

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การศึกษาและปรับปรุงเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 200 kV 5 kJ**

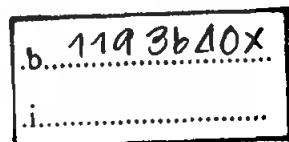
**Study and improvement of a impulse generator 200-kV 5-kJ**



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....

81802

24 ส.ย. 2551



**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**

**สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**ปีการศึกษา 2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2550

การศึกษาและปรับปรุงเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 200 kV 5 kJ

Study and improvement of a impulse generator 200-kV 5-kJ



อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.นเรศธร

พัฒนเดช

อ.พีรวัฒน์

ยุทธโกวิท

รศ.ศิริวัฒน์

โพธิเวชกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

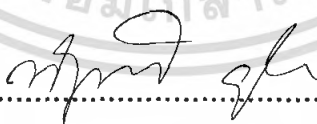
เรื่อง การศึกษาและปรับปรุงเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 200 kV 5 kJ

ผู้จัดทำ

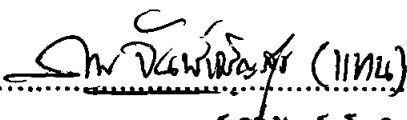
1. นาย สุรชัย แสงสุริยันต์
2. นาย อภิชาติ ศรีพานิชกิจ
3. นาย อาณัติ เล็กเกาะทวด
4. นาย รัฐพงศ์ ธรรมเจริญ



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนาเดช )



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( อาจารย์ พิศุทธิ์ ยุทธโกวิท )



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาและปรับปรุงเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 200 kV 5 kJ

|              |              |                  |
|--------------|--------------|------------------|
| นาย สุรัชย์  | แสงสุริยันต์ |                  |
| นาย อภิชาติ  | ศรีพานิชกิจ  |                  |
| นาย อาณัติ   | เล็กเกาะทวด  |                  |
| นาย รัฐพงศ์  | ธรรมเจริญ    |                  |
| อ.นรเศรษฐ์   | พัฒนเดช      | อาจารย์ที่ปรึกษา |
| อ.พีรวุฒิ    | ยุทธโกวิท    | อาจารย์ที่ปรึกษา |
| รศ.ศิริวัฒน์ | โพธิเวชกุล   | อาจารย์ที่ปรึกษา |

ปีการศึกษา 2550

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ วิธีการออกแบบและสร้างชุดควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 200 kV 5 kJ ซึ่งประกอบด้วย ชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ชุดควบคุมพร้อมแสดงผลแรงดันอัดประจุ และชุดควบคุมพร้อมแสดงผลการปรับแก้ ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 200 kV 5 kJ

ซึ่งจากผลการทดสอบชุดควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ทำการประกอบสร้างนั้น สามารถนำไปใช้ในการศึกษาและวิจัยทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ทางห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้เป็นอย่างดี

## Study and improvement of a impulse generator 200-kV 5-kJ

Surachai Sangsuriyan

Apichat Sripanichkij

Arnut Lekgorthoud

Rattapong Tumjareun

Norasage Pattanadech

Supervisor

Peerawut Yutthagowith

Supervisor

Assoc.Prof. Siriwat Potivejkul

Supervisor

2007

### ABSTRACT

This project presents design and construction of a controlled unit of an impulse generator of 200 kV 5 kJ, is compose by a trigatron, a controlled and displaying unit of charging voltage and a controlled and displaying unit of gap variable

From experimental test, controlled unit of an impulse generator of 200 kV 5 kJ has good performance useful for high voltage laboratory, electrical engineering department, King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการรู้สึกซาบซึ้งและขอบคุณต่อความกรุณาที่ อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนาเดช อาจารย์ พิรุณ ยุทธโกวิทและ รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ช่วยให้คำแนะนำตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาที่ประสิทธิประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำโครงการในครั้งนี้และเพื่อนๆพี่ๆที่คอยช่วยเหลือตลอด จนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ถ้าปราศจากท่านเหล่านี้โครงการนี้ก็คงไม่สำเร็จลุล่วงไปได้

นอกจากนี้ผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ นายโกสินทร์ คล่องเชิงสาน และนายปริญญา ชมลิ้ม นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการจัดหาอุปกรณ์ และช่วยให้คำปรึกษาเพิ่มเติมในเรื่องที่ไม่เข้าใจ และผู้จัดทำต้องขอบคุณเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการ(lab) ที่คอยเอาใจใส่คอยถามไถ่ตลอดเวลา

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ลำบากคอยส่งเสียเงินทองให้ผู้จัดทำได้ศึกษาเล่าเรียนจนจบการศึกษาในครั้งนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

|                                                              | หน้า |
|--------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                         | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                      | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                         | III  |
| สารบัญ.....                                                  | IV   |
| สารบัญรูป.....                                               | VII  |
| สารบัญตาราง.....                                             | IX   |
| บทที่ 1 บทนำ.....                                            | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและสำคัญของปัญหา.....                          | 1    |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....              | 1    |
| 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในงานวิจัย.....                         | 2    |
| 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....                          | 2    |
| 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....                        | 4    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....                              | 5    |
| 2.1 วงจรพื้นฐานของการสร้างแรงดันอิมพัลส์.....                | 7    |
| 2.2 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น.....             | 10   |
| 2.3 องค์ประกอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....               | 12   |
| 2.2.1 ตัวเก็บประจุอิมพัลส์.....                              | 12   |
| 2.2.2 ตัวเก็บประจุโหลด.....                                  | 12   |
| 2.3.3 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ $R_L$ .....              | 12   |
| 2.3.4 ความต้านทานปรับรูปคลื่น.....                           | 13   |
| 2.3.5 สปาร์กแกปและไกสวิตช์.....                              | 14   |
| 2.4 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์.....                          | 15   |
| 2.4.1 การแปรของแรงดันในเทอมของเวลา.....                      | 15   |
| 2.4.2 การคำนวณค่าองค์ประกอบวงจร.....                         | 18   |
| 2.4.3 ประสิทธิภาพของวงจร $\eta$ .....                        | 19   |
| 2.4.4 การคำนวณหาค่าช่วงเวลาหน้าคลื่นและช่วงเวลาหางคลื่น..... | 20   |
| 2.5 การวัดแรงดันอิมพัลส์.....                                | 21   |
| 2.5.1 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลม.....                 | 21   |
| 2.5.2 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์.....           | 23   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง.....                                                                             | 25 |
| 3.1 การออกแบบวงจรชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....                              | 25 |
| 3.1.1 การออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันสูง.....                                                                          | 25 |
| 3.1.2 การออกแบบวงจรชุดสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์.....                                                                  | 29 |
| 3.1.3 การออกแบบวงจรทวิแรงดัน .....                                                                               | 31 |
| 3.2 การออกแบบวงจรชุดควบคุมแรงดันอัดประจุ.....                                                                    | 32 |
| 3.2.1 การออกแบบโครงสร้างภายนอก.....                                                                              | 33 |
| 3.2.2 วงจรชุดควบคุมแรงดันอัดประจุ.....                                                                           | 37 |
| 3.2.3 รายชื่อหน้าที่ของอุปกรณ์วงจรควบคุมแต่ละแถว.....                                                            | 38 |
| 3.2.4 ขั้นตอนการทำงานของชุดควบคุมแรงดันอัดประจุ.....                                                             | 40 |
| 3.2.5 การออกแบบวงจรควบคุมมอเตอร์ปรับแกป.....                                                                     | 41 |
| 3.3 การประกอบสร้าง.....                                                                                          | 42 |
| 3.3.1 การประกอบสร้างตู้ควบคุมแรงดันอัดประจุ.....                                                                 | 42 |
| 3.3.2 การประกอบสร้างชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....                           | 49 |
| บทที่ 4 การทดสอบและวิเคราะห์ผล.....                                                                              | 53 |
| 4.1 การทดสอบหาผลลัพธ์ของรูปคลื่นแรงดันของสัญญาณพัลส์ที่วัดได้.....                                               | 53 |
| 4.1.1 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....                                                                    | 53 |
| 4.1.2 ผลการทดสอบจริงที่วัดได้ด้วยออสซิลโลสโคปความถี่สูง.....                                                     | 55 |
| 4.1.3 ผลการทดสอบรูปคลื่นตัดซึ่งเกิดจากการจุดสปาร์กแกป.....                                                       | 58 |
| 4.2 การทดสอบชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อวิเคราะห์ช่วงกระตุ่นสปาร์กได้..... | 59 |
| 4.2.1 ทดสอบที่แรงดันอิมพัลส์ช้าบวก.....                                                                          | 59 |
| 4.2.2 ทดสอบที่แรงดันอิมพัลส์ช้าลบ.....                                                                           | 61 |
| 4.3 การทดสอบตู้ควบคุมแรงดันอัดประจุ.....                                                                         | 62 |
| บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผล.....                                                                                  | 63 |
| 5.1 สรุปผลการดำเนินงานในโครงการ.....                                                                             | 63 |
| 5.2 อุปสรรคและวิธีการแก้ไขในโครงการ.....                                                                         | 64 |
| 5.3 บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....                                                                               | 64 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| รายการอ้างอิง.....                                  | 65 |
| ภาคผนวก.....                                        | 66 |
| ก บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....               | 67 |
| ข ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PC50U.....      | 71 |
| ค ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250.....           | 79 |
| ง ข้อมูลแสดงคุณสมบัติ คิจิตอลมิเตอร์รุ่น PAXH.....  | 85 |
| จ ข้อมูลแสดงคุณสมบัติ คิจิตอลมิเตอร์รุ่น PAXLA..... | 86 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

