 – 15 pF/m.

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเลือกค่าตัวเก็บประจุ C_b และนำมาต่อบนวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้จริง พบว่ามีการคับปลิ้งของลายวงจรกับ C_b และ SCR2 ที่ต่อคร่อมอยู่กับ C_b ทำให้ค่าตัวเก็บประจุ C_b เปลี่ยนค่าไปตามตารางที่ 3-1

ค่า C_b ที่ออกแบบไว้ (nF)	0.5	1	2.2	5	10	22	47	100
ค่า C_b จริงในวงจร (nF)	1.28	1.28	3	6.5	12.8	22	52	109

ตารางที่ 3-1 ค่าตัวเก็บประจุ C_b ที่ออกแบบไว้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริง

จากตารางที่ 3-1 พบว่าค่าเก็บประจุจริงของ C_b ที่ออกแบบไว้ 0.5 nF และ 1 nF มีค่าเท่ากันคือเป็น 1.28 nF ดังนั้นเราจะตัดค่า C_b ที่ 0.5 nF ออกไป และใช้ค่า C_b ต่ำสุดเป็น 1.28 nF แทน สรุปแล้วได้ค่า C_b เป็นไปดังนี้

ค่า C_b ที่ใช้ในวงจร (nF)	1.28	3	6.5	12.8	22	52	109

ตารางที่ 3-2 ค่าตัวเก็บประจุ C_b ที่ใช้จริงในวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

3.2.2 การออกแบบตัวเก็บประจุ C_s

จากสมการที่ 2.10 แสดงถึงประสิทธิภาพของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ประสิทธิภาพของวงจรจะแปรผันตรงกับค่าตัวเก็บประจุ C_s ดังนั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพของวงจรสูงควรเลือกค่า C_s ให้สูงกว่า C_b ประมาณ 10 เท่า ดังนั้นจึงเลือกค่าตัวเก็บประจุ C_b ดังนี้

ค่า C_s ที่ใช้ในวงจร (nF)	5	10	22	47	100	220	600	1100

ตารางที่ 3-3 ค่าตัวเก็บประจุ C_s ที่ใช้ในวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

3.2.3 การออกแบบความต้านทาน R_d, R_e

ค่าความต้านทาน R_d ส่งผลต่อเวลาหน้าคลื่น (T_1) ของรูปคลื่นอิมพัลส์ เมื่อพิจารณาช่วงเวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า ตามมาตรฐาน IEC 60-1 นั่นคือ 1.2 μs แล้วนำไปแทนค่าในสมการที่ 2.7 เราจะได้ค่า

ความต้านทาน R_d มีค่าอยู่ระหว่าง 3.3 – 4700 Ω โดยการเลือกใช้ค่าความต้านทานที่ต่างกันไป กับค่าตัวเก็บประจุ C_b จะทำให้ได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่มีหน้าคลื่นต่างๆกันออกไป

ค่าความต้านทาน R_e จะส่งผลต่อเวลาหางคลื่น (T_2) ของรูปคลื่นอิมพัลส์ เมื่อพิจารณาช่วงเวลาหางคลื่นของรูปคลื่นฟ้าผ่า ตามมาตรฐาน IEC 60-1 นั่นคือ 50 μs เมื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ 2.8 จะได้ค่าความต้านทาน R_e มีค่าอยู่ระหว่าง 10 – 15 kΩ และเราสามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่มีหางคลื่นต่างๆกันได้ เช่นเดียวกับในกรณี ความต้านทาน R_d

สำหรับพลังงานสูงสุดที่ความต้านทาน R_d และ R_e ได้รับจากแรงดันอิมพัลส์ขนาด 800 V เราสามารถหาได้จากการจำลองวงจรในรูปที่ 3-2 ซึ่งผลแสดงในตารางที่ 3-4

	R_d	R_e	L
ค่าพลังงานสูงสุดที่ได้รับ (mJ)	30.56	345.30	26.22

ตารางที่ 3-4 ค่าพลังงานสูงสุดที่อุปกรณ์ได้รับจากอิมพัลส์แรงดัน 800 V

จากตารางที่ 3-4 เมื่อพิจารณาถึงการสร้างรูปคลื่นซ้ำในอัตรา 25 Hz หรือทุก ๆ 40 ms สามารถหาค่ากำลังงานที่ความต้านทานแต่ละตัวต้องทนได้ดังนี้

กรณีความต้านทาน R_d ค่ากำลังงานสูงสุด (P) = W/T

$= 30.56e^{-3} / 40e^{-3} = 0.76$ W

กรณีความต้านทาน R_e ค่ากำลังงานสูงสุด (P) = W/T

$= 345.30e^{-3} / 40e^{-3} = 8.63$ W

ดังนั้นกรณีความต้านทาน R_d จะเลือกใช้ความต้านทานประเภทเมทัลฟิล์ม (Metal Film Resistance) ขนาด 2 W เนื่องจากมีค่าความเหนี่ยวนำภายในต่ำ กว่าชนิดอื่น และสามารถทนต่อกำลังงานสูงสุดที่ความต้านทาน R_d ได้รับได้

สำหรับความต้านทาน R_e จะใช้ความต้านทานแบบเซรามิกค์ (Ceramic Resistance)ขนาด 10 W เพื่อให้ทนต่อกำลังงานที่จะได้รับจากอิมพัลส์ขนาด 800 V

3.2.4 การออกแบบความเหนี่ยวนำที่ต่อเพิ่มในวงจร

โดยปกติแล้ววงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ จะหลีกเลี่ยงความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในวงจร เนื่องจากทำให้เกิดการออสซิลเลตกับรูปคลื่นอิมพัลส์ อย่างไรก็ตาม ในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ จะออกแบบให้สามารถใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่มเข้าไปในวงจรได้ เพื่อใช้ในการศึกษา

ลักษณะของรูปคลื่น เราจึงกำหนดช่วงของค่าความเหนี่ยวนำสอดคล้องกับท้องตลาดคือ 0 –100 μH เพื่อความสะดวกในการจัดหาอุปกรณ์

จากตารางที่ 3-4 พลังงานสูงสุดที่ความเหนี่ยวนำจะได้รับมีค่า 26.22 mJ ซึ่งคิดเป็นค่ากำลังงานได้ดังนี้

กำลังงานสูงสุดที่ความเหนี่ยวนำได้รับ $P = 26.22e^{-3}/40e^{-3} = 0.66$ W

ค่ากำลังงานที่ความเหนี่ยวนำได้รับมีค่าต่ำมาก ดังนั้นเราสามารถใช้ค่าความเหนี่ยวนำที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป โดยมีค่าดังนี้

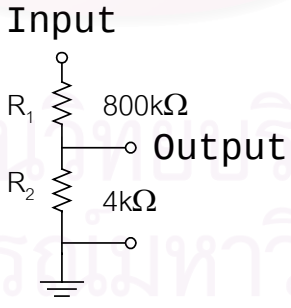
ค่า L ที่ใช้ในวงจร (μH)	10	22	32	40	50	60	72	80	90	100

ตารางที่ 3-5 ค่าความเหนี่ยวนำ L ที่ใส่ในวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

3.2.5 การออกแบบส่วน ดิไวเดอร์ ความต้านทาน

ดิไวเดอร์ ความต้านทานทำหน้าที่ลดทอนแรงดันอัดประจุไฟตรงที่มีพิกัด 800 V ให้ลดลงจนไม่เป็นอันตรายต่อวงจรควบคุม ค่าแรงดันที่ได้จาก ดิไวเดอร์ความต้านทาน วงจรควบคุมจะนำไปคำนวณและแสดงค่าแรงดันอัดประจุขณะนั้น ให้ผู้ใช้ได้ทราบ

วงจรควบคุมไม่ควรได้รับแรงดันเกิน 5 V เพราะอาจจะทำให้วงจรเสียหายได้ ดังนั้นจึงออกแบบให้ดิไวเดอร์มีอัตราส่วน (Ratio) เท่ากับ 1000:5 เพื่อป้องกันแรงดันเกินที่มาจากแรงดันอัดประจุ ดิไวเดอร์ที่ใช้ในวงจรเป็นไปตามรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-3 โวลเตท ดิไวเดอร์แบบความต้านทาน อัตราส่วน 1000:5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.6 การออกแบบวงจรอัดประจุ

IGBT ในวงจรอัดประจุ ทำหน้าที่เปิดปิดวงจรเพื่ออัดประจุให้กับ C_s และช่วยหยุดการทำงานของ SCRเพื่อป้องกันกระแสจากแหล่งจ่ายแรงดัน ไม่ให้ไหลเข้าไปในวงจร ซึ่งจะทำให้รูปคลื่นอิมพัลส์ผิดเพี้ยนไปจากปกติ

จากพิกัดแรงดันอัดประจุ 800 V ทำให้เราต้องเลือก IGBT ที่สามารถทนแรงดันระหว่างขาคอลเลกเตอร์ (Collector) กับ ขาอีมิเตอร์ (Emitter) ได้ไม่ต่ำกว่า 800 V เราเลือกใช้ IGBT เบอร์ IRG4PH50KD ซึ่งมีพิกัดแรงดันที่ 1200 V และนำกระแสสูงสุด 24 A คุณสมบัติในการเปิดปิดวงจรแสดงอยู่ในตารางที่ 3-6

Electrical Characteristics @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

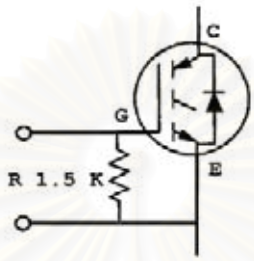
	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)CES}$	Collector-to-Emitter Breakdown Voltage③	1200	—	—	V	V_{GE} = 0V, I_C = 250µA
$\Delta V_{(BR)CES}/\Delta T_J$	Temperature Coeff. of Breakdown Voltage	—	0.91	—	V/°C	V_{GE} = 0V, I_C = 1.0mA
$V_{CE(on)}$	Collector-to-Emitter Saturation Voltage	—	2.77	3.5	V	I_C = 24A, V_{GE} = 15V
		—	3.28	—		I_C = 45A, See Fig. 2, 5
		—	2.54	—		I_C = 24A, T_J = 150°C
$V_{GE(th)}$	Gate Threshold Voltage	3.0	—	6.0		V_{CE} = V_{GE}, I_C = 250µA
$\Delta V_{GE(th)}/\Delta T_J$	Temperature Coeff. of Threshold Voltage	—	-10	—	mV/°C	V_{CE} = V_{GE}, I_C = 250µA
g_{fe}	Forward Transconductance ④	13	19	—	S	V_{CE} = 100V, I_C = 24A
I_{CES}	Zero Gate Voltage Collector Current	—	—	250	µA	V_{GE} = 0V, V_{CE} = 1200V
		—	—	6500		V_{GE} = 0V, V_{CE} = 1200V, T_J = 150°C
V_{FM}	Diode Forward Voltage Drop	—	2.5	3.5	V	I_C = 16A, See Fig. 13
		—	2.1	3.0		I_C = 16A, T_J = 150°C
I_{GES}	Gate-to-Emitter Leakage Current	—	—	±100	nA	V_{GE} = ±20V

Switching Characteristics @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
Q_g	Total Gate Charge (turn-on)	—	180	270	nC	I_C = 24A
Q_{ge}	Gate - Emitter Charge (turn-on)	—	25	38		V_{CC} = 400V, See Fig.8
Q_{gc}	Gate - Collector Charge (turn-on)	—	70	110		V_{GE} = 15V
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	87	—	ns	T_J = 25°C
t_r	Rise Time	—	100	—		I_C = 24A, V_{CC} = 800V
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	140	300		V_{GE} = 15V, R_G = 5.0Ω
t_f	Fall Time	—	200	300		Energy losses include "tail"
E_{on}	Turn-On Switching Loss	—	3.83	—	mJ	and diode reverse recovery
E_{off}	Turn-Off Switching Loss	—	1.90	—		See Fig. 9,10,18
E_{ts}	Total Switching Loss	—	5.73	7.9		
t_{sc}	Short Circuit Withstand Time	10	—	—	µs	V_{CC} = 720V, T_J = 125°C
						V_{GE} = 15V, R_G = 5.0Ω
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	67	—	ns	T_J = 150°C, See Fig. 10,11,18
t_r	Rise Time	—	72	—		I_C = 24A, V_{CC} = 800V
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	310	—		V_{GE} = 15V, R_G = 5.0Ω,
t_f	Fall Time	—	390	—		Energy losses include "tail"
E_{ts}	Total Switching Loss	—	8.36	—	mJ	and diode reverse recovery
L_E	Internal Emitter Inductance	—	13	—	nH	Measured 5mm from package
C_{ies}	Input Capacitance	—	2800	—	pF	V_{GE} = 0V
C_{oes}	Output Capacitance	—	140	—		V_{CC} = 30V, See Fig. 7
C_{res}	Reverse Transfer Capacitance	—	53	—		f = 1.0MHz
t_{rr}	Diode Reverse Recovery Time	—	90	135	ns	T_J = 25°C, See Fig. 14, I_F = 16A
		—	164	245		T_J = 125°C
I_{rr}	Diode Peak Reverse Recovery Current	—	5.8	10	A	T_J = 25°C, See Fig. 15, V_R = 200V
		—	8.3	15		T_J = 125°C
Q_{rr}	Diode Reverse Recovery Charge	—	260	675	nC	T_J = 25°C, See Fig. 16, di/dt = 200A/µs
		—	680	1838		T_J = 125°C
$di_{(rec)M}/dt$	Diode Peak Rate of Fall of Recovery	—	120	—	A/µs	T_J = 25°C, See Fig. 17
	During t_b	—	76	—		T_J = 125°C

ตารางที่ 3-6 คุณสมบัติการเปิดปิดวงจรของ IGBT เบอร์ IRG4PH50KD

การควบคุมการเปิดปิดวงจรของ IGBT จะใช้การควบคุมแรงดันระหว่างขาเกท(Gate) กับขาอีมิเตอร์ การเปิดปิดวงจรของ IGBT จะรวดเร็วมาก สังเกตได้จาก พารามิเตอร์ $t_{d(on)}$,$t_{d(off)}$,t_r และ t_f อยู่ในช่วงเวลา 67 – 400 ns อย่างไรก็ตาม การเปิดวงจรของ IGBT อาจเป็นไปได้ช้า เนื่องจากประจุที่ค้างอยู่ระหว่างขาเกท กับขาอีมิเตอร์ ทำให้ IGBT ยังคงทำงานอยู่ เราสามารถแก้ปัญหานี้ โดยการต่อความต้านทานขนาด 1.5 kΩ เพื่อใช้คายประจุที่ค้างอยู่ระหว่างขา เกท และ ขาอีมิเตอร์ ทำให้การเปิดวงจร ทำได้รวดเร็วขึ้น



รูปที่ 3-4 การต่อความต้านทานระหว่างเกท และอีมิเตอร์ของ IGBT

3.2.7 การออกแบบ SCR

SCR1 และ SCR2 ทำหน้าที่แทน สปาร์กแกป ในวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ และเช่นเดียวกับ IGBT SCR ที่นำมาใช้จะต้องมีพิกัดแรงดันอย่างต่ำ 800 V ในโครงงานนี้เราเลือกใช้ SCR เบอร์ IRF16TTS12 ที่มีพิกัดแรงดันระหว่างขาเกท (Gate) กับ ขาอีมิเตอร์ (Emitter) 1200 V และนำกระแสสูงสุด 10A สำหรับค่าพิกัดอื่น ๆ แสดงในตารางที่ 3-7

การสั่งให้ SCR ทำงานทำได้โดยการส่งพัลส์กระเข้าไปที่ขาเกท ซึ่งขนาดของกระพัลส์ที่ส่งเข้าไป เราจะใช้ค่าตามที่ตารางคุณสมบัติของ SCR เบอร์ IRF16TTS12 แนะนำไว้ซึ่งแสดงในรูปที่ 3-5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

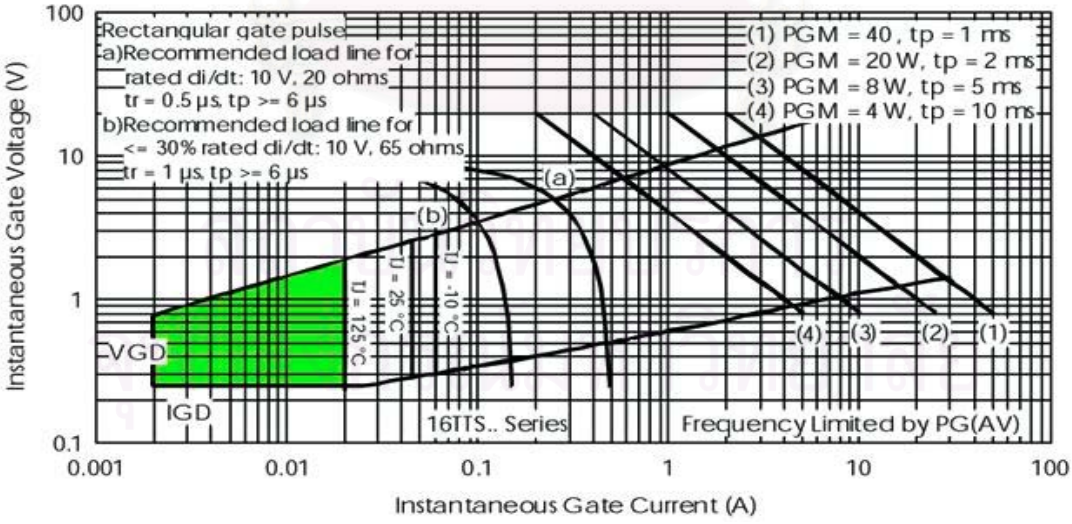
Voltage Ratings

Part Number	V_{RRM}, maximum peak reverse voltage V	V_{DRM}, maximum peak direct voltage V	I_{RRM}/I_{DRM} 125°C mA
16TTS08	800	800	10
16TTS12	1200	1200	
16TTS16	1600	1600	

Absolute Maximum Ratings

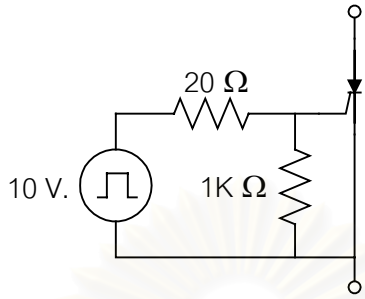
Parameters		16TTS..		Units	Conditions	
$I_{T(AV)}$	Max. Average On-state Current	10		A	@ T_C = 98°C, 180° conduction half sine wave	
I_{RMS}	Max. RMS On-state Current	16				
I_{TSM}	Max. Peak One Cycle Non-Repetitive	170			10ms Sine pulse, rated V_{RRM} applied	
	Surge Current	200			10ms Sine pulse, no voltage reapplied	
I^2t	Max. I^2t for fusing	144		A^2s	10ms Sine pulse, rated V_{RRM} applied	
		200			10ms Sine pulse, no voltage reapplied	
$I^2\sqrt{t}$	Max. $I^2\sqrt{t}$ for fusing	2000		$A^2\sqrt{s}$	t = 0.1 to 10ms, no voltage reapplied	
V_{TM}	Max. On-state Voltage Drop	1.4		V	@ 10A, T_J = 25°C	
r_t	On-state slope resistance	24.0		mΩ	T_J = 125°C	
$V_{T(TO)}$	Threshold Voltage	1.1		V		
I_{RM}/I_{DM}	Max. Reverse and Direct	0.5		mA	T_J = 25 °C	V_R = rated V_{RRM}/ V_{DRM}
	Leakage Current	10			T_J = 125 °C	
I_H	Holding Current	Typ.	Max.		Anode Supply = 6V, Resistive load, Initial I_T=1A	
		–	100	mA	16TTS08, 16TTS12	
		100	150		16TTS16	
I_L	Max. Latching Current	200		mA	Anode Supply = 6V, Resistive load	
dv/dt	Max. Rate of Rise of off-state Voltage	500		V/µs		
di/dt	Max. Rate of Rise of turned-on Current	150		A/µs		

ตารางที่ 3-7 พิกัดของ SCR เบอร์ IRF16TTS12



รูปที่ 3-5 กราฟแสดงลักษณะทั่วไปของเกท ของ SCRเบอร์ IRF16TTS12

เราจะใช้พัลส์กระแส ที่ค่าพิกัด di/dt ของเกท เพื่อให้ SCR สามารถปิดวงจรได้อย่างรวดเร็ว จากกราฟแสดงลักษณะทั่วไปของเกท ค่าที่แนะนำให้ใช้คือ 10 V 20 Ω ดังนั้นความต้านทานและแรงดันพัลส์ของวงจรลั่นไก SCR จึงเป็นไปตามรูปที่ 3-6 [6]