| รูปที่                                                                                            | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2-1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้า.....                                                                | 6    |
| 2-2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง.....                                                            | 7    |
| 2-3 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดสร้างแรงดันอิมพัลส์.....                                           | 8    |
| 2-4 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้น.....                                                   | 11   |
| 2-5 อิเล็กทรอนิกส์สปาร์กแกป.....                                                                  | 14   |
| 2-6 สปาร์กแกปมีไกสวิตช์.....                                                                      | 14   |
| 2-7 ช่วงการกระตุ้นสปาร์กได้ของไกสวิตช์ในทอมของระยะแกป.....                                        | 15   |
| 2-8 ลาพลาซทรานฟอร์มของวงจรอิมพัลส์พื้นฐาน.....                                                    | 16   |
| 2-9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียลสองทอม.....                                   | 18   |
| 2-10 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์.....                                     | 20   |
| 2-11 เส้นกราฟใช้หาแรงดันคิสซาร์จเบรกดาวน์ 50%.....                                                | 22   |
| 2-12 องค์ประกอบในระบบวัดแรงดัน.....                                                               | 23   |
| 3-1 วงจรกำเนิดแรงดันสูง.....                                                                      | 26   |
| 3-2 วงจรที่ใช้ในการจำลองสร้างรูปคลื่นสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....    | 28   |
| 3-3 วงจรภายใน IC เบอร์ TLP250.....                                                                | 29   |
| 3-4 วงจรชุดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์.....                                                              | 30   |
| 3-5 วงจรทวิแรงดัน.....                                                                            | 32   |
| 3-6 โครงสร้างของตู้ควบคุมแรงดันอัดประจุที่ได้ทำการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....               | 36   |
| 3-7 วงจรควบคุมแรงดันอัดประจุ.....                                                                 | 37   |
| 3-8 วงจรควบคุมมอเตอร์ปรับแกป.....                                                                 | 42   |
| 3-9 วงจรกำลังมอเตอร์ปรับแกป.....                                                                  | 43   |
| 3-10 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการประกอบตู้ควบคุมแรงดันอัดประจุ.....                                     | 45   |
| 3-11 ตู้ควบคุมแรงดันอัดประจุที่ได้ทำการประกอบสร้างจริง.....                                       | 47   |
| 3-12 แผนหน้าปัดฟังก์ชันการทำงานของตู้ควบคุม.....                                                  | 49   |
| 3-13 ชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ทำการประกอบสร้างจริง..... | 52   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

|     |                                                                                                                                                                                                   |    |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4-1 | วงจรที่ใช้ในการจำลองสร้างรูปคลื่นสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....                                                                                                        | 54 |
| 4-2 | ผลของการจำลองรูปคลื่นสัญญาณพัลส์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....                                                                                                                                       | 55 |
| 4-3 | วงจรกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์<br>1) ชุดวงจรทวีแรงดัน 2) ชุดสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์ 3) ชุดกำเนิดแรงดันสูง.....                                                       | 56 |
| 4-4 | ผลของการทดสอบรูปคลื่นสัญญาณพัลส์ที่วัดได้ด้วยออสซิลโลสโคปความถี่สูง.                                                                                                                              | 57 |
| 4-5 | รูปคลื่นตัดซึ่งเกิดจากการจุดสปาร์กแกป.....                                                                                                                                                        | 58 |
| 4-6 | กราฟความสัมพันธ์ที่ชั่ววอก ของค่าแรงดันอัดประจุที่เกิดจากค่าแรงดันเบรก<br>คาวานส์ติติ ค่าแรงดันเบรกคาวน์ที่สามารถกระตุ้นสปาร์กได้ และ % ช่วงทำงาน<br>เริ่มต้นของ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์..... | 60 |
| 4-7 | กราฟความสัมพันธ์ที่ชั่วลบของค่าแรงดันอัดประจุที่เกิดจากค่าแรงดัน<br>เบรกคาวน์สติติ ค่าแรงดันเบรกคาวน์ที่สามารถกระตุ้นสปาร์กได้ และ<br>% ช่วงทำงานเริ่มต้นของ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....     | 62 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