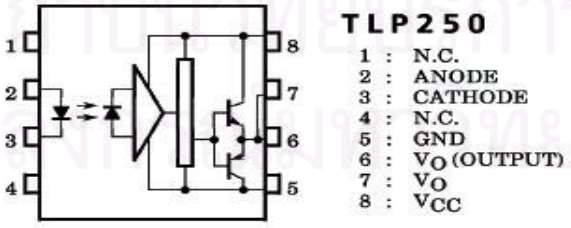


รูปที่ 3-6 วงจรลั่นไก SCR

3.2.8 การออกแบบวงจรขับ SCR และ IGBT

การควบคุมการทำงานของ SCR และ IGBT เราจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นวงจรควบคุมการทำงาน แต่ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถจ่ายกระแสออกได้สูงสุดเพียง 10 mA ในขณะที่ SCR เบอร์ IRF16TTS12 ต้องการกระแสจุชนวน (I_G) อย่างต่ำ 35 mA ดังนั้นการต่อขาสัญญาณของไมโครคอนโทรลเลอร์ เข้ากับขาเกทของ SCR โดยตรงจะไม่สามารถจุดชนวนให้ SCR ได้นอกจากนี้การต่อไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ากับขาเกทของ SCR โดยตรง อาจทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เสียหายจากแรงดันเกินจากขาเกทได้

เพื่อเป็นการแก้ปัญหา เราจะให้วงจรควบคุมสั่งงานผ่านวงจรขับ SCR โดยจะใช้วงจรแยกทางแสง (Opto Isolate) โดยการใช้ IC เบอร์ TLP250 ซึ่งมีวงจรภายในดังแสดงในรูปที่ 3-7



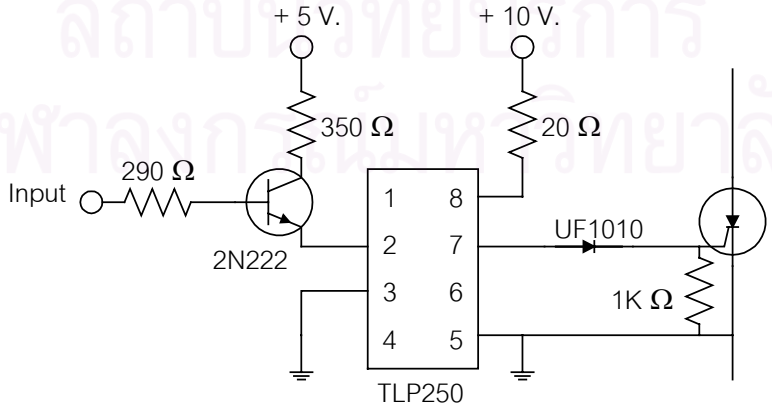
รูปที่ 3-7 วงวจรภายใน IC เบอร์ TLP250

IC เบอร์ TLP250 ทำงานดังนี้ เมื่อไม่มีกระแสไบแอสหลอด LED ในขาที่ 2 และ ขาที่ 3 แรงดันระหว่างขาที่ 7 กับ ขาที่ 5 แต่จะมีค่าเป็น 0 V แต่เมื่อมีกระแสไบแอสหลอด LED จนทำให้หลอด LEDเปล่งแสง ขาที่ 8 กับ ขาที่ 7 จะเสมือนลัดวงจรถึงกัน ทำให้มีแรงดันตกคร่อมระหว่างขาที่ 7 กับที่ขาที่ 5 ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมขาที่ 8 กับขาที่ 5 การทำงานของ IC เบอร์ TLP250 จึง เสมือนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่ควบคุมได้ โดยสามารถจ่ายกระแสสูงสุดได้ถึง 1.5 A และทนแรงดันเข้าระหว่างขาที่ 8 กับ 5 ได้ 24 V คุณสมบัติทางไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 3-8

CHARACTERISTIC		SYMBOL	TEST CIR-CUIT	TEST CONDITION	MIN.	TYP.*	MAX.	UNIT
Input Forward Voltage		V_F	—	I_F=10mA, Ta=25°C		1.6	1.8	V
Temperature Coefficient of Forward Voltage		$\Delta V_F/\Delta Ta$	—	I_F=10mA	—	−2.0	—	mV/°C
Input Reverse Current		I_R	—	V_R=5V, Ta=25°C		—	10	μA
Input Capacitance		C_T	—	V=0, f=1MHz, Ta=25°C	—	45	250	pF
Output Current	"H" Level	I_{OPH}	3	V_{CC}=30V (*1); I_F=10mA, V_{8-6}=4V	−0.5	−1.5	—	A
	"L" Level	I_{OPL}	2	V_{CC}=30V (*1); I_F=0, V_{6-5}=2.5V	0.5	2	—	
Output Voltage	"H" Level	V_{OH}	4	V_{CC1}=+15V, V_{EE1}=−15V, R_L=200Ω, I_F=5mA	11	12.8	—	V
	"L" Level	V_{OL}	5	V_{CC1}=+15V, V_{EE1}=−15V, R_L=200Ω, V_F=0.8V	—	−14.2	−12.5	
Supply Current	"H" Level	I_{CCH}	—	V_{CC}=30V, I_F=10mA, Ta=25°C	—	7	—	mA
				V_{CC}=30V, I_F=10mA	—	—	11	
	"L" Level	I_{CCL}	—	V_{CC}=30V, I_F=0mA, Ta=25°C	—	7.5	—	
				V_{CC}=30V, I_F=0mA	—	—	11	
Threshold Input Current	"Output L→H"	I_{FLH}	—	V_{CC1}=+15V, V_{EE1}=−15V, R_L=200Ω, V_O>0V	—	1.2	5	mA
Threshold Input Voltage	"Output H→L"	V_{FHL}		V_{CC1}=+15V, V_{EE1}=−15V, R_L=200Ω, V_O<0V	0.8	—	—	V
Supply Voltage		V_{CC}	—		10	—	35	V
Capacitance (Input-Output)		C_S	—	V_S=0, f=1MHz, Ta=25°C	—	1.0	2.0	pF
Resistance (Input-Output)		R_S	—	V_S=500V, Ta=25°C, R.H.≦60%	5×10^{10}	10^{14}	—	Ω

ตารางที่ 3-8 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ IC เบอร์ TLP250

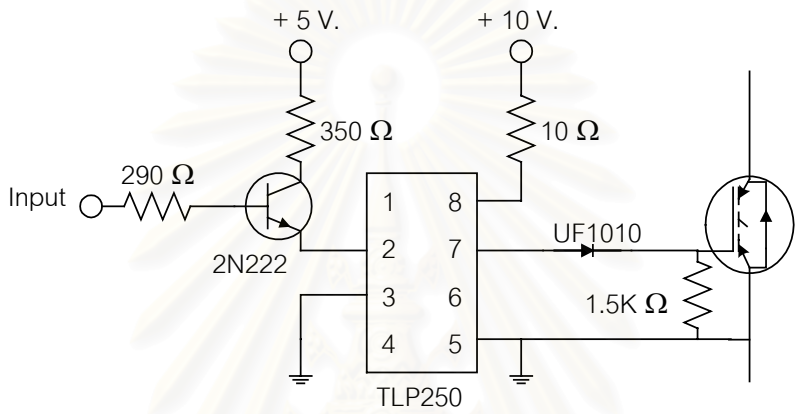
เราจะใช้ IC เบอร์ TLP250 เป็นตัวสร้างพัลส์ไปที่ขาเกต จากข้อมูลการขับขาเกท SCR เบอร์ 16TTS ในหัวข้อที่ 3.3.6 ค่าที่เลือกไว้คือ10 V 20 Ω ดังนั้นจะออกแบบวงจรขับ SCR ได้ตามรูปที่ 3-8



รูปที่ 3-8 วงจรขับ SCR

ทรานซิสเตอร์ 2N222 ใช้ขยายสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสให้ LED ได้เพียงพอ ความต้านทาน 350 Ω จะจำกัดกระแสไบแอสของ LED ไม่ให้สูงเกินไป นอกจากนี้เราใส่ไดโอดพิกัดแรงดัน 1 kV เพื่อป้องกันกระแสไหลผ่านย้อนกลับเข้า วงจรขับ SCR ส่วนความต้านทาน 1 kΩ ใช้คายประจุที่รอยต่อภายใน SCR

สำหรับวงจรขับ IGBT เราจะใส่วงจรเดียวกันกับที่ใช้ขับ SCR เนื่องจาก IGBT ใช้แรงดันควบคุมการทำงาน จึงเหมาะที่จะใช้กับ IC เบอร์ TLP250 นี้ เพียงแต่ปรับค่าความต้านทานด้านขาออกเป็น 10 Ω เพื่อให้แรงดันตกคร่อมระหว่างขาเกท กับขาอีมิเตอร์ มีค่าสูงพอที่จะสั่งให้ IGBT ทำงานได้

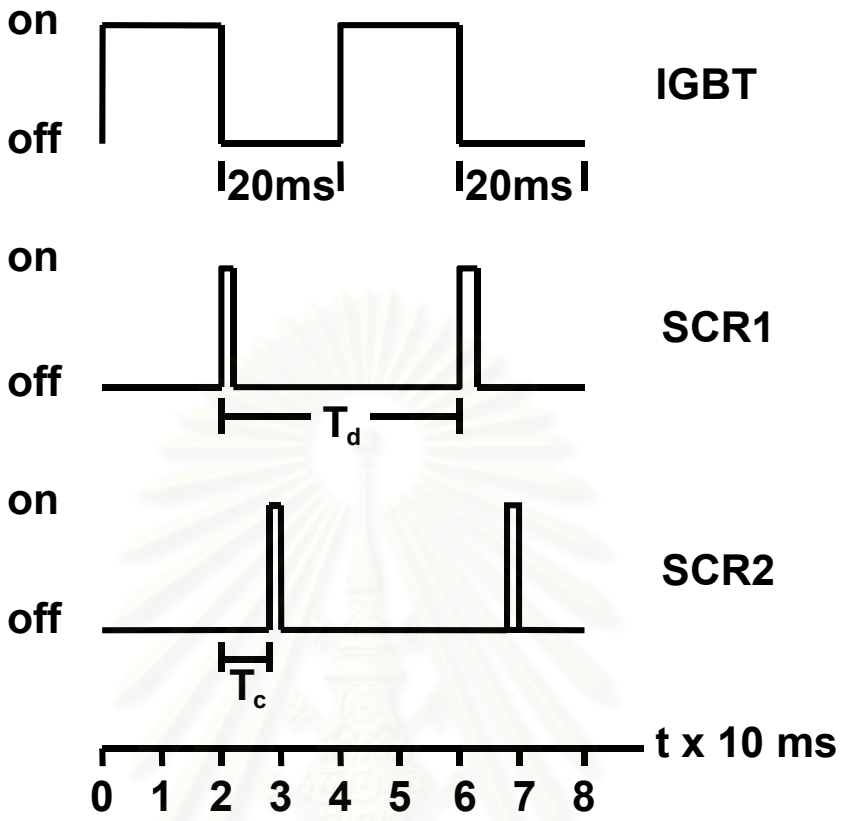


รูปที่ 3-9 วงจรขับ IGBT

3.3 การออกแบบส่วนของวงจรควบคุม

ในส่วนของวงจรควบคุม เราจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นวงจรควบคุมการทำงาน โดยจะรับค่าหน่วงเวลาระหว่างรูปคลื่น และค่าเวลาตัดรูปคลื่น แล้วสั่งให้ SCR1, SCR2 และ IGBT ทำงานตามเวลาและขั้นตอนที่ตั้งไว้ รวมถึงรับค่าแรงดันจาก ดิไวเดอร์ความต้านทาน ที่อยู่ในส่วนกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เพื่อนำมาแสดงผลให้ผู้ใช้งานทราบด้วย

ลำดับเวลาการทำงานของ IGBT ,SCR1 และ SCR2 เป็นไปตามรูปที่ 3-10 วิธีควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำได้โดยการเขียนโปรแกรม ผังการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงาน เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ แสดงในรูปที่ 3-11 และเมื่อเราต่อส่วนวงจรควบคุม เข้ากับส่วนกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ จะทำงานตามโปรแกรมที่เขียนไว้

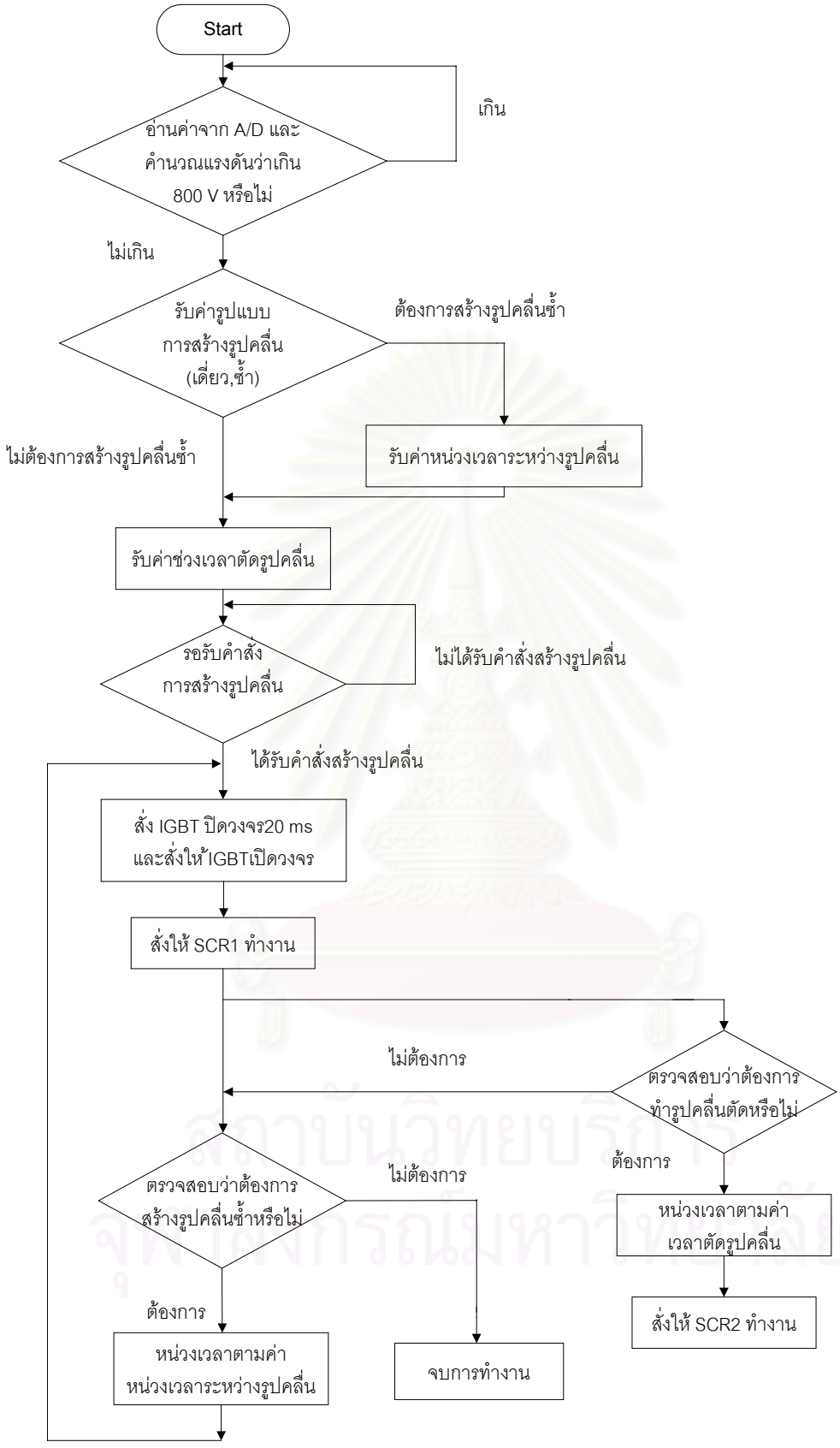


T_d : **เวลาหน่วงรูปคลื่น** (40 - 100 ms)

T_c : **เวลาตัดรูปคลื่น** (1 - 50 μs)

รูปที่ 3-10 ผังเวลาการทำงานของ IGBT ,SCR1 ,SCR2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3-11 ผังการทำงานของโปรแกรมในส่วนวงจรควบคุม

บทที่ 4

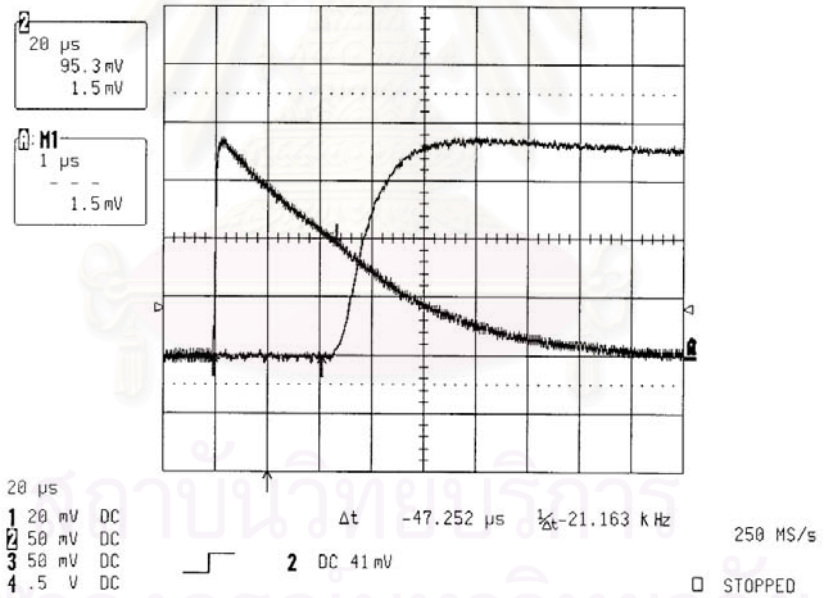
การทดสอบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในบทนี้เราจะทำการทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ โดยให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ สร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs และสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบตัด ที่ช่วงเวลาตัดรูปคลื่นต่าง ๆกันไป

4.1 การทดสอบสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 μs

การทดสอบในหัวข้อนี้ จะให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ สร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs ระดับแรงดันอัดประจุ 700 โวลท์ ที่ค่าตัวเก็บประจุ C_s ต่าง ๆ กัน โดยจะใช้ ดิไวเดอร์ ความต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC divider) อัตราส่วน 1:2860 เป็นอุปกรณ์ในการวัดแรงดันอิมพัลส์

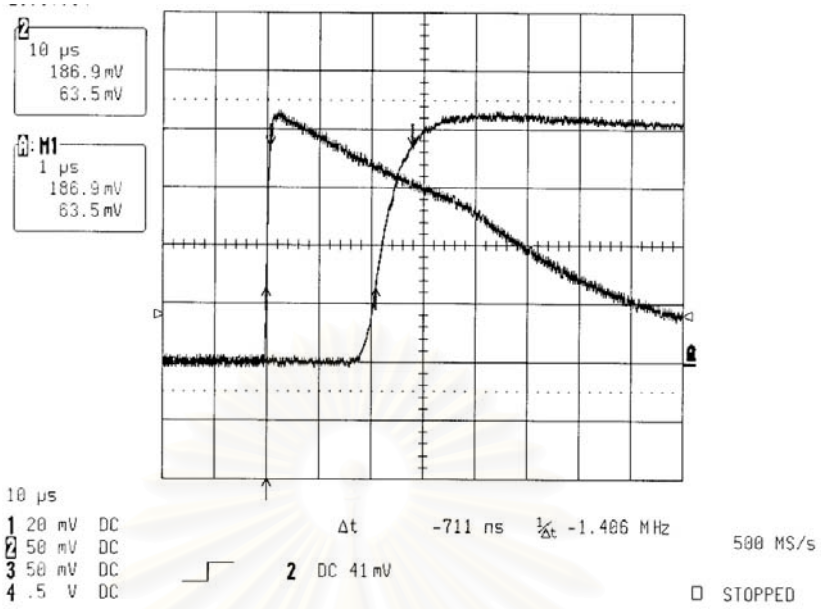
4.1.1 กรณี C_s มีค่าเป็น 5 nF



รูปที่ 4-1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs กรณี C_s มีค่า 5 nF

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	702 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	531.67 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	5 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	1.28 nF
ค่าความต้านทาน R_d	470 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	10000 Ω
ช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1)	1.47 μs	ช่วงเวลาหางคลื่น (T_2)	49.25 μs