| ตารางที่                                                                                                | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1-1 แผนการดำเนินงานและการดำเนินงานจริงในโครงการวิศวกรรม1.....                                           | 3    |
| 1-2 แผนการดำเนินงานและการดำเนินงานจริงในโครงการวิศวกรรม2.....                                           | 3    |
| 2-1 ขนาดแรงดันทดสอบ BIL (Basic insulation levels withstand).....                                        | 9    |
| 2-2 $B_1, B_0$ และ $K$ สำหรับวงจร A และ B.....                                                          | 17   |
| 2-3 เวลา $T_1, T_2$ และประสิทธิภาพของวงจร A และ B.....                                                  | 20   |
| 3-1 คุณสมบัติการเปิดปิดวงจรของ IGBT เบอร์ IRG4PC50U.....                                                | 30   |
| 3-2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ IC เบอร์ TLP250.....                                                           | 31   |
| 4-1 ข้อมูลผลการจำลองรูปคลื่นเต็มซึ่งวัดได้จากด้านแรงต่ำและแรงสูง.....                                   | 45   |
| 4-2 ข้อมูลผลการทดสอบรูปคลื่นเต็มซึ่งวัดได้จากด้านแรงต่ำและแรงสูง.....                                   | 47   |
| 4-3 ข้อมูลผลการทดสอบรูปคลื่นตัดซึ่งเกิดจากการจุดสปาร์กแก๊ปทั้ง 2 ด้าน.....                              | 49   |
| 4-4 แรงดันเบรกควานส์สถิติและแรงดันเบรกควานส์ที่สามารถกระตุ้นสปาร์กได้ที่แรง<br>ดันอิมพัลส์ชั่วคราว..... | 50   |
| 4-5 แรงดันเบรกควานส์สถิติและแรงดันเบรกควานส์ที่สามารถกระตุ้นสปาร์กได้ที่แรง<br>ดันอิมพัลส์ช้าลง.....    | 52   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังนั้น ได้มีการติดตั้งชุดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 200 kV 5 kJ ขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษา วิจัยและการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ก่อนนำไปติดตั้งในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์ต่างๆ ที่ติดตั้งในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูงนั้น ล้วนแต่มีโอกาสดำรับแรงดันเกินที่เกิดจากสาเหตุภายนอกที่เกี่ยวกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า และที่เกิดจากสาเหตุภายในระบบสายส่งเอง คือ เกิดจากการตัดต่อวงจรหรือเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง อันเกิดแรงดันเกินที่ เรียกว่า แรงดันอิมพัลส์แบบสวิตชิง

หากแต่ปัจจุบัน ชุดเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ดังกล่าว มีการติดตั้งใช้งานเป็นเวลาหลายปี และขาดการดูแลรักษาจึงทำให้เกิดปัญหาต่างๆขึ้น ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังนี้

- 1) ชุดควบคุมเครื่องแรงดันอัดประจุ ซึ่งเป็นระบบที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรเลอร์ ซึ่งปัจจุบัน ได้เกิดความชำรุดเสียหายและไม่สามารถใช้งานได้อย่างปกติ
- 2) ชุดทริกเกอร์แรงดัน เกิดชำรุดเสียหายขึ้น ไม่สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่าสอดคล้องตามที่กำหนดได้
- 3) ดิจิตอลออสซิลโคป (Digital oscilloscope) เกิดชำรุดเสียหาย

จากปัญหาดังกล่าว จึงทำให้ทางภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ามีความจำเป็นต้องปรับปรุงชุดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ดังกล่าว เพื่อให้สามารถใช้งานได้ตามปกติเดิม และพัฒนาระบบควบคุมเป็นระบบที่เข้าใจง่ายเหมาะสมกับการใช้งานเพื่อศึกษาวิจัยและทดสอบในสถาบัน ดังนั้น หากสามารถออกแบบและแก้ไขขึ้นเองได้ จะทำให้ประหยัดงบประมาณของทางภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และยังเป็นการพัฒนาความรู้ความสามารถของนักศึกษา ทำให้ได้รับประสบการณ์ในการทำงานมากขึ้นอีกด้วย

#### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาและปรับปรุงชุดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 200 kV 5 kJ ให้สามารถใช้งานได้ตามปกติ
- 2) เพื่อออกแบบชุดควบคุมแรงดันอัดประจุ ให้สามารถใช้งานได้ตามปกติ
- 3) เพื่อออกแบบและสร้างชุดทริกเกอร์แรงดันอิมพัลส์ใหม่ ที่ทำงานโดยใช้ชุดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) เพื่อนำชุดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ และชุดควบคุมแรงดันดังกล่าวมาใช้ในการศึกษา วิจัยและทดสอบทางไฟฟ้าแรงสูงที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 5) เป็นการประหยัดงบประมาณของทางภาควิชา เพราะสามารถออกแบบและปรับปรุงซ่อมแซมเองได้

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในงานวิจัย

- 1) ทำการออกแบบและสร้างชุดควบคุมแรงดันโดยใช้ระบบ Manual แทนระบบ Microcontroller เดิมที่มีการชำรุดเสียหาย พร้อมออกแบบโครงสร้างของตู้ควบคุมแรงดัน
- 2) ออกแบบและสร้างชุดทริกเกอร์แรงดัน และปรับเทียบระยะแกปสำหรับการคายประจุเพื่อกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
- 3) ออกแบบและสร้างชุดควบคุมแรงดันอัดประจุของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
- 4) ออกแบบและสร้างระบบไมโครวาร์ดขึ้นใหม่เพื่อให้เกิดความปลอดภัยยิ่งขึ้น

### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาการสร้างและการวัดแรงดันอิมพัลส์จากเอกสารวิชาการ ตำรามาตรฐาน IEC 60-1 และ IEC 60-2
- 2) ศึกษาการใช้งานโปรแกรมที่เกี่ยวข้อง
  - โปรแกรมจำลองวงจรทางไฟฟ้า (PSpice)
  - โปรแกรมที่ใช้สำหรับออกแบบตู้คอนโทรล (Solid work)
  - โปรแกรมตรวจสอบวงจรควบคุมแรงดัน
- 3) ศึกษาทฤษฎีขั้นตอนการสร้างและออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จากหนังสือและงานวิจัยต่างๆ
- 4) ทำการออกแบบและปรับปรุงชุดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
- 5) ประกอบสร้าง
- 6) ทดสอบและบันทึกผล
- 7) สรุปผลและเขียนปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แผนการงาน และการดำเนินงานจริงในโครงการ 1

| ขั้นตอนการทำงาน                                                                            | พ.ศ.2550 |      |      |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------|------|------|
|                                                                                            | มิ.ย.    | ก.ค. | ส.ค. | ก.ย. |
| 1) ศึกษาการสร้างและวัดแรงดันอิมพัลส์จากเอกสารวิชา ตำรา มาตรฐาน IEC 60-1 และ IEC 60-2       |          |      |      |      |
| 2) ศึกษาการใช้งานโปรแกรมที่เกี่ยวข้อง                                                      |          |      |      |      |
| 3) ศึกษาทฤษฎีขั้นตอนการสร้างและออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จากหนังสือและงานวิจัยต่างๆ |          |      |      |      |
| 4) ทำการออกแบบและปรับปรุงชุดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์                                    |          |      |      |      |

ตารางที่ 1.2 แผนการดำเนินงาน และการดำเนินงานจริงในโครงการ 2

| ขั้นตอนการทำงาน               | พ.ศ.2550 – พ.ศ.2551 |      |      |      |      |
|-------------------------------|---------------------|------|------|------|------|
|                               | ต.ค.                | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค. | ก.พ. |
| 1) ประกอบสร้าง                |                     |      |      |      |      |
| 2) ทดสอบและบันทึกผล           |                     |      |      |      |      |
| 3) สรุปผลและเขียนปริญญานิพนธ์ |                     |      |      |      |      |

หมายเหตุ

คือ ระยะเวลาปฏิบัติงานที่วางไว้

คือ ระยะเวลาปฏิบัติงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

- 1) มีความรู้ความเข้าใจในทฤษฎี และหลักการทำงานของชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
- 2) ชุดทริกเกอร์ที่ได้ออกแบบสร้างใหม่ สามารถเป็นต้นแบบที่สามารถนำไปศึกษาและวิจัยเพื่อพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น
- 3) เกิดแนวคิดในการออกแบบโครงสร้างตัวควบคุมแรงดัน ไมโครเวฟ ชุดปรับแก้ และชุดทริกเกอร์แรงดัน
- 4) มีความรู้ความเข้าใจในการสร้างและการวัดแรงดันอิมพัลส์
- 5) มีความรู้เกี่ยวกับมาตรฐานแรงดันอิมพัลส์จาก IEC 60-1 และ IEC 60-2 มากขึ้น
- 6) ประหยัดงบประมาณของทางภาควิชาในการปรับปรุงชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ขนาด 200 kV 5 kJ
- 7) ฝึกการทำงานร่วมกันเป็นกลุ่ม
- 8) ได้ฝึกฝนทักษะการแก้ปัญหาในการทำงานเป็นทีม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แรงดันอิมพัลส์ทั้งแบบรูปคลื่นฟ้าผ่าและแบบสวิตช์ซิง เป็นแรงดันทรานเซียนต์ที่ไม่เป็นคาบ ค่าแรงดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากศูนย์ไปจนถึงค่ายอด แล้วจะค่อยๆ ลดลงไปเป็นศูนย์ รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จะกำหนดด้วย

- ขั้วของแรงดัน เป็นบวกหรือลบ
- ขนาดแรงดัน ซึ่งหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่น
- เวลาช่วงหน้าคลื่น  $T_1$  คือ ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มต้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด
- เวลาช่วงหางคลื่น  $T_2$  คือ ช่วงเวลาที่นับจากแรงดันเริ่มต้นจากศูนย์ผ่านค่ายอด จนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด
- แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าจะเรียกว่า รูปคลื่น 1.2/50  $\mu\text{s}$
- แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตช์ซิงจะเรียกว่า รูปคลื่น 250/2500  $\mu\text{s}$

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ขนาดเพิ่มขึ้นจนถึงค่ายอดแล้วค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งเป็นศูนย์ เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม (Full wave) ดังรูปที่ 2-1ก) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มนี้เมื่อป้อนเข้าไปที่วัสดุทดสอบแล้ว การฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นทนต่อแรงดันไม่ได้ ก็เกิดสปาร์กหรือเบรกดาว์นหรือวาบไฟตามผิวขึ้น ณ จุดหนึ่งบนรูปคลื่นนั้น แรงดันจะยุบตัวลงเป็นศูนย์ เกิดเป็นรูปคลื่นตัด (Chopped wave) ซึ่งอาจเกิดคลื่นตัดขึ้นที่ส่วนหางคลื่นหรือส่วนหน้าคลื่นก็ได้ ดังรูปที่ 2-1 ข) และ 2-1 ค) ตามลำดับ ลักษณะของรูปคลื่นตัดจะมีส่วนกำหนดที่สำคัญคือ เวลาช่วงคลื่นตัด (Chopped time)  $T_c$

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตามมาตรฐานกำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่น  $T_1$  เวลาหางคลื่น  $T_2$  และค่ายอด  $U_m$  ไว้คือ

$$\text{เวลาช่วงหน้าคลื่น } T_1 = 1.2 \mu\text{s} \pm 30 \%$$

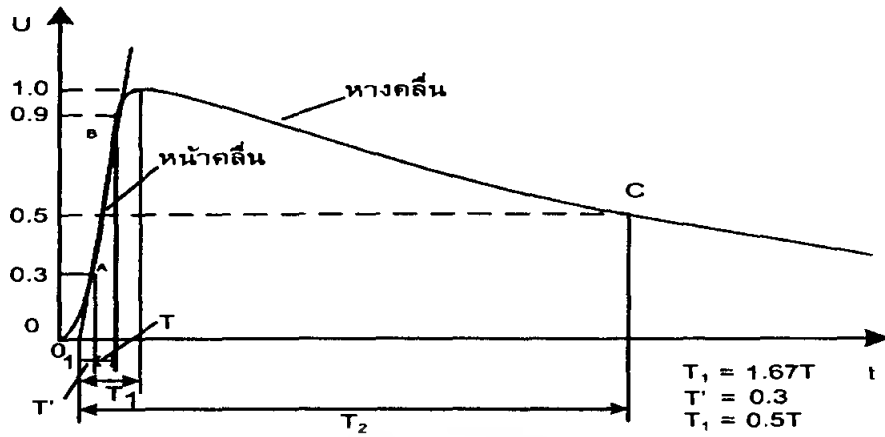
$$\text{เวลาช่วงหางคลื่น } T_2 = 50 \mu\text{s} \pm 20 \%$$

$$\text{ค่ายอดแรงดัน } U_m \pm 3 \%$$

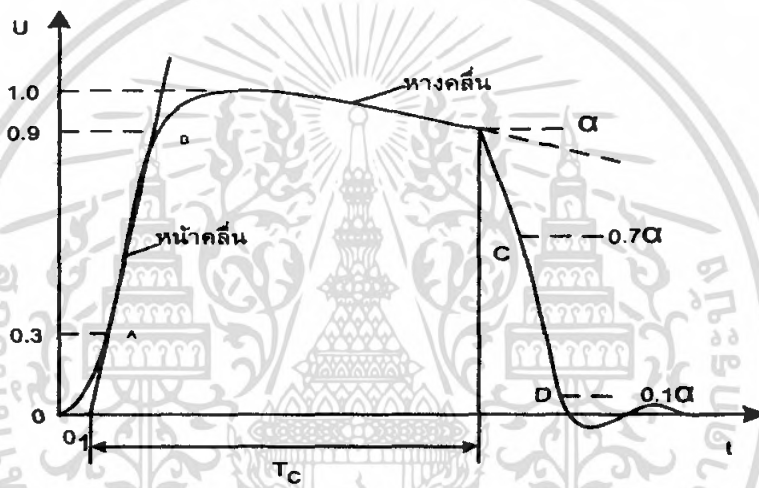
ส่วนแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตช์ซิง 250/2500  $\mu\text{s}$  ดังรูปที่ 2-2 จะกำหนดให้มีความคลาดเคลื่อนได้คือ

$$\text{เวลาช่วงหน้าคลื่น } T_\alpha = 250 \mu\text{s} \pm 20 \%$$

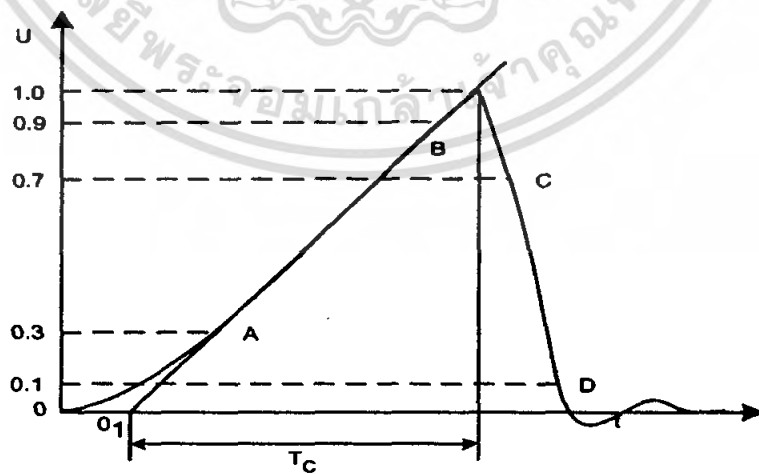
$$\text{เวลาช่วงหางคลื่น } T_2 = 2500 \mu\text{s} \pm 60 \%$$