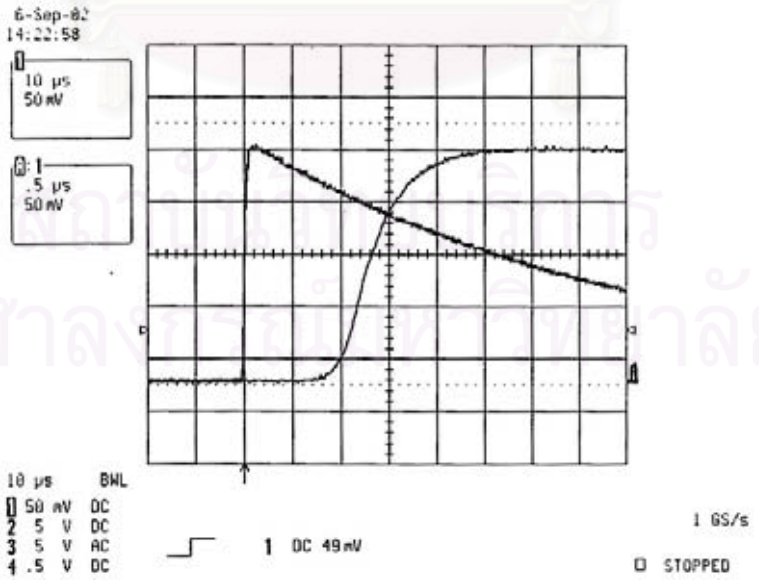
4.1.2 กรณี C_s มีค่าเป็น 10 nF



รูปที่ 4-2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 µs กรณี C_s มีค่า 10 nF

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	706 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	610.61 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	10 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	1.28 nF
ค่าความต้านทาน R_d	330 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	6800 Ω
ช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1)	1.18 µs	ช่วงเวลาหางคลื่น (T_2)	53.13 µs

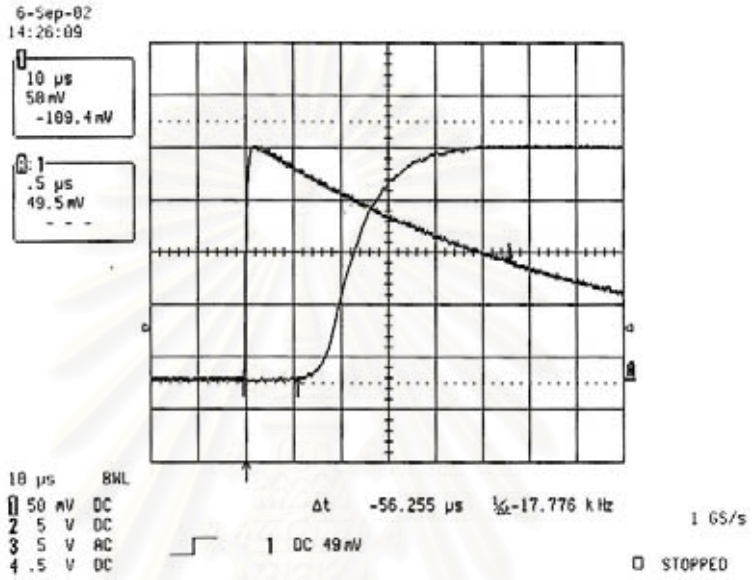
4.1.3 กรณี C_s มีค่าเป็น 22 nF



รูปที่ 4-3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 µs กรณี C_s มีค่า 22 nF

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	710 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	634.6 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	22 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	3 nF
ค่าความต้านทาน R_d	150 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	3300 Ω
ช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1)	1.19 μs	ช่วงเวลาหางคลื่น (T_2)	60 μs

4.1.4 กรณี C_s มีค่าเป็น 47 nF

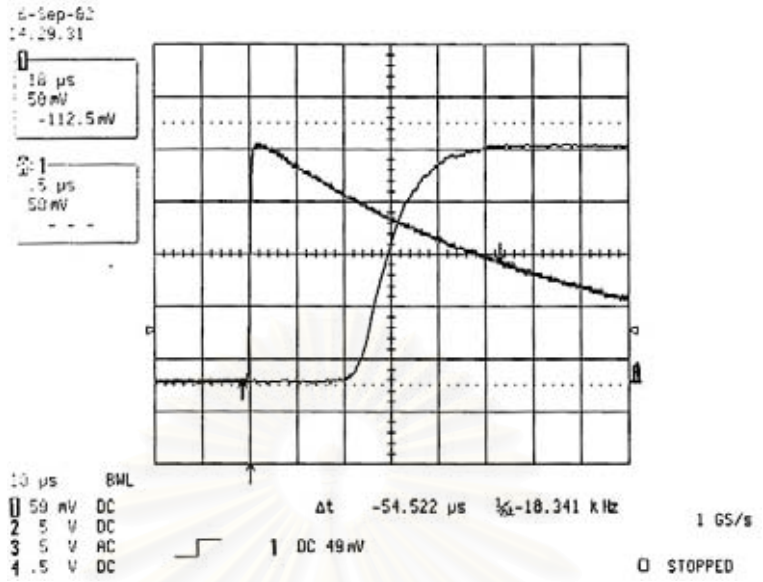


รูปที่ 4-4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs กรณี C_s มีค่า 47 nF

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	707.8 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	625.8 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	47 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	6.5 nF
ค่าความต้านทาน R_d	68 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	1500 Ω
ช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1)	1.16 μs	ช่วงเวลาหางคลื่น (T_2)	56 μs

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

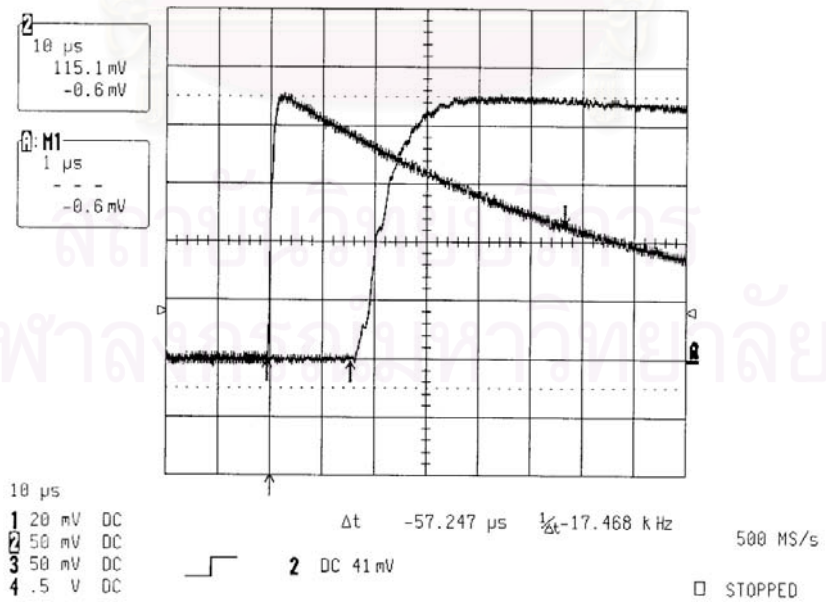
4.1.5 กรณี C_s มีค่าเป็น 100 nF



รูปที่ 4-5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 µs กรณี C_s มีค่า 100 nF

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	711.6 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	643.5 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	100 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	12.8 nF
ค่าความต้านทาน R_d	33 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	680 Ω
ช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1)	1.06 µs	ช่วงเวลาหางคลื่น (T_2)	54.5 µs

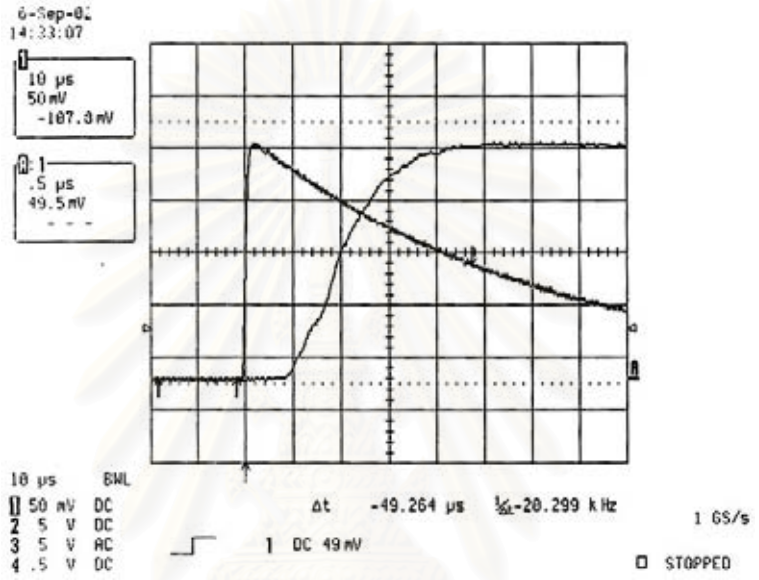
4.1.6 กรณี C_s มีค่าเป็น 220 nF



รูปที่ 4-6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 µs กรณี C_s มีค่า 220 nF

แรงดันอัดประจุ C_b (V_c)	712 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	641.8 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	220 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	22 nF
ค่าความต้านทาน R_d	22 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	330 Ω
ช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1)	1.37 μs	ช่วงเวลาหางคลื่น (T_2)	57.25 μs

4.1.7 กรณี C_s มีค่าเป็น 600 nF

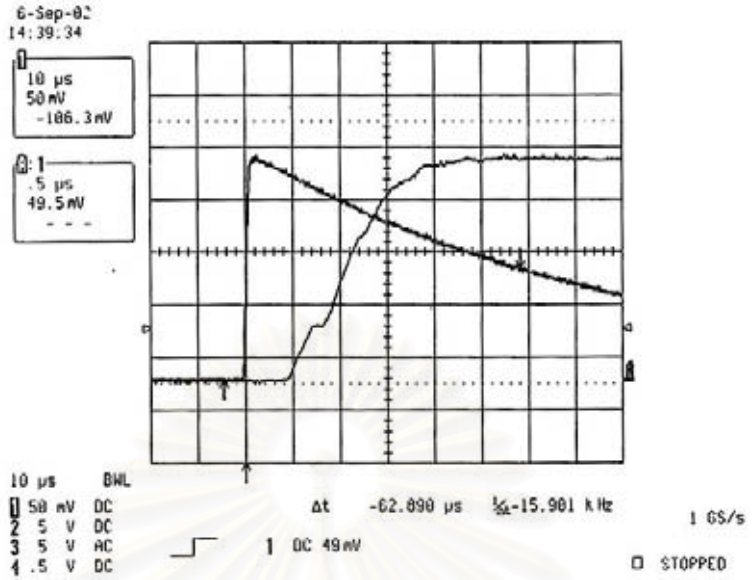


รูปที่ 4-7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs กรณี C_s มีค่า 600 nF

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	712 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	634.6 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	600 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	52 nF
ค่าความต้านทาน R_d	10 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	100 Ω
ช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1)	1.33 μs	ช่วงเวลาหางคลื่น (T_2)	49.3 μs

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.8 กรณี C_s มีค่าเป็น 1100 nF



รูปที่ 4-8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 µs กรณี C_s มีค่า 1100 nF

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	700.4 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	594.3 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	1100 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	109 nF
ค่าความต้านทาน R_d	4.7 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	68 Ω
ช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1)	1.42 µs	ช่วงเวลาหางคลื่น (T_2)	62.7 µs

ผลการทดสอบในหัวข้อ 4.1 จะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ที่สร้างขึ้น สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 µs ตามมาตรฐาน IEC 60-1 ที่ค่าตัวเก็บประจุ C_s ต่างๆกัน การเลือกค่า R_d, R_e เพื่อสร้างรูปคลื่น 1.2/50 µs ที่ค่า C_s และ C_b ต่างๆกัน สรุปอยู่ในตารางที่ 4-1 และ 4-2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

C_b/C_s (nF)	5	10	22	47	100	220	600	1100
1.28	330,470	220,330	220	220,330	220,330	220	150,220	220
3	220	150,220	150	150	100,150	100,150	100,150	100,150
6.5	150	100	68,100	100	47,68	47,68	47,68	47,68
12.8	100	68	47	33,47	33,47	33	33	33
22	100	47,68	33	22,33	33	15,22	15,22	15,22
52	*	47	22,33	15	10,15	6.8,10	6.8,10	6.8,10
109	*	*	22	10,15	6.8,10	4.7,6.8	3.3,4.7	4.7,3.3

หมายเหตุ * คือไม่สามารถสร้างรูปคลื่นได้

ตารางที่ 4-1 ค่า R_d (Ω) ที่ใช้สร้างหน้าคลื่น 1.2 μs ที่ค่า C_s และ C_b ต่างๆ เมื่อใช้ R_e ที่แสดงในตารางที่ 4-2

C_b/C_s (nF)	5	10	22	47	100	220	600	1100
1.28	10k	6.8k	3.3k	1.5k	680	330	100	68
3	10k	4.7k	2.2k,3.3k	1.5k	680	330	100	68
6.5	6.8k	4.7k	2.2k	1k,1.5k	680	330	100	68
12.8	3.3k	3.3k	2.2k	1k	680	330	100	68
22	2.2k	2.2k	1.5k	1k	470	220,330	100	68
52	*	1k	1k	680	470	220	100	68
109	*	*	470	470	330	220	100	47,68

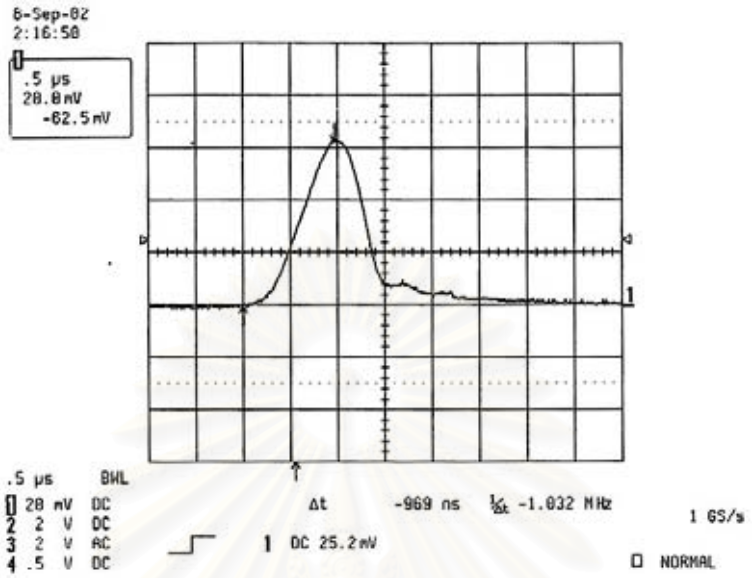
หมายเหตุ * คือไม่สามารถสร้างรูปคลื่นได้

ตารางที่ 4-2 ค่า R_e (Ω) ที่ใช้สร้างหางคลื่น 50 μs ที่ค่า C_s และ C_b ต่างๆ เมื่อใช้ R_d ที่แสดงในตารางที่ 4-1

4.2 การทดสอบสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบตัด

การทดสอบในหัวข้อนี้ เราจะให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ สร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบตัด ที่เวลาตัดรูปคลื่น (T_c) ต่าง ๆ กัน

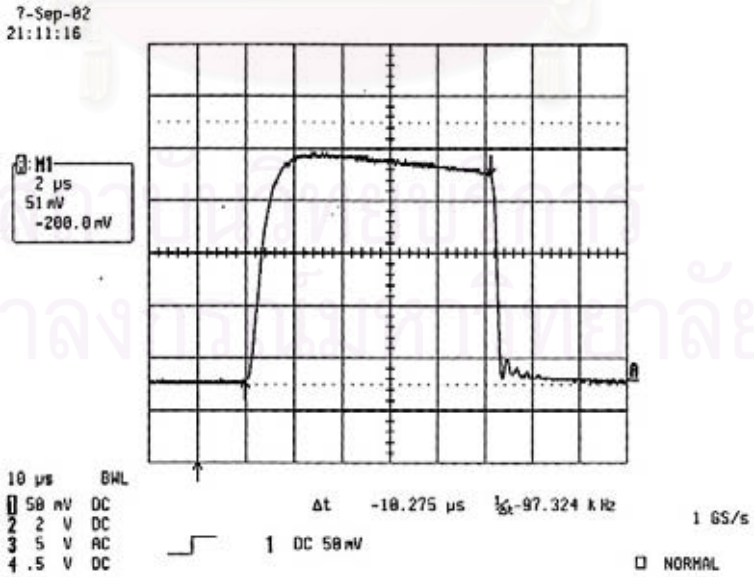
4.2.1 กรณีเวลาตัดรูปคลื่น (T_c) เท่ากับ 1 μs



รูปที่ 4-9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบตัด กรณี T_c เท่ากับ 1 μs

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	700 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	178.5 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	220 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	22 nF
ค่าความต้านทาน R_d	22 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	330 Ω

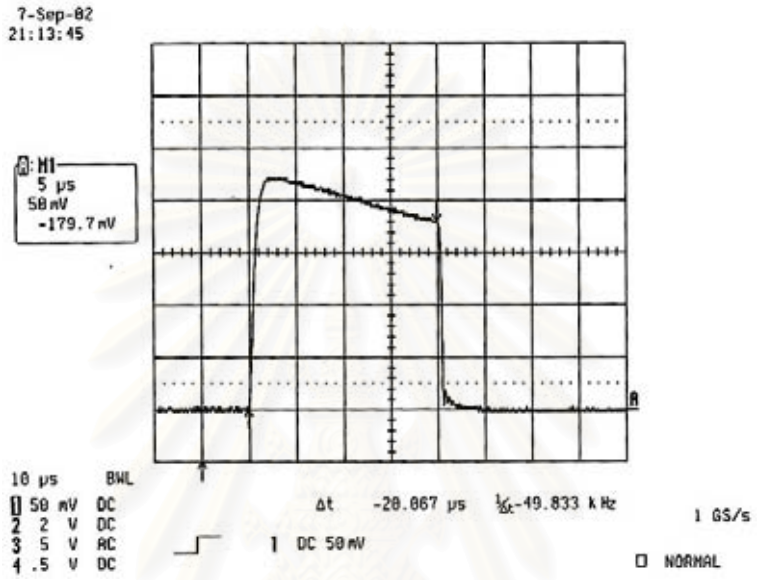
4.2.2 กรณีเวลาตัดรูปคลื่น (T_c) เท่ากับ 10 μs



รูปที่ 4-10 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบตัด กรณี T_c เท่ากับ 10 μs

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	700.4 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	625.8 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	220 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	22 nF
ค่าความต้านทาน R_d	22 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	330 Ω

4.2.3 **กรณีเวลาตัดรูปคลื่น** (T_c) **เท่ากับ 20 μs**

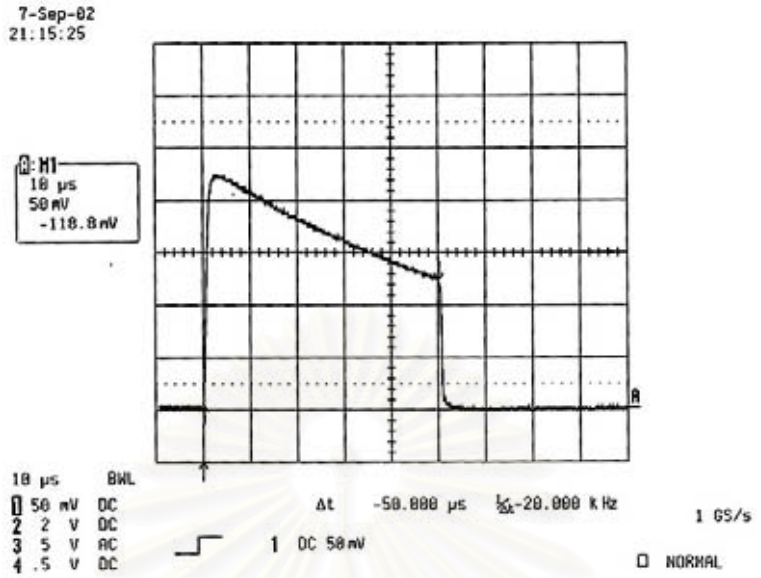


รูปที่ 4-11 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบตัด กรณี T_c เท่ากับ 20 μs

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	700 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	630 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	220 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	22 nF
ค่าความต้านทาน R_d	22 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	330 Ω

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.4 กรณีเวลาตัดรูปคลื่น (T_c) เท่ากับ 50 μs



รูปที่ 4-12 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบตัด กรณี T_c เท่ากับ 50 μs

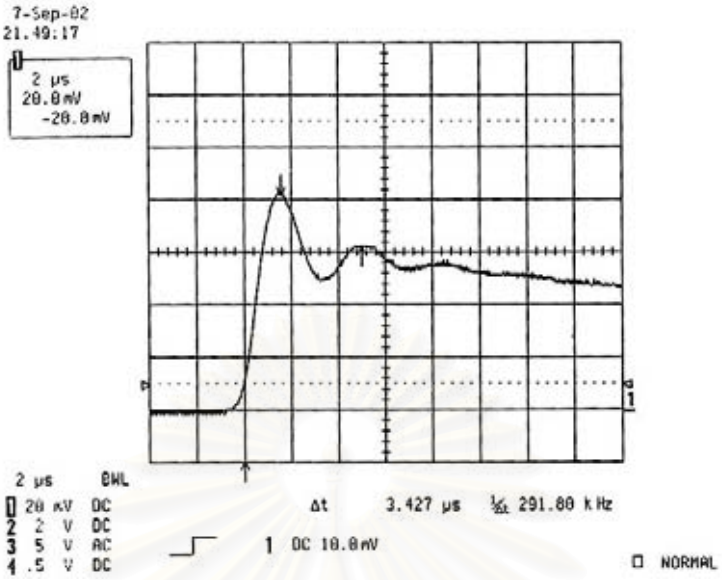
แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	700.8 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	621.2 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	220 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	22 nF
ค่าความต้านทาน R_d	22 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	330 Ω

จากการทดสอบ เราสามารถใช้ SCR สร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบตัด ที่เวลาตัดรูปคลื่นต่าง ๆ กัน โดยสามารถตัดรูปคลื่นได้เร็วสุดคือ 1 μs เนื่องจากข้อจำกัดของความเร็ว ในการทำงานของวงจรควบคุม และวงจรขับ SCR

4.3 การทดสอบสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs โดยใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่มเข้าไป

การทดสอบนี้จะคล้ายกับการทดสอบในหัวข้อ 4.1 แต่จะใส่ความเหนี่ยวนำตั้งแต่ 10 μH ไปจนถึง 100 μH เพื่อดูผลของการออสซิลเลตในวงจร และคำนวณค่าความเหนี่ยวนำที่ใส่เพิ่มจากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าความเหนี่ยวนำที่ใส่เพิ่มเข้าไป

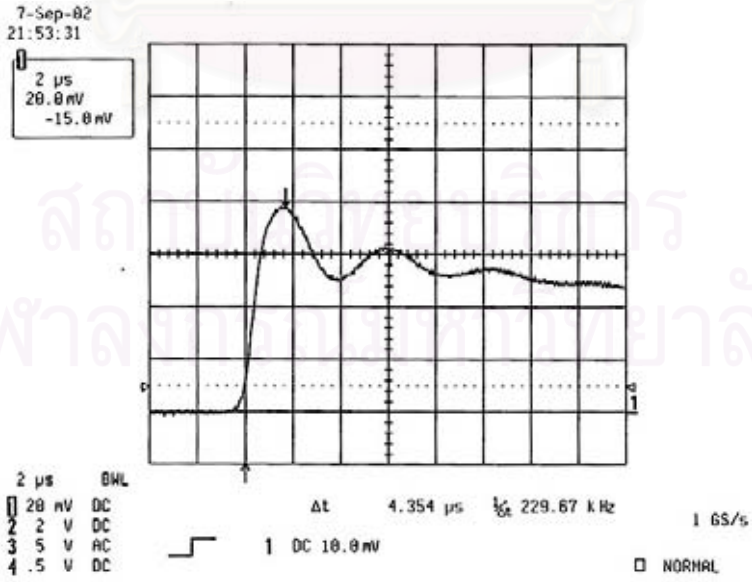
4.3.1 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 10 μH



รูปที่ 4-13 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 10 μH

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	198.6 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	236 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	220 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	22 nF
ค่าความต้านทาน R_d	22 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	330 Ω
ความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้	13 μH		

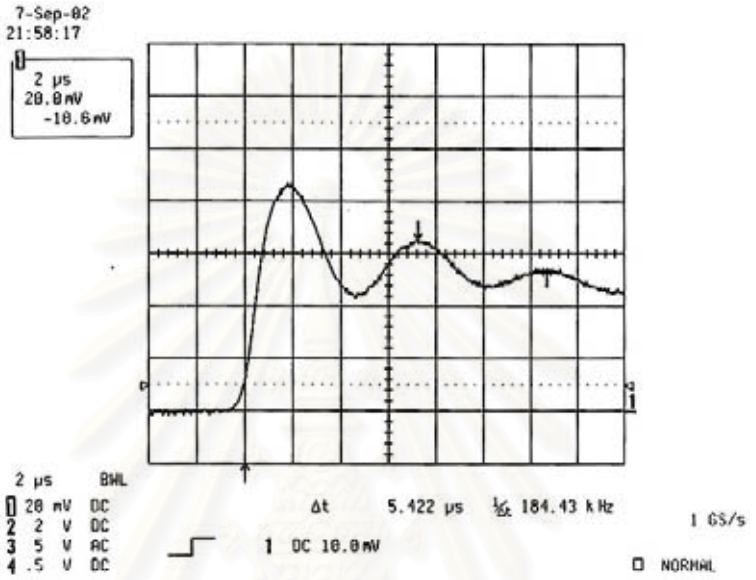
4.3.2 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 22 μH



รูปที่ 4-14 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 22 μH

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	200 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	221.65 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	220 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	22 nF
ค่าความต้านทาน R_d	22 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	330 Ω
ความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้	21.8 μH		

4.3.3 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 32 μH

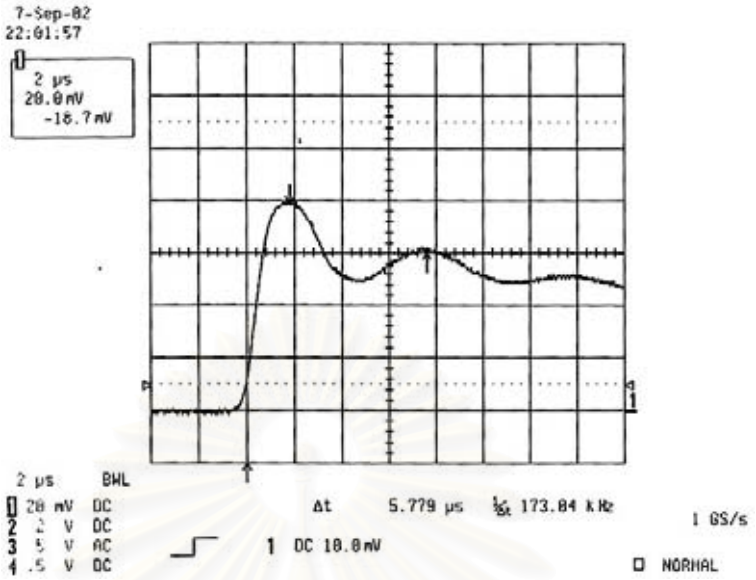


รูปที่ 4-15 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 32 μH

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	200 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	244.8 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	220 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	22 nF
ค่าความต้านทาน R_d	22 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	330 Ω
ความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้	33.8 μH		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

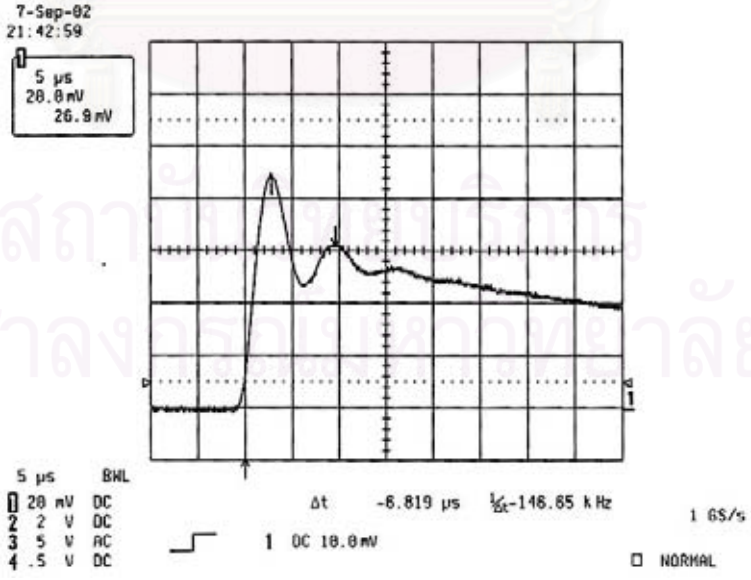
4.3.4 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 40 μH



รูปที่ 4-16 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 40 μH

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	200 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	230.5 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	220 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	22 nF
ค่าความต้านทาน R_d	22 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	330 Ω
ความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้	38.4 μH		

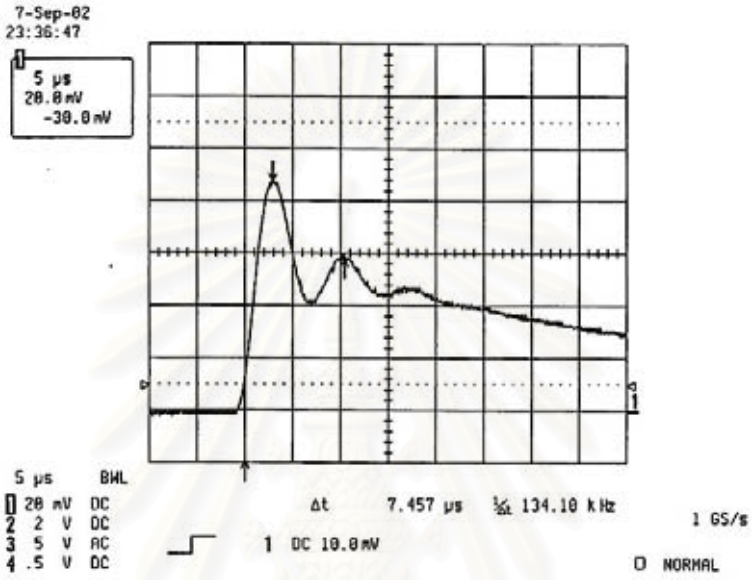
4.3.5 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 50 μH



รูปที่ 4-17 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 50 μH

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	199.2 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	257.4 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	220 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	22 nF
ค่าความต้านทาน R_d	22 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	330 Ω
ความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้	54 μH		

4.3.6 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 60 μH

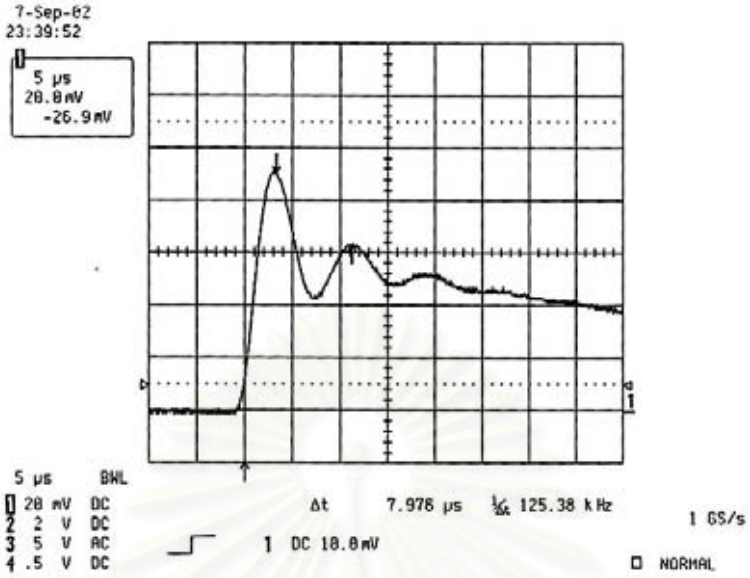


รูปที่ 4-18 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 60 μH

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	198 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	231.7 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	220 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	22 nF
ค่าความต้านทาน R_d	22 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	330 Ω
ความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้	64 μH		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

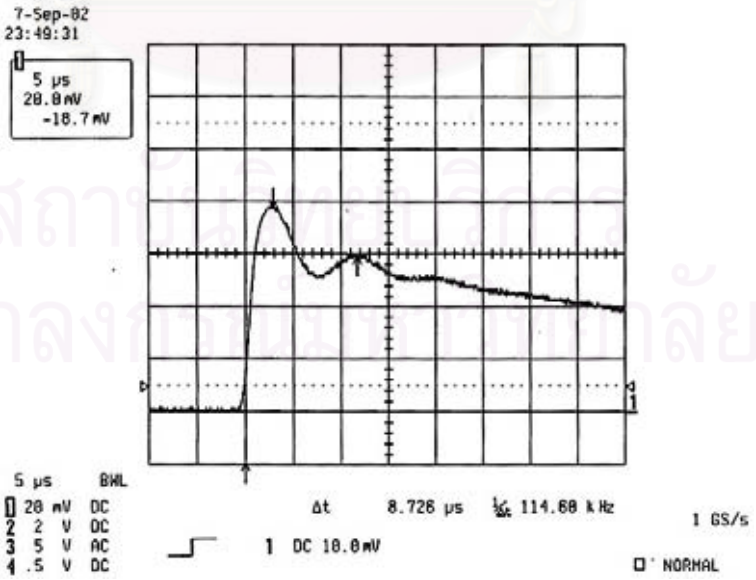
4.3.7 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 72 μH



รูปที่ 4-19 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 72 μH

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	198.4 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	259 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	220 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	22 nF
ค่าความต้านทาน R_d	22 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	330 Ω
ความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้	73 μH		

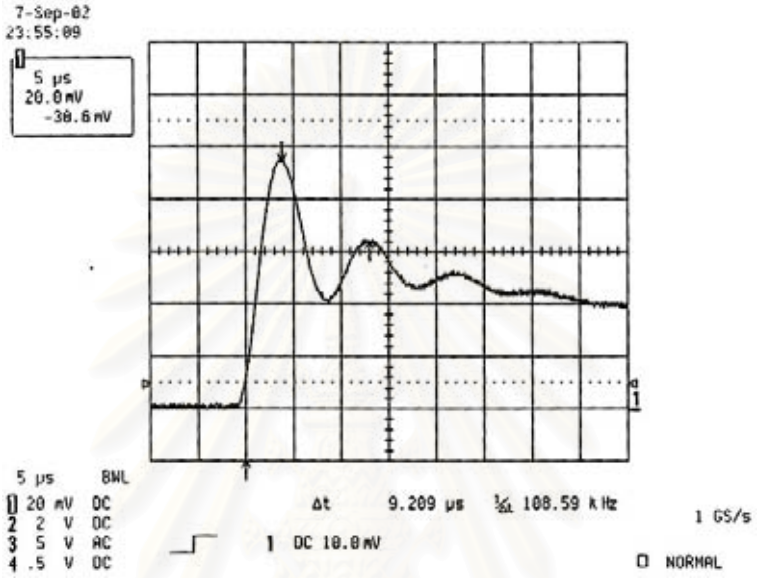
4.3.8 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 80 μH



รูปที่ 4-20 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 80 μH

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	198.4 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	220 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	220 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	22 nF
ค่าความต้านทาน R_d	22 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	330 Ω
ความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้	87.7 μH		

4.3.9 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 90 μH

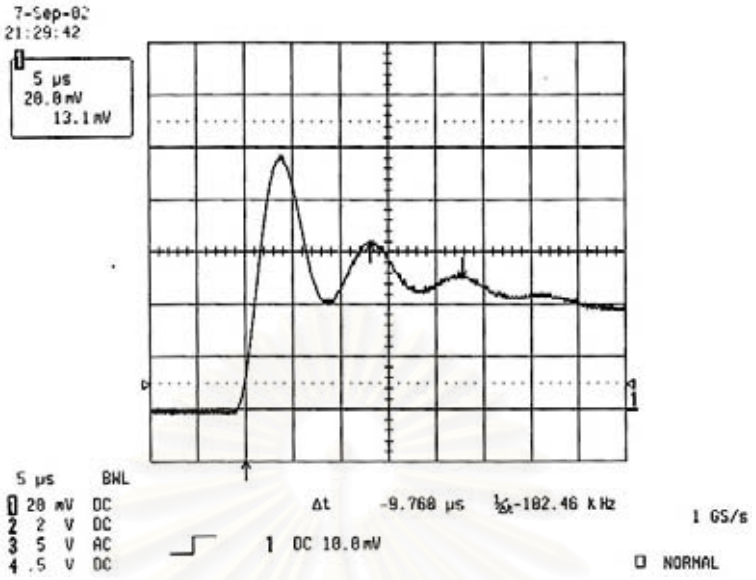


รูปที่ 4-21 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 90 μH

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	198.6 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	268 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	220 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	22 nF
ค่าความต้านทาน R_d	22 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	330 Ω
ความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้	97.6 μH		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.10 กรณีใส่ความเหนี่ยวนำ 100 μH



รูปที่ 4-22 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีใส่ความเหนี่ยวนำเพิ่ม 100 μH

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	201 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	275.1 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	220 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	22 nF
ค่าความต้านทาน R_d	22 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	330 Ω
ความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้	109 μH		

จากผลการทดสอบ การใส่ค่าความเหนี่ยวนำจะทำให้วงจรกำเนิดอัมพัลส์เกิดการออสซิลเลต ตามหลักการของวงจร RLC ซึ่งทำให้ได้ค่าแรงดันยอดคลื่นสูงกว่าค่าแรงดันอัดประจุ โดยเฉพาะที่ค่าความเหนี่ยวนำสูงๆ ผลการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำจากรูปคลื่นแสดงในตารางที่ 4-3 ค่าที่ได้จากการคำนวณ มีค่าใกล้เคียงกับความเหนี่ยวนำที่ใส่เข้าไป ยกเว้นในกรณี 10 μH ที่คลาดเคลื่อน 30 % เมื่อวัดค่าเหนี่ยวนำ ของตัวเหนี่ยวนำ 10 μH ด้วย LCR มิเตอร์ พบว่ามีค่าความเหนี่ยวนำ 11.7 μH ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อน จึงเป็น 11 % สรุปได้ว่า เครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์แบบพกพาได้ที่สร้างขึ้น สามารถตอบสนองต่อความเหนี่ยวนำได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง

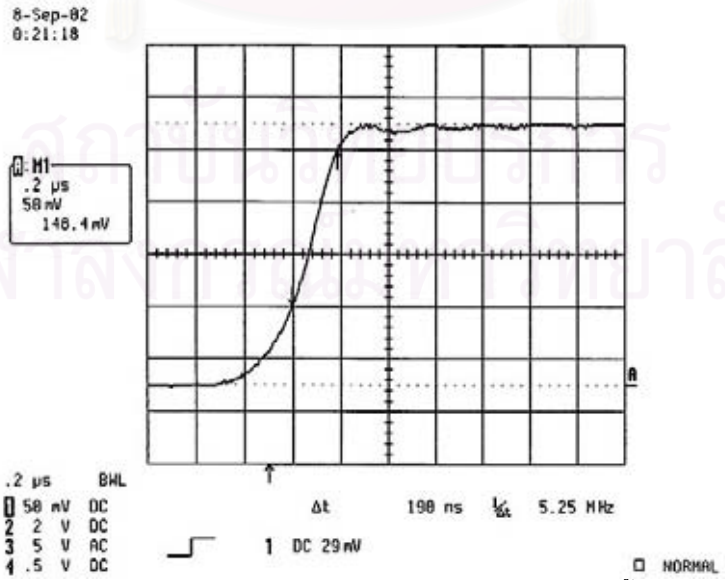
ความเหนี่ยวนำที่ใส่เพิ่ม (μH)	ความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้ (μH)	คลาดเคลื่อน (%)
10	13	30.00
22	21.8	0.91
32	33.8	5.62
40	38.4	4.00
50	54	8.00
60	64	6.67
72	73	1.39
80	87.7	9.63
90	97.6	8.44
100	109	9.00

ตารางที่ 4-3 การเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำ (μH) ที่คำนวณได้

4.4 การทดสอบสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่หน้าคลื่นสั้นที่สุด ,ยาวที่สุด

ในการทดสอบนี้ เราจะให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ สร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่มีหน้าคลื่นที่สั้นที่สุด และยาวที่สุด เพื่อหาพิกัดทางหน้าคลื่นที่สั้นที่สุด และยาวที่สุดที่เครื่องสามารถทำได้

4.4.1 การสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีหน้าคลื่นสั้นที่สุด



รูปที่ 4-23 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ที่หน้าคลื่นสั้นที่สุด

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	720 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	710 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	5 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	1.28 nF
ค่าความต้านทาน R_d	3.3 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	15000 Ω
ช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1)	0.29 μs		

จากการทดสอบ โดยการปรับค่า C_s ,C_b ,R_d ,R_e เครื่องกำเนิดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สามารถสร้างหน้าคลื่นสั้นที่สุด คือ 0.29 μs จากการจำลองวงจร ที่มีค่าองค์ประกอบเท่ากับในหัวข้อ 4.4.1 จะได้หน้าคลื่นเป็น 0.13 μs ซึ่งต่ำกว่าที่ได้จากผลการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของ SCR ในการเปิดปิดวงจรล่าช้า ทำให้หน้าคลื่นยาวกว่าที่ควรจะเป็น สำหรับหน้าคลื่นสั้นที่สุดในกรณีค่า C_s, C_b ต่างๆ แสดงในตารางที่ 4-4 โดยค่า R_d และ R_e เช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.4.1