ก) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม



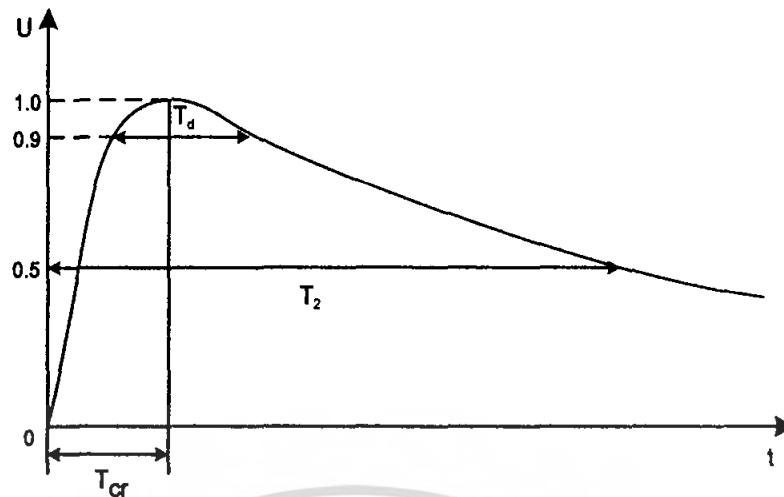
ข) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นคัตที่ทางคลื่น



ค) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นคัตที่หน้าคลื่น

รูปที่ 2-1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า

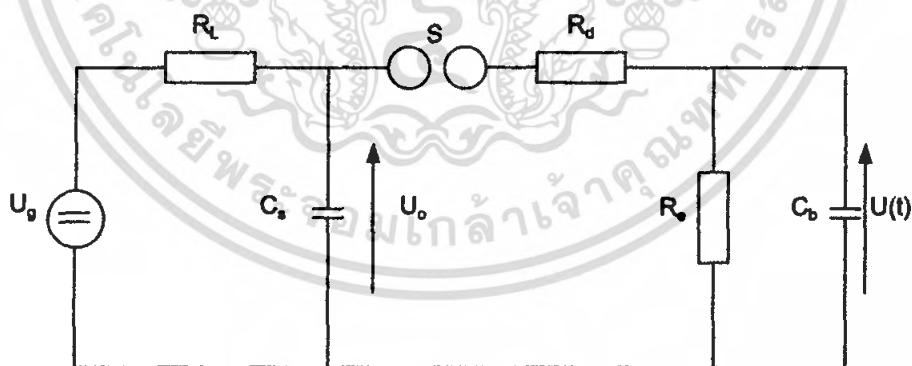
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ให้ผู้อื่นได้ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



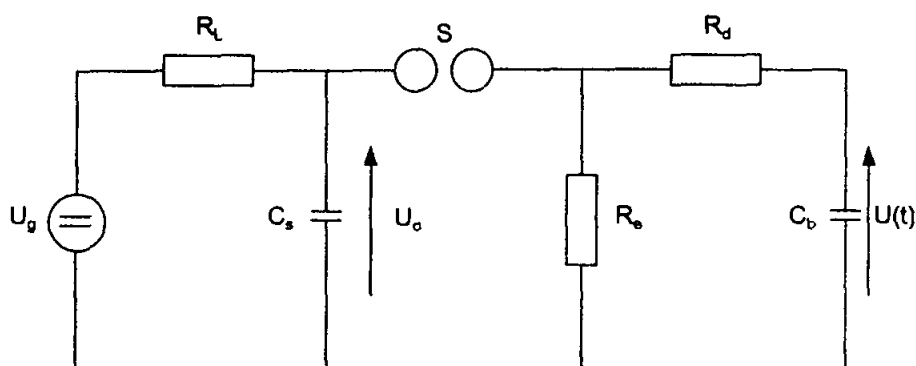
รูปที่ 2-2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

### 2.1 วงจรพื้นฐานของการสร้างแรงดันอิมพัลส์

การสร้างแรงดันอิมพัลส์จะอาศัยหลักการของวงจรทราแซียนต์ RC โดยการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการ แล้วปล่อยให้การคายประจุผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าคงตัวเวลาให้มีรูปคลื่นตามต้องการได้ วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปมี 2 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2-3 ก) และ ข)



ก) วงจร A



ข) วงจร B

## รูปที่ 2-3 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดสร้างแรงดันอิมพัลส์

ความหมายในรูปวงจร A และ B

- $U_g$  = แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย เป็นตัวป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์
- $U_o$  = แรงดันอัดประจุกระแสตรง
- $C_s$  = ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน
- $C_b$  = โหลดตัวเก็บประจุ (รวมทั้งความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดแรงดันและอื่นๆ)
- $R_L$  = ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ
- $R_d$  = ความต้านทานหน่วง เป็นตัวปรับหน้าคลื่น  $T_1$
- $R_o$  = ความต้านทานปล่อยประจุ เป็นตัวปรับหางคลื่น  $T_2$
- $U(t)$  = แรงดันอิมพัลส์ที่ได้แปรไปตามเวลา
- $S$  = สปาร์กแกป เป็นตัวกำหนดค่าแรงดันอัดประจุ และทำหน้าที่เป็นไกสวิตช์ไกสต์ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์  $C_s$  คิซาร์จประจุให้กับโหลด

หน้าที่ของส่วนประกอบในวงจร คือ ตัวจ่ายแรงดันกระแสตรง  $U_g$  เป็นตัวป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ที่เป็นตัวเก็บพลังงาน ซึ่งมีค่าแรงดันที่กำหนด  $U_o$  การอัดประจุนี้จะผ่านความต้านทาน  $R_L$  ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมเวลาในการอัดประจุระยะห่างของสปาร์กแกป  $S$  จะเป็นตัวกำหนดแรงดันที่เริ่มทำงานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อให้สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่าสอดคล้องตามต้องการ โดยที่สปาร์กแกปจะทำงานร่วมกับไกสวิตช์ (Trigger) ที่มีลักษณะเป็นแกปช่วย (Auxiliary gap) เพื่อให้ตัวเก็บประจุ  $C_s$  ทำการปล่อยประจุให้กับโหลด การเกิดสปาร์กในช่องสปาร์กแกปจะดำเนินไปด้วยความรวดเร็ว คือ ใช้เวลาน้อยกว่า 100 ns เมื่อเกิดสปาร์กแกปที่  $S$  แรงดันอัดประจุ  $U_o$  จะคร่อม  $R_d$  และ  $C_b$  ซึ่งประจุจะถ่ายเทไปยังวัสดุทดสอบซึ่งแทนด้วย  $C_b$  เวลาในการคายประจุจาก  $C_s$  ไปยัง  $C_b$  จะขึ้นอยู่กับ  $R_d$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ  $C_b$  ซึ่งเป็นเวลาช่วงหน้าคลื่น  $T_1$  เมื่อถ่ายเทประจุให้  $C_b$  จนกระทั่งแรงดันคร่อม  $C_s$  เท่ากับแรงดันคร่อม  $C_b$  จะไม่มีการถ่ายเทประจุระหว่าง  $C_s$  กับ  $C_b$  จากนั้น  $C_s$  และ  $C_b$  จะทำการคายประจุผ่าน  $R_o$  จึงกล่าวได้ว่า  $R_o$  ทำหน้าที่ควบคุมเวลาช่วงหางคลื่น  $T_2$