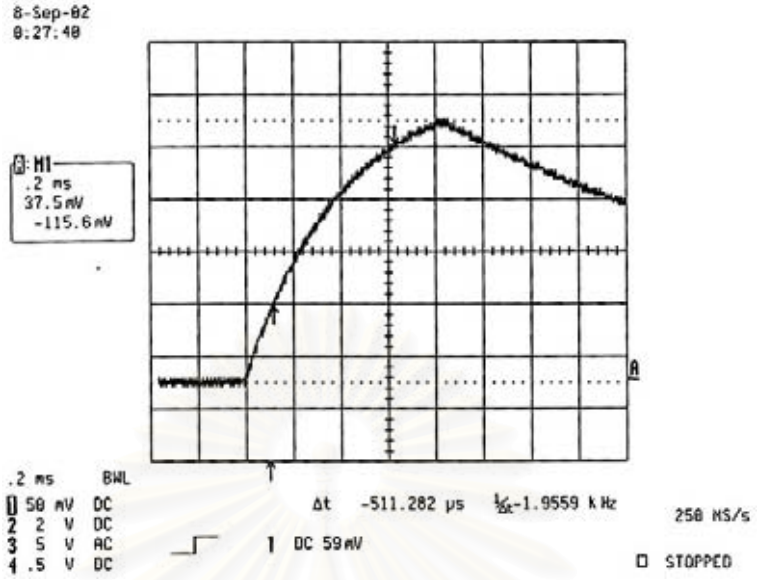
C_b/C_s (nF)	5	47	1100
1.28	0.29	0.29	0.29
3	0.29	0.29	0.29
6.5	0.29	0.29	0.29
12.8	0.31	0.33	0.31
22	0.45	0.41	0.45
52	*	0.61	0.61
109	*	0.93	0.92

หมายเหตุ * คือไม่สามารถสร้างรูปคลื่นได้

ตารางที่ 4-4 ค่าหน้าคลื่น (μs) สั้นที่สุดที่ C_s, C_b ต่างๆกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.2 การสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีหน้าคลื่นยาวที่สุด



รูปที่ 4-24 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ที่หน้าคลื่นยาวที่สุด

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	692.4 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	52.28 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	1100 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	109 nF
ค่าความต้านทาน R_d	4700 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	15000 Ω
ช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1)	853.8 µs		

เครื่องกำเนิดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สามารถสร้างหน้าคลื่นสั้นยาวที่สุดคือ 853.8 µs จากการจำลองวงจร หน้าคลื่นที่ยาวที่สุดมีค่า 1186.3 µs ซึ่งมากกว่าที่ได้จากผลการทดลองมาก ทั้งนี้เนื่องจากมีประจุรั่วไหลลงดินภายใน C_s ในช่วงเวลาหน้าคลื่น ทำให้หน้าคลื่นที่ได้นั้นสั้นกว่าที่ได้จากการจำลองวงจร สำหรับหน้าคลื่นยาวที่สุดในกรณีค่า C_s, C_b ต่างๆ แสดงในตารางที่ 4-5 โดยค่า R_d และ R_e เช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.4.2

สำนักวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

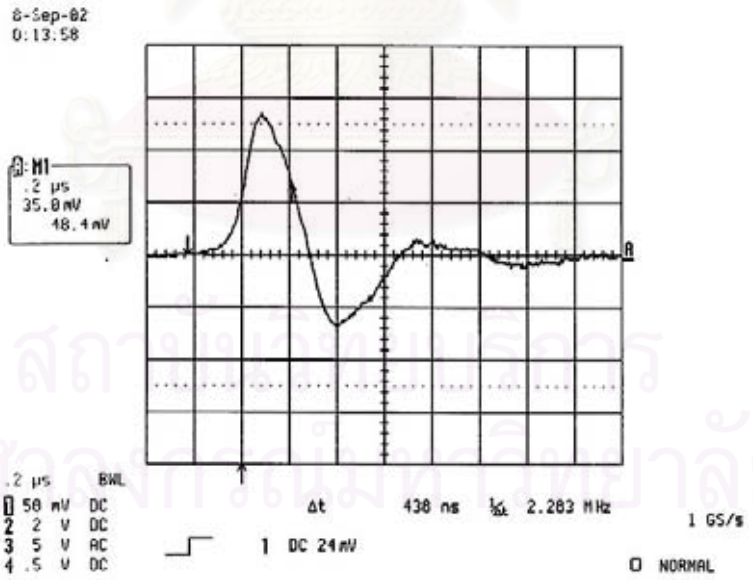
C_b/C_s (nF)	5	47	1100
1.28	11.72	22.4114	24.60
3	16.23	34.0847	35.34
6.5	27.25	49.1982	52.71
12.8	33.88	62.7085	66.45
22	42.42	82.665	132.35
52	48.03	105.21	227.12
109	50.38	131.5793	853.80

ตารางที่ 4-5 ค่าหน้าคลื่น (μs) ยาวที่สุดที่ C_s, C_b ต่างๆกัน

4.5 การทดสอบสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่หางคลื่นสั้นที่สุด ,ยาวที่สุด

ในการทดสอบนี้ เราจะให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ สร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่มีหางคลื่นที่สั้นที่สุด และยาวที่สุด เพื่อหาพิกัดทางหางคลื่นที่สั้นที่สุด และยาวที่สุด ที่เครื่องสามารถทำได้

4.5.1 การสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีหางคลื่นสั้นที่สุด



รูปที่ 4-25 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ที่หางคลื่นสั้นที่สุด

แรงดันอัดประจุ C_b (V_c)	700 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	272.6 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	5 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	1.28 nF
ค่าความต้านทาน R_d	4700 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	10 Ω
ช่วงเวลาหางคลื่น (T_2)	0.44 μs		

จากการทดสอบ หางคลื่นที่สั้นที่สุดที่ทำได้คือ 0.44 μs และจากการจำลองวงจรหางคลื่นสั้นที่สุดมีค่า 5.05 μs เมื่อพิจารณาค่า R_e ที่ใช้คือ 10 Ω ซึ่งมีค่าต่ำกว่า R_d มาก ดังนั้นจึงเกิดการคายประจุอย่างรวดเร็วผ่าน R_e โดยไม่มีประจุไหลเข้าไปที่ C_b เลย ทำให้หางคลื่นเกิดจากการคายประจุระหว่าง C_s กับ R_e เท่านั้น ค่าหางคลื่นที่ได้จึงสั้นกว่าที่ได้จากการจำลองมาก

ค่าหางคลื่นสั้นที่สุดที่ค่า C_s, C_b ต่างๆ โดยมีค่า R_d และ R_e เท่าเดิมแสดงในตารางที่ 4-6

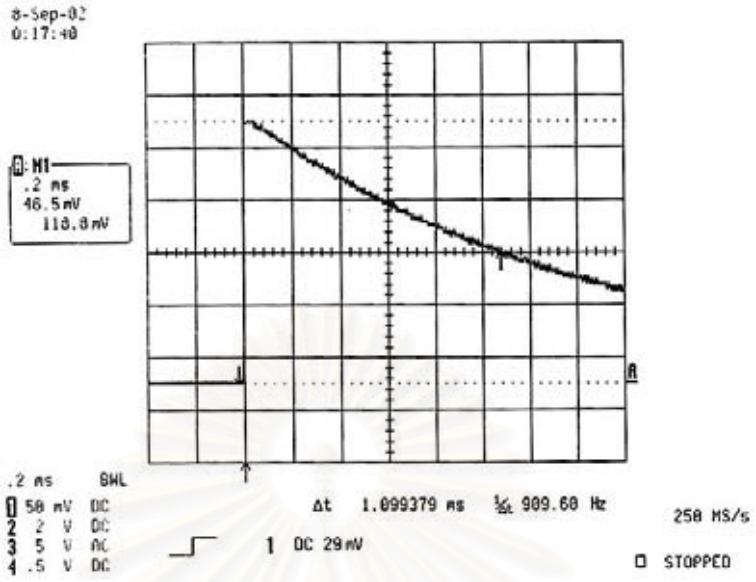
C_b/C_s (nF)	5	47	1100
1.28	0.44	1.25	10.00
3	0.73	1.23	9.93
6.5	0.78	1.25	9.99
12.8	0.85	1.29	9.99
22	0.85	1.25	9.99
52	X	1.51	9.98
109	X	x	10.47

หมายเหตุ * คือไม่สามารถสร้างรูปคลื่นได้

ตารางที่ 4-6 ค่าหางคลื่น (μs) สั้นที่สุดที่ C_s, C_b ต่างๆกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5.2 การสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ กรณีหางคลื่นยาวที่สุด



รูปที่ 4-26 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ที่หางคลื่นยาวที่สุด

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	700 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	661.52 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	1100 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	109 nF
ค่าความต้านทาน R_d	3.3 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	15000 Ω
ช่วงเวลาหางคลื่น (T_2)	1100 μs		

การทดสอบในหัวข้อนี้ เราสามารถสร้างหางคลื่นยาวที่สุดมีค่า 1100 μs และจากการจำลองวงจร หางคลื่นยาวที่สุดคือ 12.5 ms ซึ่งเกิดจากประจุที่สะสมอยู่ใน C_s รั่วออกไปโดยไม่ผ่าน R_e ทำให้หางคลื่นสั้นกว่าที่จำลองไว้

ค่าหางคลื่นยาวที่สุดที่ค่า C_s, C_b ต่างๆ โดยมีค่า R_d และ R_e เท่าเดิมแสดงในตารางที่ 4-7

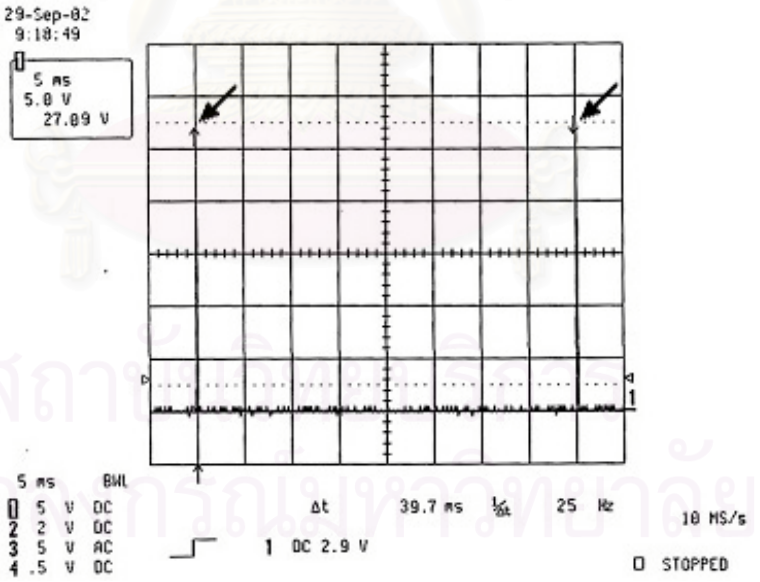
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

C_b/C_s (nF)	5	47	1100
1.28	76.93	114.96	109.88
3	89.45	133.53	124.50
6.5	124.50	169.00	162.00
12.8	170.80	221.27	211.60
22	292.86	319.66	326.61
52	504.22	572.49	593.12
109	1100.00	1100.00	1100.00

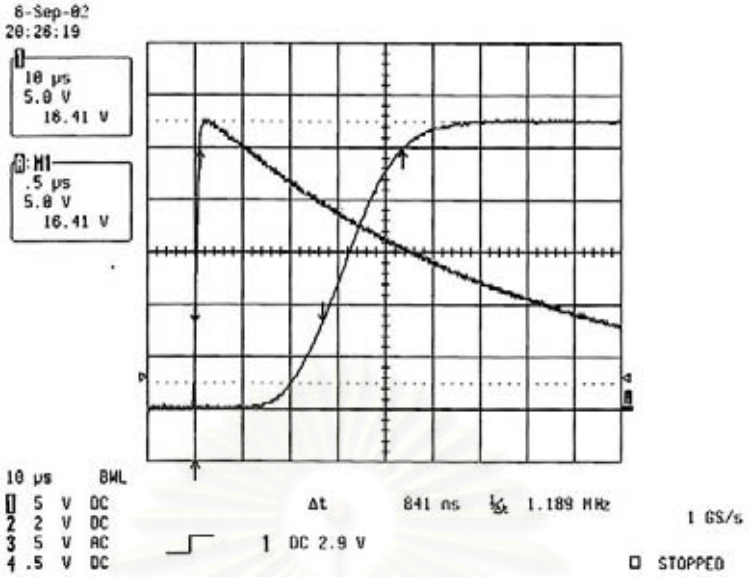
ตารางที่ 4-7 ค่าหางคลื่น (μs) ยาวที่สุดที่ C_s, C_b ต่างๆกัน

4.6 การทดสอบสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ซ้ำ

การทดสอบในหัวข้อนี้ เราจะให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ สร้างรูปคลื่นซ้ำ ของแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs โดยสร้างรูปคลื่นซ้ำในอัตรา 25 Hz หรือเวลาหน่วงระหว่างรูปคลื่น 40 ms



รูปที่ 4-27 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ที่สร้างซ้ำทุก 40 ms



รูปที่ 4-28 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ที่ได้จากการสร้างรูปคลื่นซ้ำ

แรงดันอัดประจุ C_s (V_c)	30 V	แรงดันค่ายอด (V_p)	27.5 V
ค่าตัวเก็บประจุ C_s	220 nF	ค่าตัวเก็บประจุ C_b	22 nF
ค่าความต้านทาน R_d	22 Ω	ค่าความต้านทาน R_e	330 Ω
ช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1)	1.4 µs	ช่วงเวลาหางคลื่น (T_2)	54 µs

จากการทดสอบในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นว่า เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบไว้สามารถสร้างรูปคลื่นซ้ำได้สูงสุด 25 Hz หรือทุกๆ 40 ms โดยรูปคลื่นที่ได้ มีช่วงเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น เหมือนกับในกรณี การสร้างรูปคลื่นเดียว ซึ่งเป็นไปตามที่ออกแบบไว้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากผลการทดสอบ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพาได้ สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs ที่ค่าตัวเก็บประจุ C_s ต่างๆกันได้ โดยทั้งช่วงเวลาหน้าคลื่น และช่วงเวลาหางคลื่น เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60-1 คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ที่สร้างขึ้น แสดงในตารางที่ 6-1

พิกัดแรงดันอัดประจุ C_s (V)	200 - 800
ค่าตัวเก็บประจุ C_s ที่ปรับเปลี่ยนได้ (nF)	5 ,10 ,22 ,47 ,100 ,220 ,600 ,1100
ค่าตัวเก็บประจุ C_b ที่ปรับเปลี่ยนได้ (nF)	1.28 ,3 ,6.5 ,2.8 ,22 ,52 ,109
ค่าความต้านทาน R_d ที่ปรับเปลี่ยนได้ (Ω)	3.3 ,4.7,6.8 ,10 ,15 ,22 ,33 ,47 ,68 ,100 ,150 ,220 ,330 ,470 ,680 ,1K ,1.5K ,2.2K ,3.3K ,4.7K
ค่าความต้านทาน R_e ที่ปรับเปลี่ยนได้ (Ω)	10 ,15 ,22 ,33 ,47 ,68 ,100 ,150 ,220 ,330 ,470 ,680 ,1K ,1.5K ,2.2K ,3.3K ,4.7K ,6.8K ,10K ,15K
ค่าความเหนี่ยวนำที่สามารถเพิ่มเข้าในวงจร (μH)	10 ,22 ,32 ,40 ,50 ,60 ,72 ,80 ,90 ,100
อัตราการสร้างรูปคลื่นซ้ำสูงสุด (Hz)	25
ช่วงเวลาหน่วงระหว่างรูปคลื่นที่สามารถทำได้ (ms)	40 - 100
ช่วงเวลาตัดรูปคลื่นที่สามารถทำได้ (ms)	1 - 50
ช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1) ที่สามารถทำได้ (μs)	0.29 – 853.8
ช่วงเวลาหางคลื่น (T_2) ที่สามารถทำได้ (μs)	0.44 - 1100
แรงดันไฟฟ้าเลี้ยงเครื่อง	220 V ,2A

ตารางที่ 5-1 คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ ที่จัดสร้างขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในโครงงานนี้เราใช้ SCR แทนการใช้สปาร์กแกป ซึ่งมีข้อดีหลายประการคือ SCR สามารถเปิดปิดวงจรได้อย่างรวดเร็ว และสามารถควบคุมการเปิดปิดวงจรได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้การใช้ SCR ทำให้สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ค่าแรงดันยอดต่ำได้ ซึ่งค่าสปาร์กแกปไม่สามารถทำได้ อย่างไรก็ตามการใช้ SCR ก็มีข้อเสียเช่นกันนั่นคือ SCR มีพิกัดแรงดันต่ำ เมื่อเทียบกับราคาของ SCR นอกจากนี้ยังมีปัญหาเรื่องกระแสยึด (Holding current, I_H) ซึ่งทำให้เกิดกระแสจากแหล่งจ่ายแรงดัน ไหลเข้ามาในวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ และปัญหาเรื่องการบังคับให้ SCR หยุดนำกระแส หรือเปิดวงจร โดยสำหรับโครงงานนี้จะใช้วิธี ตัดแหล่งจ่ายแรงดันออกจากวงจรโดยใช้ IGBT เพื่อให้ SCR หยุดทำงานและป้องกันปัญหาเรื่องกระแสไหลตามที่เกิดขึ้น

การแก้ปัญหาเรื่องกระแสไหลตาม อาจทำได้โดยการเลือก SCR ที่มีค่ากระแสยึดต่ำ เนื่องจาก SCR จะหยุดนำกระแส เมื่อกระแสที่ไหลผ่าน SCR ต่ำกว่าค่ากระแสยึด แต่เนื่องจาก SCR ที่มีค่ากระแสยึดต่ำ จะมีพิกัดทางแรงดันต่ำ ทำให้พิกัดการต่อ SCR เพียงตัวเดียวอาจไม่สามารถทนต่อพิกัดแรงดันอัดประจุในโครงงานนี้ได้

ผู้วิจัยได้ทดลองนำ SCR สองตัวมาต่อนุกรมเพื่อเพิ่มพิกัดทางแรงดันพบว่า พบว่ารูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากการใช้ SCR สองตัวต่ออนุกรมกัน จะทำให้รูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนไปที่บริเวณยอดคลื่น เนื่องจาก SCR แต่ละตัวจะมีคุณสมบัติในการเปิดปิดวงจรที่ต่างกัน แม้ว่าจะเป็นยี่ห้อและรุ่นเดียวกันก็ตาม การเปิดปิดวงจรที่ไม่ตรงกันนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้รูปคลื่นผิดเพี้ยนไป

การพัฒนาโครงงานนี้ในอนาคต เราอาจจะเลือกใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดอื่นมาใช้แทน SCR ได้ แต่จะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของอุปกรณ์นั้นๆว่า มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับคุณสมบัติของ SCR หรือไม่ ซึ่งอาจจะทำให้แก้ปัญหาในเรื่องกระแสยึด และกระแสไหลตาม ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ SCR ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. IEC 60-1:1989, High voltage test technicques, Part 1, Geneva, Switzerland.
2. Kuffel, E. and Zaengl, W.S., High voltage engineering fundamentals, Pergamon press ,Oxford , 1984.
3. EMIL HAEFELY CORP, Manual for Recurrent Surge Generator Type 48, EMIL HAEFELY CORP.
4. Muhammad H. Rashid, SPICE for Electronics and Electric Power, Prentice-Hall International, Inc.
5. ดร. สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2536
6. ดร.โคทม อารียา, วงจรอิเล็กโทรนิกส์ เล่ม 3: วงจรไม่เชิงเส้นและวงจรกำลัง, บริษัท ซีเอ็ด ยูเคชั่น จำกัด, 2535

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PH50KD

International
IOR Rectifier

PD- 91575B

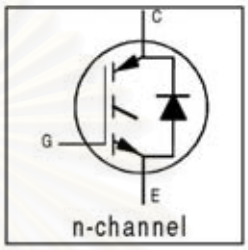
IRG4PH50KD

INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR WITH ULTRAFAST SOFT RECOVERY DIODE

Short Circuit Rated
UltraFast IGBT

Features

- High short circuit rating optimized for motor control, t_{sc} =10µs, V_{CC} = 720V , T_J = 125°C, V_{GE} = 15V
- Combines low conduction losses with high switching speed
- Tighter parameter distribution and higher efficiency than previous generations
- IGBT co-packaged with HEXFRED™ ultrafast, ultrasoft recovery antiparallel diodes



V_{CES} = 1200V

$V_{CE(on)\ typ.}$ = 2.77V

@V_{GE} = 15V, I_C = 24A

Benefits

- Latest generation 4 IGBT's offer highest power density motor controls possible
- HEXFRED™ diodes optimized for performance with IGBTs. Minimized recovery characteristics reduce noise, EMI and switching losses
- This part replaces the IRGPH50KD2 and IRGPH50MD2 products
- For hints see design tip 97003

TO-247AC

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
V_{CES}	Collector-to-Emitter Voltage	1200	V
I_C @ T_C = 25°C	Continuous Collector Current	45	A
I_C @ T_C = 100°C	Continuous Collector Current	24	
I_{CM}	Pulsed Collector Current ①	90	
I_{LM}	Clamped Inductive Load Current ②	90	
I_F @ T_C = 100°C	Diode Continuous Forward Current	16	
I_{FM}	Diode Maximum Forward Current	90	
t_{sc}	Short Circuit Withstand Time	10	µs
V_{GE}	Gate-to-Emitter Voltage	± 20	V
P_D @ T_C = 25°C	Maximum Power Dissipation	200	W
P_D @ T_C = 100°C	Maximum Power Dissipation	78	
T_J T_{STG}	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +150	°C
	Soldering Temperature, for 10 sec.	300 (0.063 in. (1.6mm) from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 Screw.	10 lbf•in (1.1 N•m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case - IGBT	—	—	0.64	°C/W
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case - Diode	—	—	0.83	
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, flat, greased surface	—	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient, typical socket mount	—	—	40	
Wt	Weight	—	6 (0.21)	—	g (oz)

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PH50KD (ต่อ)

IRG4PH50KD

International
IOR Rectifier

Electrical Characteristics @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)CES}$	Collector-to-Emitter Breakdown Voltage③	1200	—	—	V	V_{GE} = 0V, I_C = 250µA
$\Delta V_{(BR)CES}/\Delta T_J$	Temperature Coeff. of Breakdown Voltage	—	0.91	—	V/°C	V_{GE} = 0V, I_C = 1.0mA
$V_{CE(on)}$	Collector-to-Emitter Saturation Voltage	—	2.77	3.5	V	I_C = 24A V_{GE} = 15V
		—	3.28	—		I_C = 45A See Fig. 2, 5
		—	2.54	—		I_C = 24A, T_J = 150°C
$V_{GE(th)}$	Gate Threshold Voltage	3.0	—	6.0		V_{CE} = V_{GE}, I_C = 250µA
$\Delta V_{GE(th)}/\Delta T_J$	Temperature Coeff. of Threshold Voltage	—	-10	—	mV/°C	V_{CE} = V_{GE}, I_C = 250µA
g_{fe}	Forward Transconductance ④	13	19	—	S	V_{CE} = 100V, I_C = 24A
I_{CES}	Zero Gate Voltage Collector Current	—	—	250	µA	V_{GE} = 0V, V_{CE} = 1200V
		—	—	6500		V_{GE} = 0V, V_{CE} = 1200V, T_J = 150°C
V_{FM}	Diode Forward Voltage Drop	—	2.5	3.5	V	I_C = 16A See Fig. 13
		—	2.1	3.0		I_C = 16A, T_J = 150°C
I_{GES}	Gate-to-Emitter Leakage Current	—	—	±100	nA	V_{GE} = ±20V

Switching Characteristics @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
Q_g	Total Gate Charge (turn-on)	—	180	270	nC	I_C = 24A
Q_{ge}	Gate - Emitter Charge (turn-on)	—	25	38		V_{CC} = 400V See Fig.8
Q_{gc}	Gate - Collector Charge (turn-on)	—	70	110		V_{GE} = 15V
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	87	—	ns	
t_r	Rise Time	—	100	—		T_J = 25°C
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	140	300		I_C = 24A, V_{CC} = 800V
t_f	Fall Time	—	200	300		V_{GE} = 15V, R_G = 5.0Ω
E_{on}	Turn-On Switching Loss	—	3.83	—	mJ	Energy losses include "tail"
E_{off}	Turn-Off Switching Loss	—	1.90	—		and diode reverse recovery
E_{ts}	Total Switching Loss	—	5.73	7.9		See Fig. 9,10,18
t_{sc}	Short Circuit Withstand Time	10	—	—	µs	V_{CC} = 720V, T_J = 125°C
						V_{GE} = 15V, R_G = 5.0Ω
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	67	—	ns	T_J = 150°C, See Fig. 10,11,18
t_r	Rise Time	—	72	—		I_C = 24A, V_{CC} = 800V
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	310	—		V_{GE} = 15V, R_G = 5.0Ω,
t_f	Fall Time	—	390	—		Energy losses include "tail"
E_{ts}	Total Switching Loss	—	8.36	—	mJ	and diode reverse recovery
L_E	Internal Emitter Inductance	—	13	—	nH	Measured 5mm from package
C_{ies}	Input Capacitance	—	2800	—	pF	V_{GE} = 0V
C_{oes}	Output Capacitance	—	140	—		V_{CC} = 30V See Fig. 7
C_{res}	Reverse Transfer Capacitance	—	53	—		f = 1.0MHz
t_{rr}	Diode Reverse Recovery Time	—	90	135	ns	T_J = 25°C See Fig.
		—	164	245		T_J = 125°C 14 I_F = 16A
I_{rr}	Diode Peak Reverse Recovery Current	—	5.8	10	A	T_J = 25°C See Fig.
		—	8.3	15		T_J = 125°C 15 V_R = 200V
Q_{rr}	Diode Reverse Recovery Charge	—	260	675	nC	T_J = 25°C See Fig.
		—	680	1838		T_J = 125°C 16 di/dt = 200A/µs
$di_{(rec)M}/dt$	Diode Peak Rate of Fall of Recovery	—	120	—	A/µs	T_J = 25°C See Fig.
	During t_b	—	76	—		T_J = 125°C 17

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT **เบอร์** IRG4PH50KD **(ต่อ)**

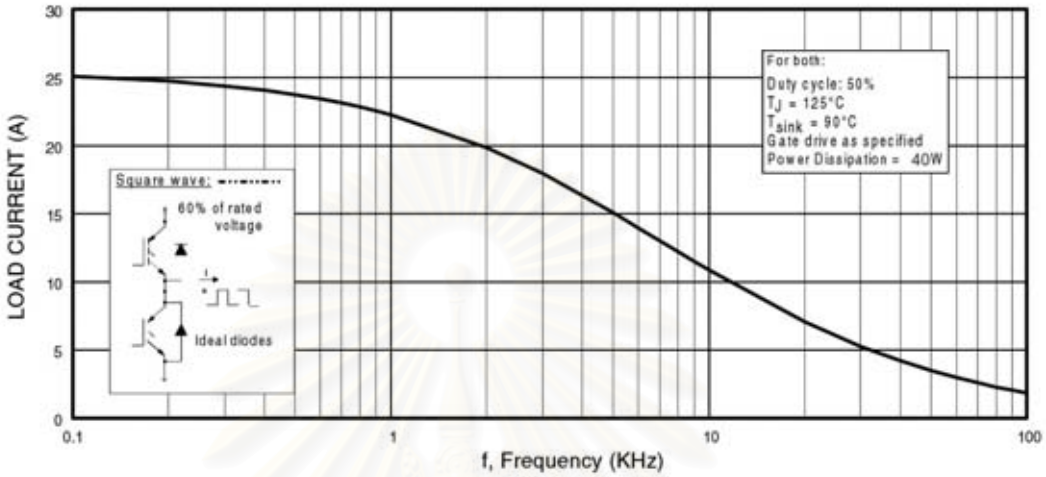


Fig. 1 - Typical Load Current vs. Frequency
(Load Current = I_{RMS} of fundamental)

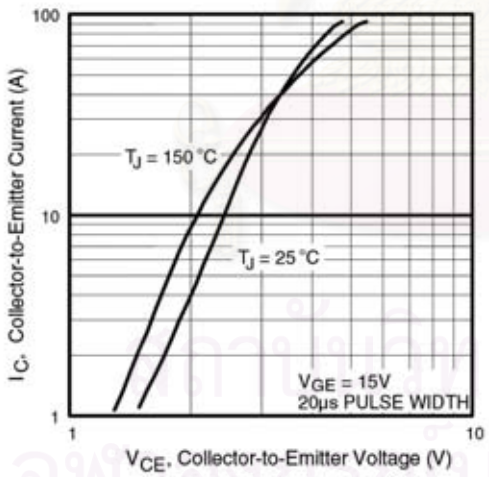


Fig. 2 - Typical Output Characteristics

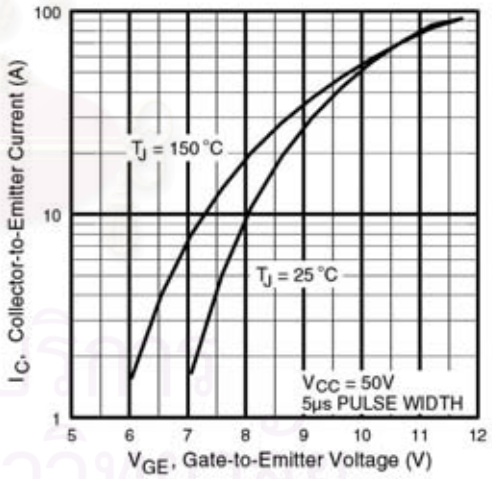


Fig. 3 - Typical Transfer Characteristics

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PH50KD (ต่อ)

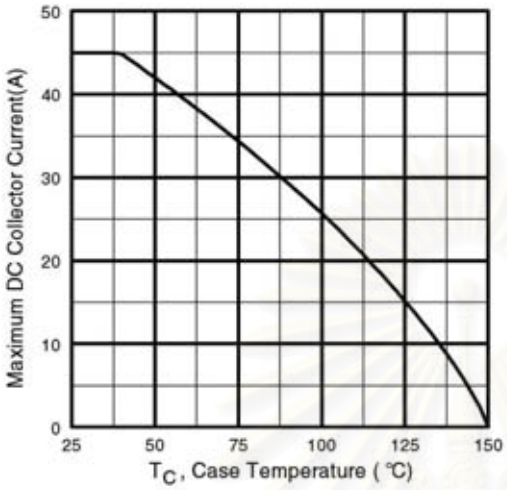


Fig. 4 - Maximum Collector Current vs. Case Temperature

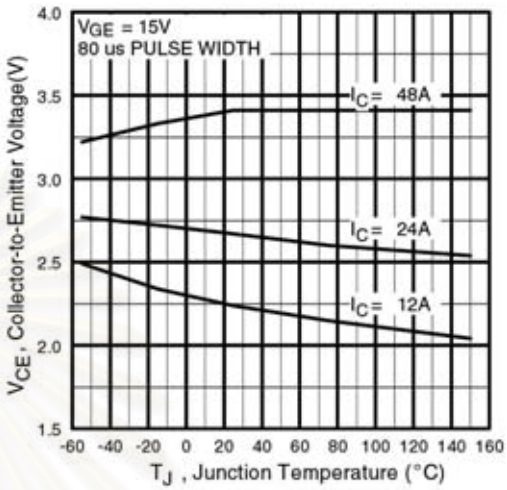


Fig. 5 - Typical Collector-to-Emitter Voltage vs. Junction Temperature

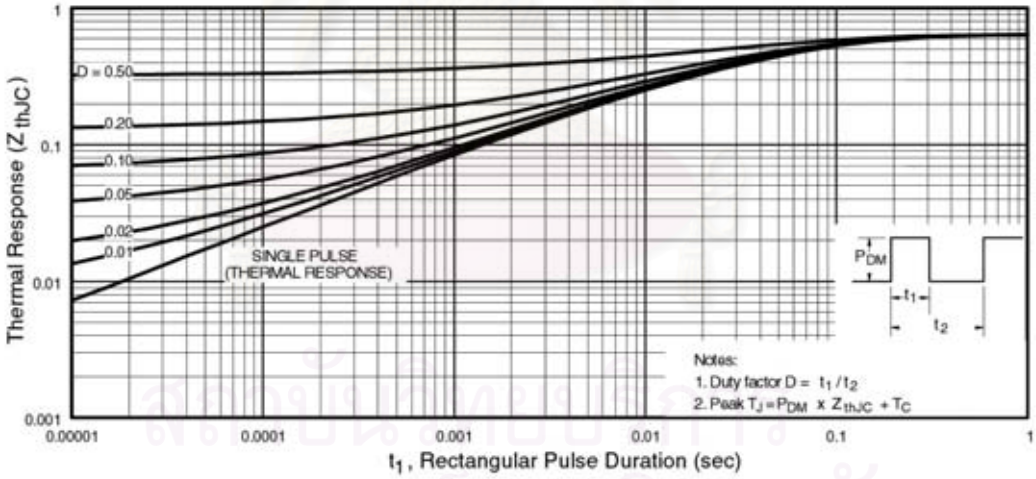


Fig. 6 - Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PH50KD (ต่อ)

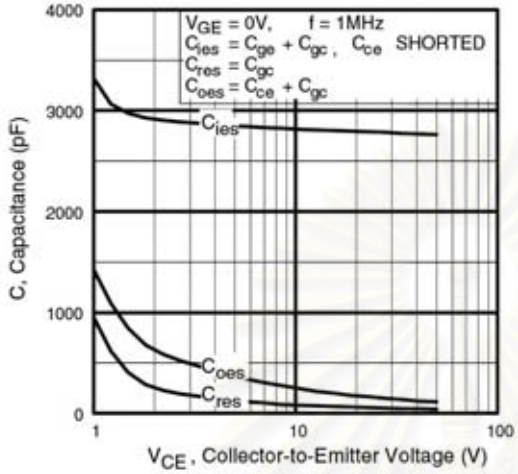


Fig. 7 - Typical Capacitance vs. Collector-to-Emitter Voltage

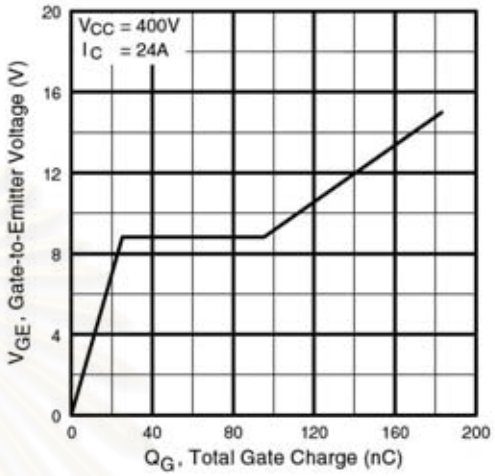


Fig. 8 - Typical Gate Charge vs. Gate-to-Emitter Voltage

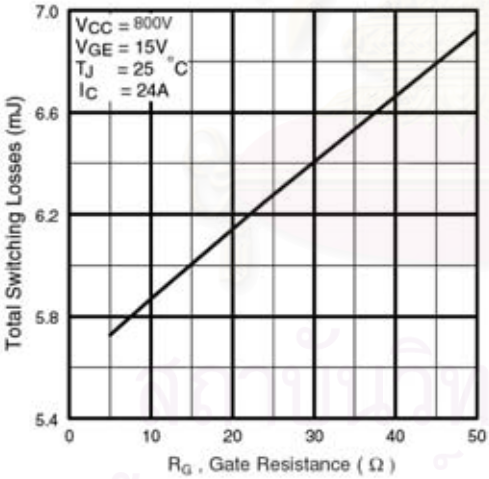


Fig. 9 - Typical Switching Losses vs. Gate Resistance

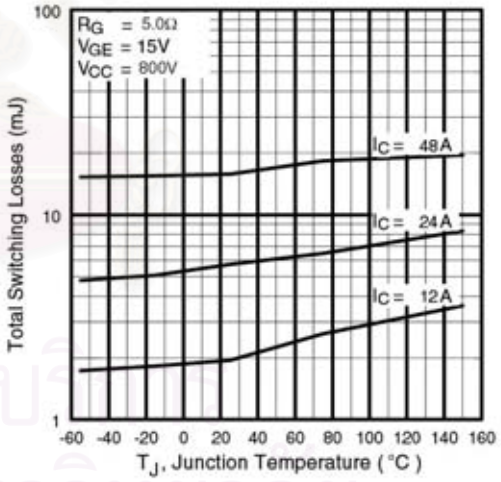


Fig. 10 - Typical Switching Losses vs. Junction Temperature

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PH50KD (ต่อ)

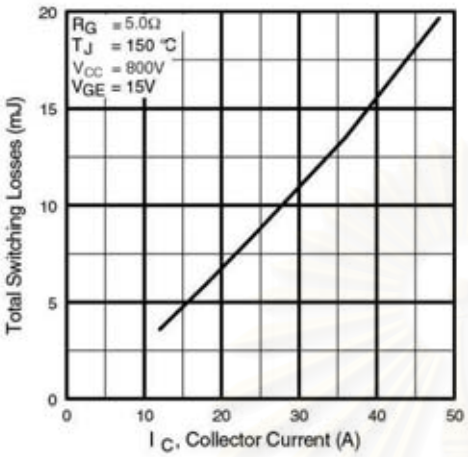


Fig. 11 - Typical Switching Losses vs. Collector Current

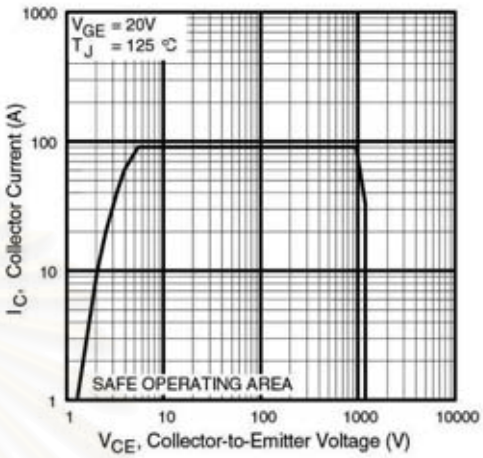


Fig. 12 - Turn-Off SOA

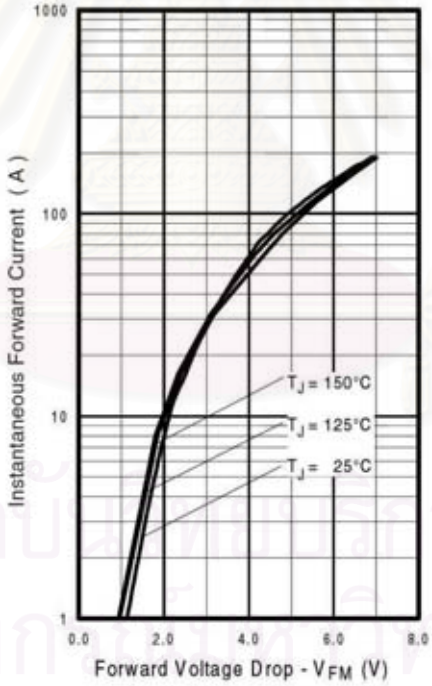


Fig. 13 - Typical Forward Voltage Drop vs. Instantaneous Forward Current

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PH50KD (ต่อ)