ค่ายอดแรงดันที่จ่ายออกที่ปลายแรงสูง  $U$  จะน้อยกว่าแรงดันอัดประจุ  $U_o$  เพราะมีการถ่ายเทประจุระหว่าง  $C_s$  และ  $C_b$  ฉะนั้นอัตราส่วนของ  $U$  ต่อ  $U_o$  จะน้อยกว่า 1 เสมอ และเรียกอัตราส่วนนี้เป็นประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นั้น คือ

ประสิทธิภาพของวงจร      $\eta$      =      $U / U_o \leq (C_s / (C_s + C_b))$      (2-1)

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

ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปจะกำหนดด้วย

- แรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิด
- แรงดันอัดประจุรวมทั้งหมด  $U_o$
- ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด  $C_s$
- พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด
- อัตราการดีสชาร์จจำนวนครั้งต่อนาที
- รูปคลื่นแรงดันแบบฟ้าผ่า

ค่าแรงดันพิคคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ BIL (Basic insulation levels withstand) หรือ SIL (Standard impulse levels) ตามมาตรฐานกำหนด ตามระดับแรงดันของระบบที่จะนำเอาอุปกรณ์ไปใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2-1 ก และ ข ตารางที่ 2-1 ก ขนาดแรงดันทดสอบ BIL (Basic insulation levels withstand)

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

ตารางที่ 2-1 ข ขนาดแรงดันทดสอบ BIL (Basic insulation levels withstand)

| 1                                                 | 2                                                                 | 3                                                     | 4                                                                 |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Highest voltage for equipment $U_m$<br>$kV_{rms}$ | Base for p.u. values<br>$U_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} kV_{peak}$ | Rated lightning impulse withstand voltage $kV_{peak}$ | Rated power-frequency short duration withstand voltage $kV_{rms}$ |
| 52                                                | 42.5                                                              | 250                                                   | 95                                                                |
| 72.5                                              | 59                                                                | 325                                                   | 140                                                               |
| 123                                               | 100                                                               | 450                                                   | 185                                                               |
| 145                                               | 118                                                               | 550                                                   | 230                                                               |
| 170                                               | 139                                                               | 650                                                   | 275                                                               |
| 245                                               | 200                                                               | 750                                                   | 325                                                               |
|                                                   |                                                                   | 850                                                   | 360                                                               |
|                                                   |                                                                   | 950                                                   | 395                                                               |
|                                                   |                                                                   | 1050                                                  | 460                                                               |

พลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับความจุไฟฟ้า  $C_s$  และแรงดันอัดประจุ  $U_0$  ซึ่งค่าพลังงานคำนวณได้จากสมการ

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

- เมื่อ  $W$  คือ พลังงานอัดประจุเป็น kJ  
 $C_s$  คือ ความจุไฟฟ้าของของตัวเก็บประจุเป็น  $\mu F$   
 $U_0$  คือ แรงดันอัดประจุเป็น kV

2.2 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่มีพิคเกิน 200 kV โดยปกติจะใช้วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น อันเนื่องมาจากข้อจำกัด ด้านฉนวน ด้านเศรษฐศาสตร์ โดยจะใช้วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์พื้นฐาน มาต่อซ้อนกันหลายชั้นตามหลักการ วงจรของมาร์กซ์ (Marx's circuit) ดังในรูปที่ 2-4

ในวงจรรูปที่ 2-4 ตัวเก็บประจุ  $C_s$  ทุกตัวจะได้รับการอัดประจุในลักษณะที่ต่อกันแบบขนานด้วยแรงดัน  $U_0$  เมื่อส่งสัญญาณพัลส์ผ่านไกสวิตช์จะทำให้สปาร์กที่แกปชั้นแรกทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นใบเซอร์ยืนยันการคืนค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## 2.3 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะประกอบด้วย องค์ประกอบดังนี้

- 1) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์  $C_s$
- 2) ตัวเก็บประจุโหลด  $C_b$
- 3) ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ  $R_L$
- 4) ความต้านทานปรับหน้าคลื่น  $R_d$  และความต้านทานปรับหลังคลื่น  $R_r$
- 5) สปรังก์แก๊ปและไกสวิตช์

2.3.1 ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ทำหน้าที่เก็บพลังงานไว้ในรูปสนามไฟฟ้า โดยการอัดประจุด้วยแรงดันสูงกระแสตรง แล้วคายพลังงานออกไปอย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้น ตัวเก็บประจุอิมพัลส์จึงต้องเป็นประเภทที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้รูปคลื่นแรงดันที่สร้างขึ้นไม่เกิดการแกว่ง (Oscillation)

ค่าความจุไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน ( $1.2/50 \mu s$ ) ได้ โดยปกติค่าตัวเก็บประจุ  $C_s$  จะต้องมียาวมากกว่าค่าตัวเก็บประจุโหลด  $C_b$  อย่างน้อย 10 เท่า นั่นคือ

$$C_s \geq 10 C_b \quad (2-7)$$

2.3.2 ตัวเก็บประจุโหลด ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุโหลด  $C_b$  หมายถึง ผลรวมของความจุไฟฟ้าของวัสดุ และอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า ปลอกฉนวนนำสายหม้อแปลงวัดแรงดันและกระแส โวลเตจดีไวเซอร์ รวมกับตัวเก็บประจุที่ต่อเพิ่มเติมเข้าไปเพื่อปรับรูปคลื่นให้ได้ตามมาตรฐาน ซึ่งตัวเก็บประจุโหลด  $C_b$  มีส่วนสำคัญในการปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับส่วนหน้าคลื่น แต่จะมีผลน้อยต่อหางคลื่น คุณสมบัติของตัวเก็บประจุโหลดจะต้องมีค่าพิกตแรงดันมากกว่าค่าแรงดันทดสอบของวัสดุหรืออุปกรณ์ทดสอบและควรมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำด้วย เหตุผลเช่นเดียวกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์  $C_s$

2.3.3 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ  $R_L$  ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปจะมีการกำหนดความถี่ของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ไว้ เช่น 3 ครั้งต่อนาที เพราะการใช้เครื่องกำเนิดให้ทำการคายประจุ และอัดประจุด้วยอัตราเร็วมากเกินไปจะทำให้เกิดผลเสียต่อองค์ประกอบต่างๆ เช่น วงจรเรกติฟายเออร์ (ไดโอดแรงสูง และตัวเก็บประจุกรองกระแส) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ และความต้านทานปรับรูปคลื่นเป็นต้น เพราะว่าการคายประจุจะเป็นแบบสภาวะทรานเซียนต์ ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันและกระแสอย่างรวดเร็ว นั่นก็คือเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของสนามไฟฟ้า ซึ่งมีผลกระทบต่อการฉนวนขององค์ประกอบของเครื่องกำเนิดในด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าหรือความเครียดสนามไฟฟ้า อันจะทำให้อายุการใช้งานขององค์ประกอบสั้นลงหากใช้งานอย่างต่อเนื่องที่เกินไป ฉะนั้นจึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะต้องไม่ใช่เครื่องกำเนิดให้เกิดการอัดประจุหรือคายประจุต่อเนื่องกันไป ซึ่งการจำกัดอัตราการอัดประจุอาจทำได้โดยใช้ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ  $R_L$  ซึ่งจะค่อนุกรมคั่นอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์  $C_s$  เพื่อให้กระแสอัดประจุมีค่าไม่เกินค่าพิทกกระแสของแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง  $i$  ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มแรงดันอัดประจุ  $du/dt$  จะต้องไม่ควรเร็วเกินไป ดังนั้นค่ากระแสอัดประจุจึงเขียนได้ว่า

$$i = C_s \cdot du/dt \quad (2-8)$$

นอกจากนี้ ความต้านทาน  $R_L$  ต้องมีความคงทนต่อแรงแรงดันอัดประจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ได้ เพราะความต้านทาน  $R_L$  จะต้องรับแรงดันเท่ากับพิทกของแรงดันอัดประจุเมื่อตัวเก็บประจุอัดประจุเต็ม แล้วนอกจากต้องเลือกค่าความต้านทานและความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์แล้วยังต้องคำนึงถึงค่ากำลังไฟฟ้าของ  $R_L$  ที่มีค่าสูงพอ เมื่อต้องรับกระแสอัดประจุตลอดเวลาที่อัดประจุได้

2.3.4 ความต้านทานปรับรูปคลื่น ความต้านทานปรับรูปคลื่นในที่นี้หมายถึงความต้านทาน  $R_d$  และ  $R_o$  ที่แสดงไว้ในรูปที่ 2-3 ซึ่ง  $R_d$  จะมีผลต่อเวลาหน่วงคลื่น  $T_1$  กล่าวคือ  $T_1$  จะแปรตามค่า  $R_d$  และเช่นเดียวกัน  $R_o$  มีผลต่อเวลาทางคลื่น  $T_2$  นั่นคือ  $T_2$  จะแปรตาม  $R_o$

คุณสมบัติของความต้านทาน  $R_d$  และ  $R_o$  จะต้องสามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับพลังงานจากการดิสชาร์จในสภาวะทราวนเขียนต์ได้ โดยไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนเกินไปตลอดช่วงเวลาทำงาน โดยทั่วไปมักจะใช้ความต้านทานที่ทำด้วยเส้นลวดความต้านทานซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอาจคำนวณได้จากสมการของพลังงานที่ผ่านความต้านทาน คือ

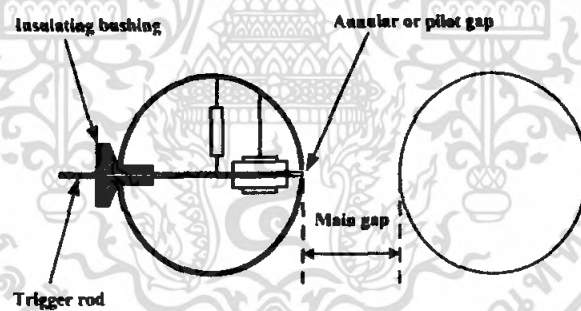
$$W = mc \Delta T \quad (2-9)$$

เมื่อ  $W$  คือ พลังงานที่ป้อนผ่านความต้านทาน (kJ)  
 $m$  คือ มวลของเส้นลวดที่ประกอบเป็นความต้านทาน (kg)  
 $c$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg.°K)  
 $\Delta T$  คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น (°C)

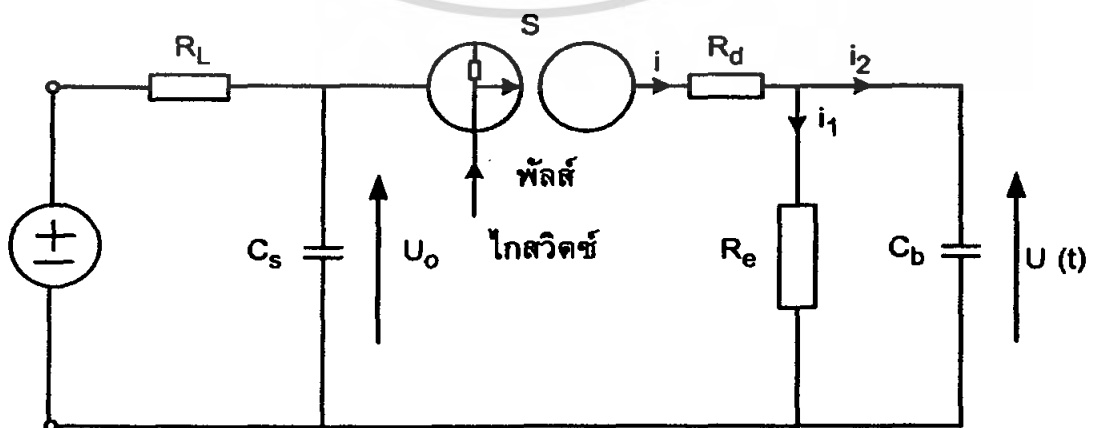
สิ่งสำคัญประการหนึ่งของการทำความต้านทาน  $R_d$  และ  $R_o$  ก็คือจะต้องเป็นความต้านทานปลอดความเหนียวนาหรือมีแค่น้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อมิให้เกิดการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

2.3.5 สปาร์กแก๊ปและไกสวิตช์ แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบหรือ การศึกษาวิจัยจะต้องสามารถสร้างให้มีขนาดเท่าเดิมก็ครั้งก็ได้ ซึ่งตามมาตรฐาน IEC 71 [1] ได้ กำหนดให้มีค่าคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน  $\pm 3\%$  การควบคุมให้ขนาดแรงดันเท่าเดิมดังกล่าวนี้ทำได้โดยการใช้พัลส์ไกสวิตช์บังคับให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เริ่มต้นคายประจุที่แรงดันอัดประจุที่กำหนด พัลส์ไกสวิตช์จะเป็นตัวทำให้เกิดการสปาร์กที่แก๊ปช่วย (auxiliary gap) ซึ่งเป็นแก๊ปแคบๆ ขนาดประมาณ 1-2 มิลลิเมตร อยู่ทางด้านหนึ่งของสปาร์กแก๊ปคู่แรกของเครื่องกำเนิด ดังรูปที่ 2-5 และ 2-6 แก๊ปช่วยนี้จะป็นสัญญาณพัลส์ทำให้เกิดสปาร์กขึ้นในแก๊ปช่วยก่อน ผลของการเกิดสปาร์กในแก๊ปช่วยนี้ทำให้เกิด การไอออไนเซชันของอากาศและเกิด อิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น ระหว่างสปาร์กแก๊ปคู่แรกและเกิดการคายประจุที่สปาร์กแก๊ปคู่ นั้น เป็นผลให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ตัวแรกค่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ตัวที่สอง และเกิดสปาร์กที่ แก๊ปถัดไปเป็นลำดับจนถึงแก๊ปคู่สุดท้ายหรือคู่บนสุดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และเป็นการ เริ่มต้นคายพลังงานให้กับตัวเก็บประจุโหลด ซึ่งจะได้อิมพัลส์ตามที่ต้องการ ฉะนั้น การใช้ไกสวิตช์ช่วยเริ่มต้นจุดสปาร์กจึงทำให้สามารถกำหนดแรงดันคายประจุ ได้อย่างแม่นยำ

สัญญาณพัลส์ที่ใช้สำหรับทำให้เกิดสปาร์กในแก๊ปช่วยนั้น โดยทั่วไปจะใช้สวิทช์ อิเล็กทรอนิกส์ความเร็วสูงร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์สร้างพัลส์ โดยแรงดันของพัลส์นี้มี ค่าประมาณ 5-10 kV และจะต้องทำให้เกิดสปาร์กแก๊ปภายในเวลา 10-100 ns



รูปที่ 2-5 อิเล็กทรอนิกส์สปาร์กแก๊ป [4]



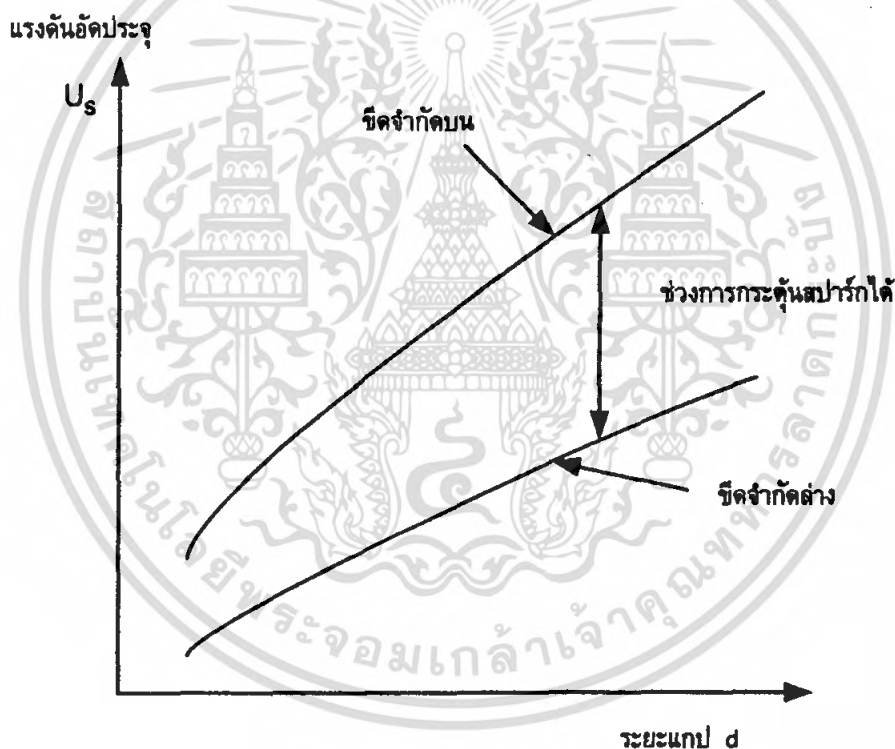
รูปที่ 2-6 สปาร์กแก๊ปมีไกสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะการทำงานหรือประสิทธิภาพของไกสวิตช์จะพิจารณากันที่ช่วงการกระตุ้นสปาร์กได้ ซึ่งหมายถึงที่ระยะแกปกำหนดให้ค่าหนึ่ง โดยให้เกิดสปาร์กเอง (Self firing) เรียกว่า ชิดจำกัดบน และที่พัลส์ไกสวิตช์จะสามารถจุดสปาร์กได้ (Trigger) ที่แรงดันอัดประจุต่ำสุดเท่าใด เรียกว่า ชิดจำกัดล่าง ความแตกต่างของแรงดันกระตุ้นสปาร์กได้ระหว่างค่าต่ำสุดกับค่าสูงสุด เรียกว่า “ช่วงการกระตุ้นสปาร์กได้” (Trigger range) ของไกสวิตช์ ซึ่งอาจแสดงเป็นค่าแรงดัน กิโลโวลต์ หรือเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าแรงดันชิดจำกัดบนนั้น คือ

$$\text{ช่วงการกระตุ้นสปาร์กได้} = (\text{ชิดจำกัดบน} - \text{ชิดจำกัดล่าง}) / \text{ชิดจำกัดบน} \times 100\% \quad (2-10)$$

ความสัมพันธ์ของแรงดันที่กระตุ้นได้ต่ำสุดและสูงสุด และช่วงการกระตุ้นได้ในเทอมของระยะแกปในรูปที่ 2-7

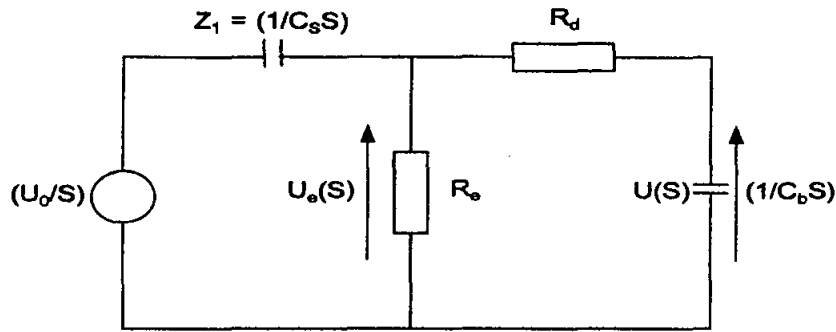


รูปที่ 2-7 ช่วงการกระตุ้นสปาร์กได้ของไกสวิตช์ในเทอมของระยะแกป

## 2.4 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์

2.4.1 การแปรของแรงดันในเทอมของเวลา อาศัยการวิเคราะห์จากวงจรพื้นฐานสร้างแรงดันอิมพัลส์ เช่น วงจรพื้นฐาน B ในรูปที่ 2-3 ข เมื่ออัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C$  ด้วยแรงดันอัดประจุ  $U_0$  และเกิดสปาร์กที่สปาร์กแกป  $S$  จะทำให้  $C$  ต่อกับวงจรปรับรูปคลื่น การวิเคราะห์ใช้ Laplace transform เขียนวงจรสร้างแรงดันได้ดังรูปที่ 2-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-8 ลาพลาซทรานฟอร์มของวงจรอิมพัลส์พื้นฐาน

จากวงจรในรูป 2-8 ค่าแรงดันตกคร่อม  $R_o$  จะเขียนได้ว่า

$$U_e(s) = \frac{U_o}{S} \frac{Z_2}{(Z_1 + Z_2)} \quad (2-11)$$

เมื่อ  $Z_1 = \frac{1}{C_s S}$  (2-12)

$$Z_2 = \frac{R_e(R_d + \frac{1}{C_b S})}{R_e + R_d + \frac{1}{C_b S}} \quad (2-