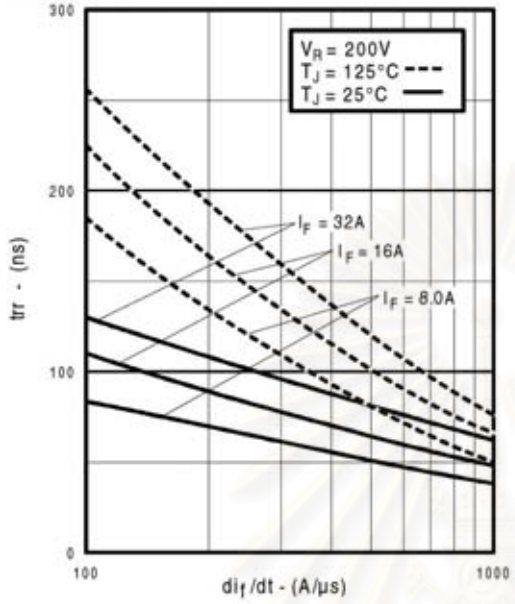


Fig. 14 - Typical Reverse Recovery vs. di_f/dt

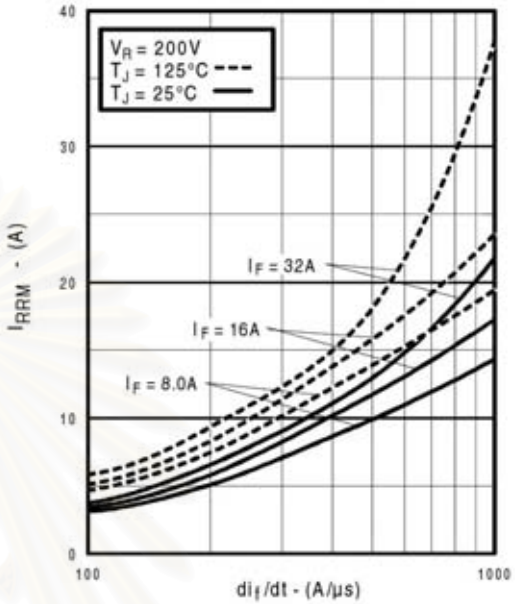


Fig. 15 - Typical Recovery Current vs. di_f/dt

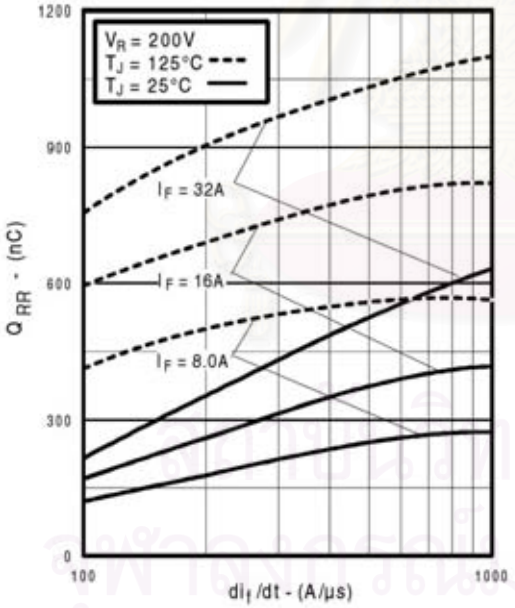


Fig. 16 - Typical Stored Charge vs. di_f/dt

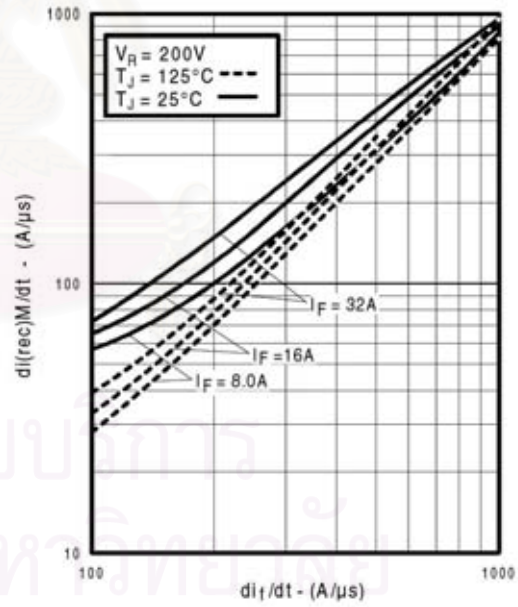


Fig. 17 - Typical $di_{(rec)M}/dt$ vs. di_f/dt

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PH50KD (ต่อ)

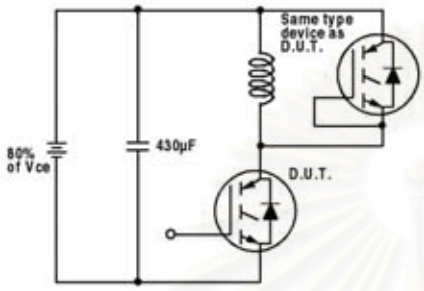


Fig. 18a - Test Circuit for Measurement of I_{LM}, E_{on}, $E_{off(diode)}$, t_{rr}, Q_{rr}, I_{rr}, $t_{d(on)}$, t_r, $t_{d(off)}$, t_f

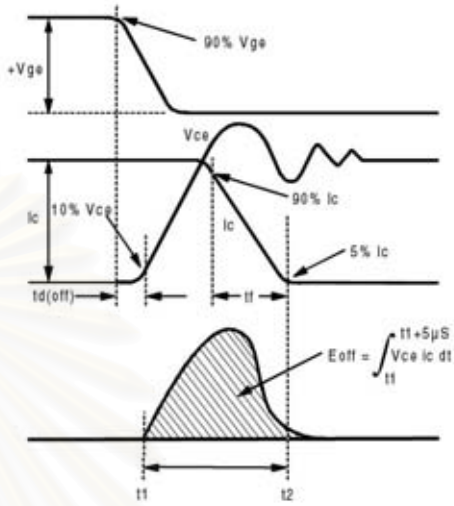


Fig. 18b - Test Waveforms for Circuit of Fig. 18a, Defining E_{off}, $t_{d(off)}$, t_f

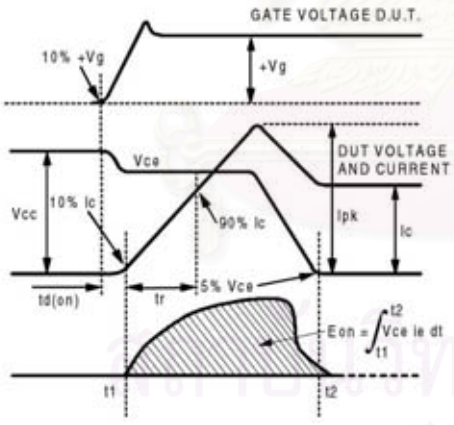


Fig. 18c - Test Waveforms for Circuit of Fig. 18a, Defining E_{on}, $t_{d(on)}$, t_r

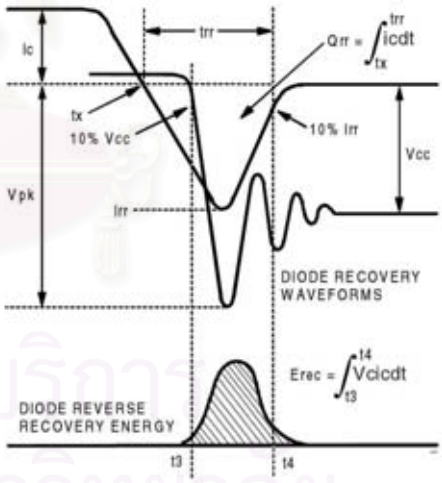


Fig. 18d - Test Waveforms for Circuit of Fig. 18a, Defining E_{rec}, t_{rr}, Q_{rr}, I_{rr}

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT **เบอร์** IRG4PH50KD **(ต่อ)**

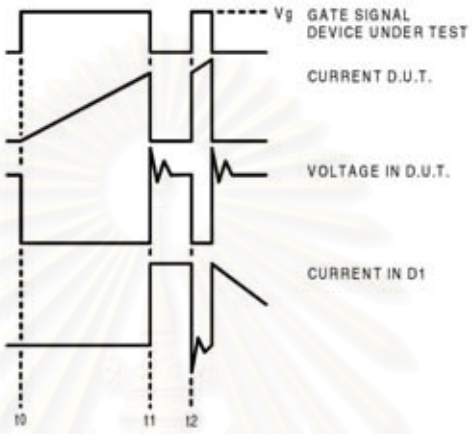


Figure 18e. Macro Waveforms for Figure 18a's Test Circuit

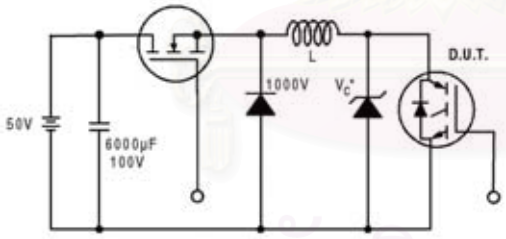


Figure 19. Clamped Inductive Load Test Circuit

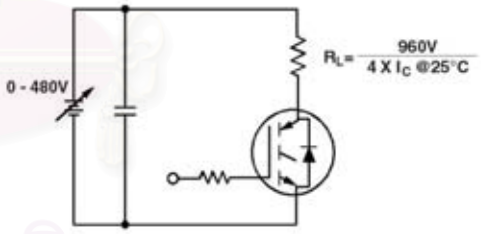


Figure 20. Pulsed Collector Current Test Circuit

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT **เบอร์** IRG4PH50KD **(ต่อ)**

IRG4PH50KD

International
IOR Rectifier

Notes:

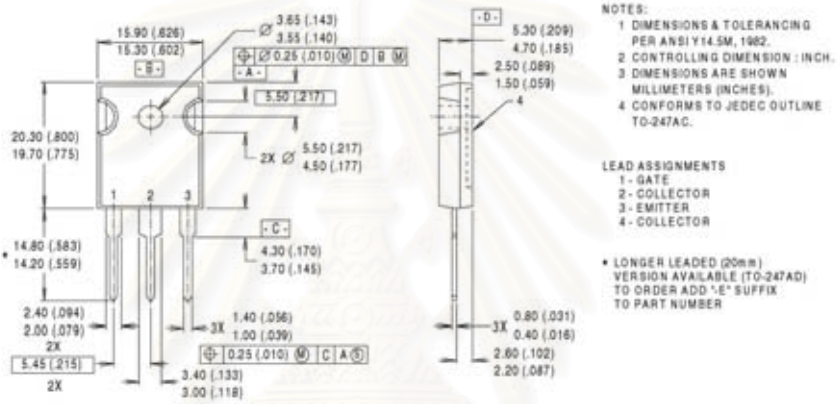
① Repetitive rating: V_{GE}=20V; pulse width limited by maximum junction temperature (figure 20)

② V_{CC}=80%(V_{CES}), V_{GE}=20V, L=10μH, R_G= 5.0Ω (figure 19)

③ Pulse width ≤ 80μs; duty factor ≤ 0.1%.

④ Pulse width 5.0μs, single shot.

Case Outline — TO-247AC



CONFORMS TO JEDEC OUTLINE TO-247AC (TO-3P)
Dimensions in Millimeters and (Inches)

International
IOR Rectifier

IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, USA Tel: (310) 252-7105
IR EUROPEAN REGIONAL CENTRE: 439/445 Godstone Rd, Whyteleafe, Surrey CR3 OBL, UK Tel: ++ 44 (0)20 8645 8000
IR CANADA: 15 Lincoln Court, Brampton, Ontario L6T3Z2, Tel: (905) 453 2200
IR GERMANY: Saalburgstrasse 157, 61350 Bad Homburg Tel: ++ 49 (0) 6172 96590
IR ITALY: Via Liguria 49, 10071 Borgaro, Torino Tel: ++ 39 011 451 0111
IR JAPAN: K&H Bldg., 2F, 30-4 Nishi-Ikebukuro 3-Chome, Toshima-Ku, Tokyo 171 Tel: 81 (0)3 3983 0086
IR SOUTHEAST ASIA: 1 Kim Seng Promenade, Great World City West Tower, 13-11, Singapore 237994 Tel: ++ 65 (0)838 4630
IR TAIWAN: 16 Fl. Suite D. 207, Sec. 2, Tun Haw South Road, Taipei, 10673 Tel: 886-(0)2 2377 9936

Data and specifications subject to change without notice. 7/00

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงคุณสมบัติ SCR เบอร์ IRF16TTS12

Bulletin I2115 rev. D 12/98

International
IOR Rectifier

SAFEIR Series
16TTS..

PHASE CONTROL SCR

V_T < 1.4V @ 10A
I_{TSM} = 200A
V_{RRM} = 800 to 1600V

Description/Features

The 16TTS.. *SAFE**IR*** series of silicon controlled rectifiers are specifically designed for medium power switching and phase control applications. The glass passivation technology used has reliable operation up to 125° C junction temperature.

Typical applications are in input rectification (soft start) and these products are designed to be used with International Rectifier input diodes, switches and output rectifiers which are available in identical package outlines.

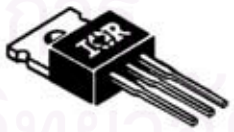
Output Current in Typical Applications

Applications	Single-phase Bridge	Three-phase Bridge	Units
Capacitive input filter T_A = 55°C, T_J = 125°C, common heatsink of 1°C/W	13.5	17	A

Major Ratings and Characteristics

Characteristics		16TTS..	Units
$I_{T(AV)}$	Sinusoidal waveform	10	A
I_{RMS}		16	A
V_{RRM}/V_{DRM}		up to 1600	V
I_{TSM}		200	A
V_T	@ 10A, T_J = 25°C	1.4	V
dv/dt		500	V/µs
di/dt		150	A/µs
T_J	range	-40 to 125	°C

Package Outline



TO-220AC

Also available in SMD-220 package (series 16TTS..S)

ตารางแสดงคุณสมบัติ SCR เบอร์ IRF16TTS12 (ต่อ)

Voltage Ratings

Part Number	V_{RRM}, maximum peak reverse voltage V	V_{DRM}, maximum peak direct voltage V	I_{RRM}/I_{DRM} 125°C mA
16TTS08	800	800	10
16TTS12	1200	1200	
16TTS16	1600	1600	

Absolute Maximum Ratings

	Parameters	16TTS..		Units	Conditions	
$I_{T(AV)}$	Max. Average On-state Current	10		A	@T_C = 98°C, 180° conduction half sine wave	
I_{RMS}	Max. RMS On-state Current	16				
I_{TSM}	Max. Peak One Cycle Non-Repetitive	170			10ms Sine pulse, rated V_{RRM} applied	
	Surge Current	200			10ms Sine pulse, no voltage reapplied	
I^2t	Max. I^2t for fusing	144		A^2s	10ms Sine pulse, rated V_{RRM} applied	
		200			10ms Sine pulse, no voltage reapplied	
$I^2\sqrt{t}$	Max. $I^2\sqrt{t}$ for fusing	2000		$A^2\sqrt{s}$	t = 0.1 to 10ms, no voltage reapplied	
V_{TM}	Max. On-state Voltage Drop	1.4		V	@10A, T_J = 25°C	
r_t	On-state slope resistance	24.0		mΩ	T_J = 125°C	
$V_{T(TO)}$	Threshold Voltage	1.1		V		
I_{RM}/I_{DM}	Max. Reverse and Direct	0.5		mA	T_J = 25 °C	V_R = rated V_{RRM}/ V_{DRM}
	Leakage Current	10			T_J = 125 °C	
I_H	Holding Current	Typ.	Max.		Anode Supply = 6V, Resistive load, Initial I_T = 1A	
		–	100	mA	16TTS08, 16TTS12	
		100	150		16TTS16	
I_L	Max. Latching Current	200		mA	Anode Supply = 6V, Resistive load	
dv/dt	Max. Rate of Rise of off-state Voltage	500		V/µs		
di/dt	Max. Rate of Rise of turned-on Current	150		A/µs		

ตารางแสดงคุณสมบัติ SCR เบอร์ IRF16TTS12 (ต่อ)

Triggering

	Parameters	16TTS..	Units	Conditions
P_{GM}	Max. peak Gate Power	8.0	W	
$P_{G(AV)}$	Max. average Gate Power	2.0		
+ I_{GM}	Max. paek positive Gate Current	1.5	A	
- V_{GM}	Max. paek negative Gate Voltage	10	V	
I_{GT}	Max. required DC Gate Current to trigger	90	mA	Anode supply = 6V, resistive load, T_J = - 65°C
		60		Anode supply = 6V, resistive load, T_J = 25°C
		35		Anode supply = 6V, resistive load, T_J = 125°C
V_{GT}	Max. required DC Gate Voltage to trigger	3.0	V	Anode supply = 6V, resistive load, T_J = - 65°C
		2.0		Anode supply = 6V, resistive load, T_J = 25°C
		1.0		Anode supply = 6V, resistive load, T_J = 125°C
V_{GD}	Max. DC Gate Voltage not to trigger	0.2		T_J = 125°C, V_{DRM} = rated value
I_{GD}	Max. DC Gate Current not to trigger	2.0	mA	T_J = 125°C, V_{DRM} = rated value

Switching

	Parameters	16TTS..	Units	Conditions
t_{gt}	Typical turn-on time	0.9	µs	T_J = 25°C
t_{rr}	Typical reverse recovery time	4		T_J = 125°C
t_q	Typical turn-off time	110		

Thermal-Mechanical Specifications

	Parameters		16TTS..	Units	Conditions
T_J	Max. Junction Temperature Range		-40 to 125	°C	
T_{stg}	Max. Storage Temperature Range		-40 to 125		
R_{thJC}	Max. Thermal Resistance Junction to Case		1.3	°C/W	DC operation
R_{thJA}	Max. Thermal Resistance Junction to Ambient		62		
R_{thCS}	Typ. Thermal Resistance Case to Heatsink		0.5		Mounting surface, smooth and greased
wt	Approximate Weight		2(0.07)	g(oz.)	
T	Mounting Torque	Min.	6(5)	Kg-cm (lbf-in)	
		Max.	12(10)		
	Case Style		TO-220AC		

ตารางแสดงคุณสมบัติ SCR เบอร์ IRF16TTS12 (ต่อ)

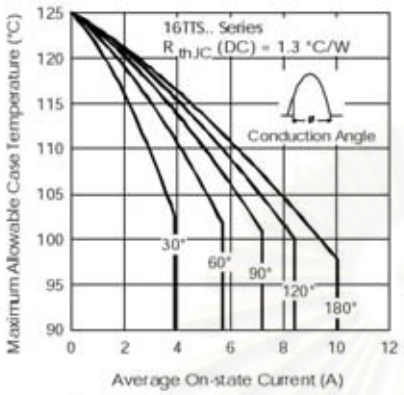


Fig. 1 - Current Rating Characteristics

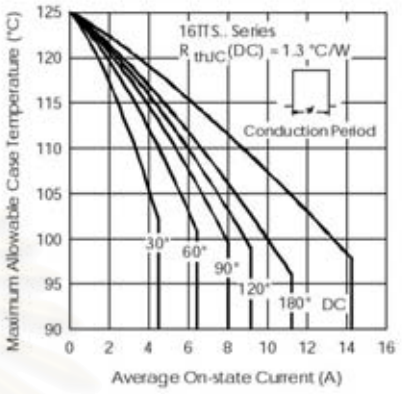


Fig. 2 - Current Rating Characteristics

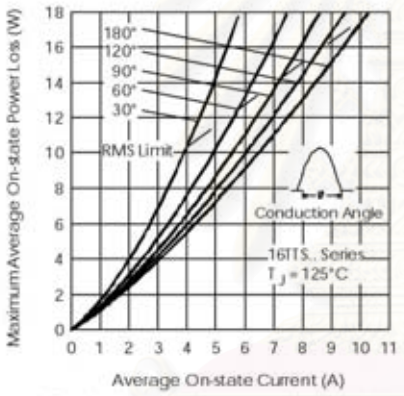


Fig. 3 - On-state Power Loss Characteristics

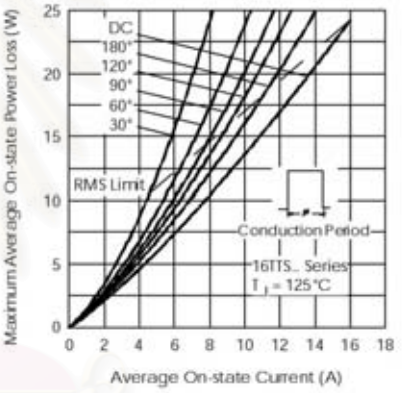


Fig. 4 - On-state Power Loss Characteristics

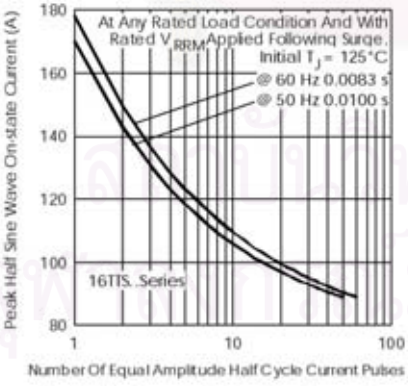


Fig. 6 - Maximum Non-Repetitive Surge Current

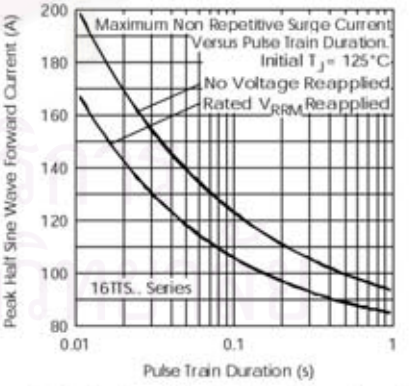


Fig. 7 - Maximum Non-Repetitive Surge Current

ตารางแสดงคุณสมบัติ SCR เบอร์ IRF16TTS12 (ต่อ)

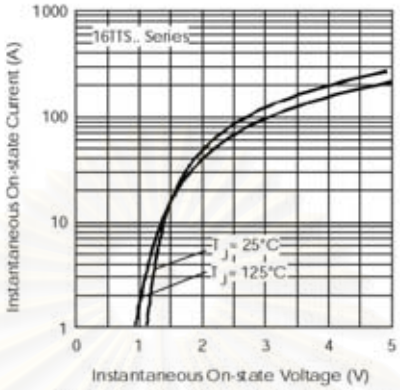


Fig. 7 - On-state Voltage Drop Characteristics

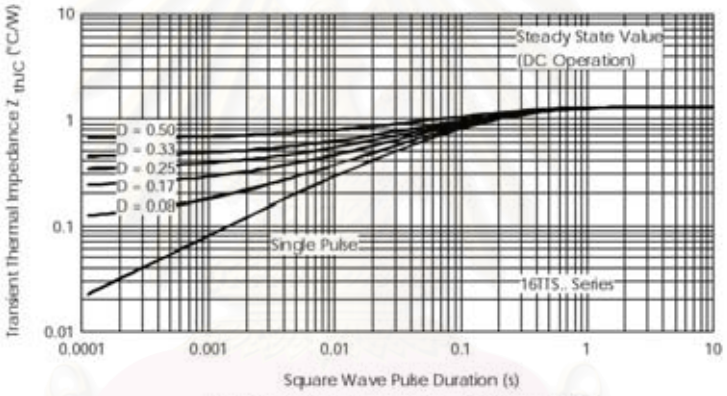


Fig. 8 - Thermal Impedance Z_{thJC} Characteristics

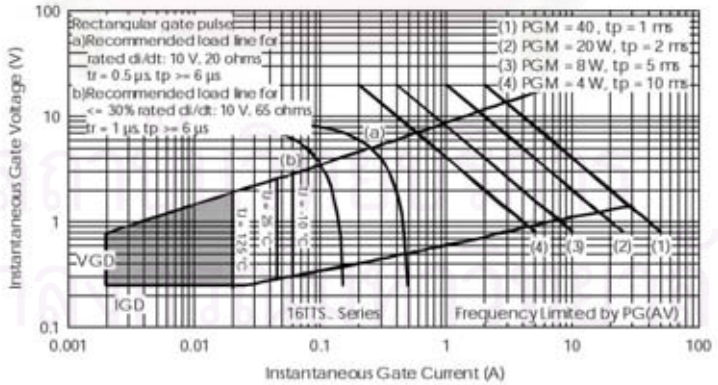
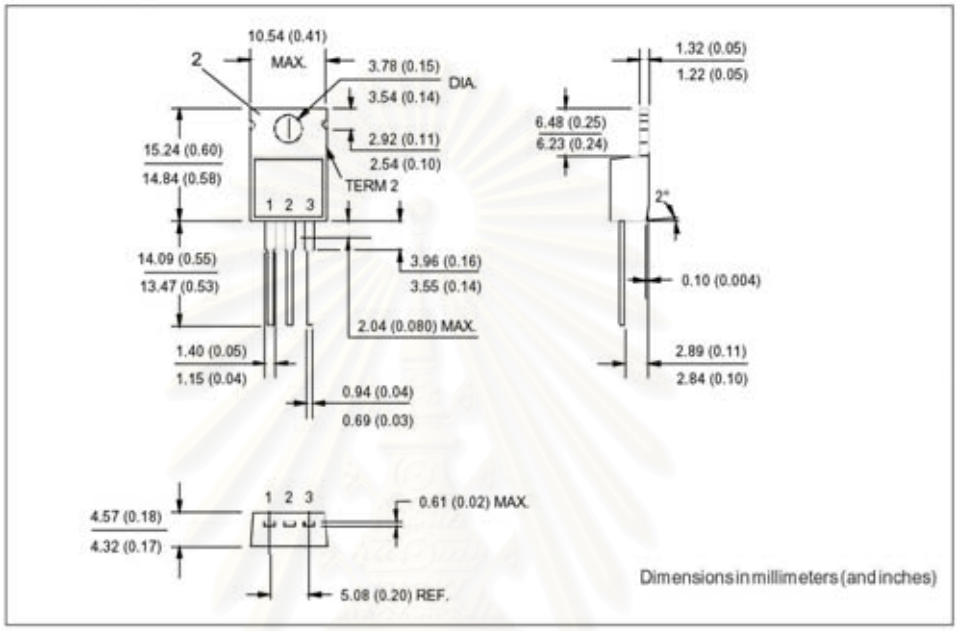


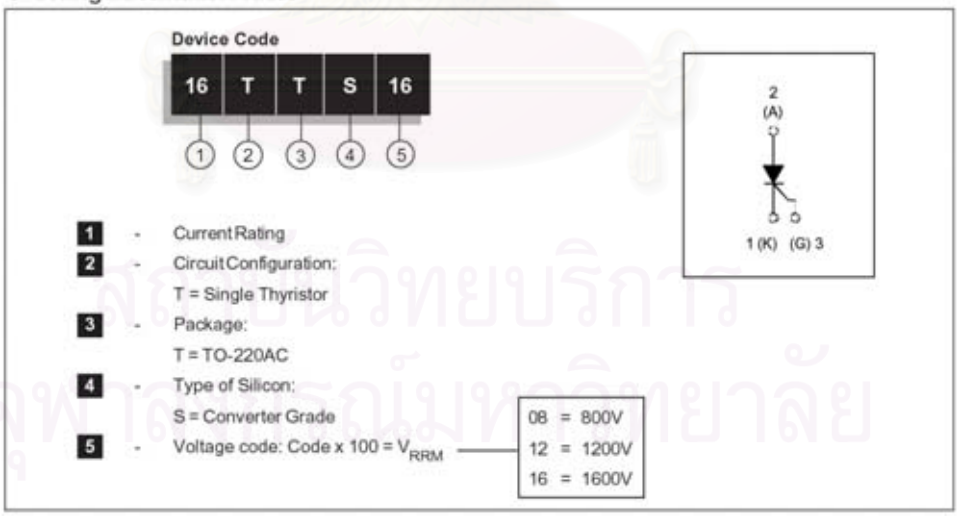
Fig. 9 - Gate Characteristics

ตารางแสดงคุณสมบัติ SCR เบอร์ IRF16TTS12 (ต่อ)

Outline Table



Ordering Information Table



ภาคผนวก ค

ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250

SEMICONDUCTOR
TOSHIBA
TECHNICAL DATA

TOSHIBA PHOTOCOUPLER
TLP250
GaAℓAs IRED & PHOTO-IC

(TLP250)

TRANSISTOR INVERTER
INVERTER FOR AIR CONDITIONOR
IGBT GATE DRIVE
POWER MOS FET GATE DRIVE

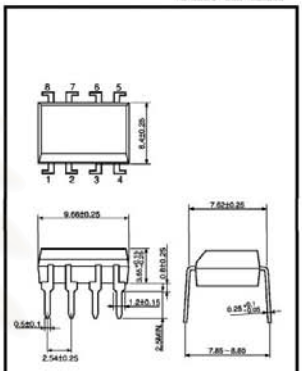
The Toshiba TLP250 consists of a GaAℓAs light emitting diode and a integrated photodetector.
This unit is 8-lead DIP package.
TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input Threshold Current : I_F=5mA (Max.)
- Supply Current (I_{CC}) : 11mA (Max.)
- Supply Voltage (V_{CC}) : 10-35V
- Output Current (I_O) : ±0.5A (Min.)
- Switching Time (t_{pLH}/t_{pHL}) : 0.5μs (Max.)
- Isolation Voltage : 2500V_{rms} (Min.)
- UL Recognized : UL1577, File No.E67349
- Option (D4) type
  VDE Approved : DIN VDE0884/06.92, Certificate No.76823
  Maximum Operating Insulation Voltage : 630V_{PK}
  Highest Permissible Over Voltage : 4000V_{PK}

(Note) When a VDE0884 approved type is needed, please designate the "Option (D4)"

- Creepage Distance : 6.4mm (Min.)
  Clearance : 6.4mm (Min.)

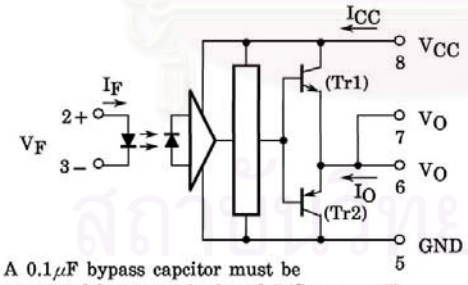
Unit in mm



JEDEC	—
EIAJ	—
TOSHIBA	11-10C4

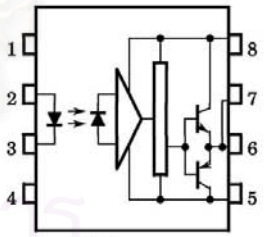
Weight : 0.54g

SCHMATIC



A 0.1μF bypass capcitor must be connected between pin 8 and 5 (See more 5).

PIN CONFIGURATION (TOP VIEW)



1 : N.C.
2 : ANODE
3 : CATHODE
4 : N.C.
5 : GND
6 : V_O (OUTPUT)
7 : V_O
8 : V_{CC}

TRUTH TABLE

		Tr1	Tr2
Input LED	ON	ON	OFF
	OFF	OFF	ON

© The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA CORPORATION for any infringements of intellectual property or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any intellectual property or other rights of TOSHIBA CORPORATION or others.
© These TOSHIBA products are intended for use in general commercial applications (office equipment, communication equipment, measuring equipment, domestic appliances, etc.). please make sure that you consult with us before you use these TOSHIBA products in equipment which requires extraordinarily high quality and/or reliability, and in equipment which may involve life threatening or critical application, including but not limited to such uses as atomic energy control, airplane or spaceship instrumentation, traffic signals, medical instrumentation, combustion control, all types of safety devices, etc. TOSHIBA cannot accept and hereby disclaims liability for any damage which may occur in case the TOSHIBA products are used in such equipment or applications without prior consultation with TOSHIBA.

ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

SEMICONDUCTOR
TOSHIBA TECHNICAL DATA

TLP250

(TLP250)

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Ta = 25°C)

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

Note 1 : Pulse width P_W ≦ 1μs, 300pps

Note 2 : Exporenential Wavefom

Note 3 : Exporenential Wavefom, I_{OPH} ≦ −1.0A (≦ 2.5μs), I_{OPL} ≦ +1.0A (≦ 2.5μs)

Note 4 : Device considerd a two terminal device : pins 1,2,3 and 4 shorted together, and pins 5, 6, 7 and 8 shorted together.

Note 5 : A ceramic capacitor (0.1μF) should be connected from pin 8 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain linear amplifier. Failure to provide the bypassing may impair the switching proparty. The total lead length between capacitor and coupler should not exceed 1cm.

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

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

ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

SEMICONDUCTOR
TOSHIBA TECHNICAL DATA

TLP250

(TLP250)
ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Ta = −20~70°C, Unless otherwise specified)

CHARACTERISTIC		SYMBOL	TEST CIR-CUIT	TEST CONDITION	MIN.	TYP.*	MAX.	UNIT
Input Forward Voltage		V_F	—	I_F=10mA, Ta=25°C		1.6	1.8	V
Temperature Coefficient of Forward Voltage		$\Delta V_F / \Delta Ta$	—	I_F=10mA	—	−2.0	—	mV/°C
Input Reverse Current		I_R	—	V_R=5V, Ta=25°C		—	10	μA
Input Capacitance		C_T	—	V=0, f=1MHz, Ta=25°C	—	45	250	pF
Output Current	"H" Level	I_{OPH}	3	V_{CC}=30V (*1); I_F=10mA, V_{8-6}=4V	−0.5	−1.5	—	A
	"L" Level	I_{OPL}	2	V_{CC}=30V (*1); I_F=0, V_{6-5}=2.5V	0.5	2	—	
Output Voltage	"H" Level	V_{OH}	4	V_{CC1}=+15V, V_{EE1}=−15V, R_L=200Ω, I_F=5mA	11	12.8	—	V
	"L" Level	V_{OL}	5	V_{CC1}=+15V, V_{EE1}=−15V, R_L=200Ω, V_F=0.8V	—	−14.2	−12.5	
Supply Current	"H" Level	I_{CCH}	—	V_{CC}=30V, I_F=10mA, Ta=25°C	—	7	—	mA
				V_{CC}=30V, I_F=10mA	—	—	11	
	"L" Level	I_{CCL}	—	V_{CC}=30V, I_F=0mA, Ta=25°C	—	7.5	—	
				V_{CC}=30V, I_F=0mA	—	—	11	
Threshold Input Current	"Output L→H"	I_{FLH}	—	V_{CC1}=+15V, V_{EE1}=−15V, R_L=200Ω, V_O>0V	—	1.2	5	mA
Threshold Input Voltage	"Output H→L"	V_{FHL}		V_{CC1}=+15V, V_{EE1}=−15V, R_L=200Ω, V_O<0V	0.8	—	—	V
Supply Voltage		V_{CC}	—		10	—	35	V
Capacitance (Input-Output)		C_S	—	V_S=0, f=1MHz, Ta=25°C	—	1.0	2.0	pF
Resistance (Input-Output)		R_S	—	V_S=500V, Ta=25°C, R.H.≤60%	5×10^{10}	10^{14}	—	Ω

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

SEMICONDUCTOR
TOSHIBA TECHNICAL DATA

TLP250

(TLP250)

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

CHARACTERISTIC		SYMBOL	TEST CIR-CUIT	TEST CONDITION	MIN.	TYP.*	MAX.	UNIT
Propagation Delay Time	L→H	t_{pLH}	6	I_F = 8mA	—	0.15	0.5	μs
	H→L	t_{pHL}		V_{CC1} = +15V, V_{EE1} = −15V	—	0.15	0.5	
Output Rise Time		t_r		R_L = 200Ω	—		—	
Output Fall Time		t_f			—		—	
Common Mode Transient Immunity at High Level Output		C_{MH}	7	V_{CM} = 600V, I_F = 8mA V_{CC} = 30V, Ta = 25°C	−5000	−	−	V / μs
Common Mode Transient Immunity at Low Level Output		C_{ML}	7	V_{CM} = 600V, I_F = 0mA V_{CC} = 30V, Ta = 25°C	5000	−	−	V / μs

* All typical values are at Ta = 25°C

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

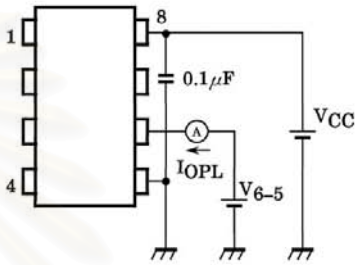
SEMICONDUCTOR
TOSHIBA
TECHNICAL DATA

TLP250

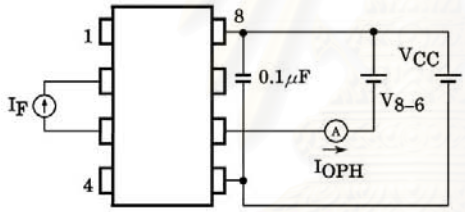
(TLP250)

TEST CIRCUIT 1 :

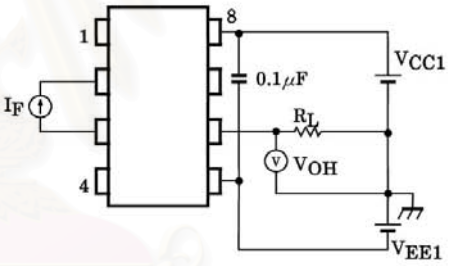
TEST CIRCUIT 2 : IOPL



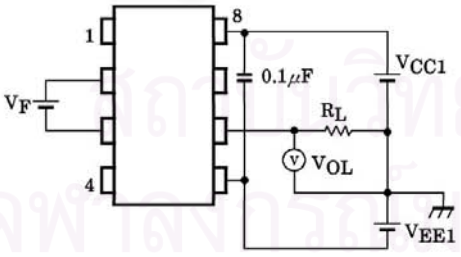
TEST CIRCUIT 3 : IOPH



TEST CIRCUIT 4 : VOH



TEST CIRCUIT 5 : V_{OL}

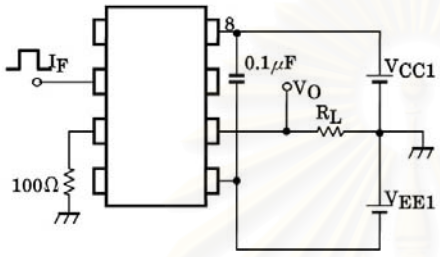


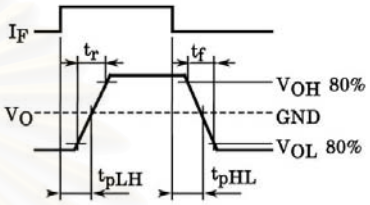
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

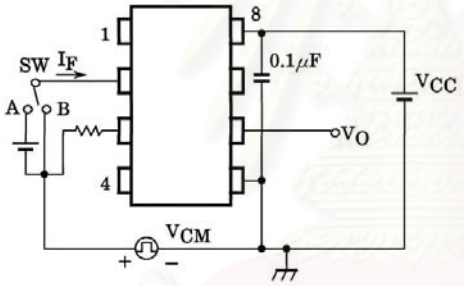
(TLP250)

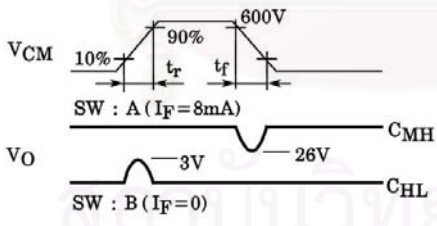
TEST CIRCUIT 6 : t_{pLH}, t_{pHL}, t_r, t_f





TEST CIRCUIT 7 : C_{MH}, C_{ML}





$$C_{ML} = \frac{480\,(V)}{t_r\,(\mu s)}$$

$$C_{MH} = \frac{480(V)}{t_f\,(\mu s)}$$

C_{ML} (C_{MH}) is the maximum rate of rise (fall) of the common mode voltage that can be sustained with the output voltage in the low (high) state.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

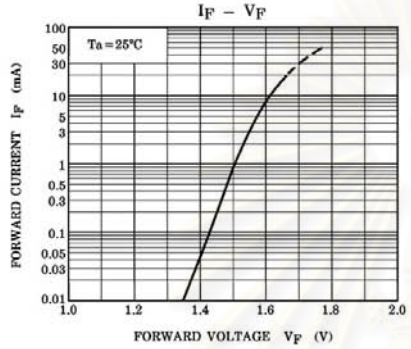
ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

SEMICONDUCTOR
TOSHIBA
TECHNICAL DATA

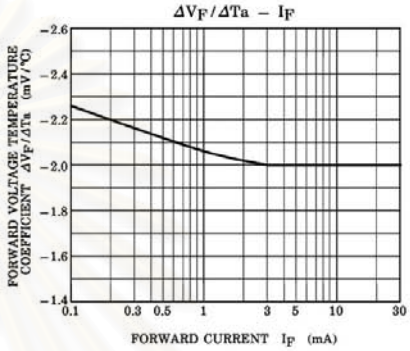
TLP250

(TLP250)

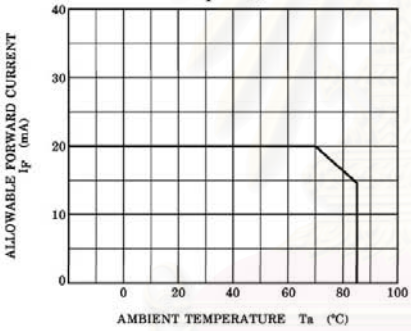
$I_F - V_F$



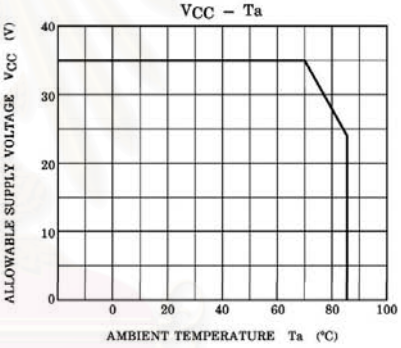
$\Delta V_F / \Delta Ta - I_F$



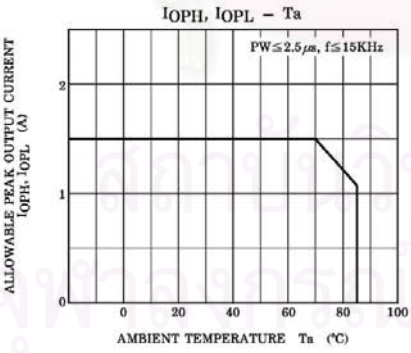
$I_F - Ta$



$V_{CC} - Ta$



$I_{OPH}, I_{OPL} - Ta$



TLP250 – 7*
1996 – 4 – 8
TOSHIBA CORPORATION

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชนันนัทธ์ หมู่สุวรรณ เกิดเมื่อวันที่ 26 พฤศจิกายน พ.ศ. 2520 ที่เขตพญาไท จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2540 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีกาศึกษา 2541

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย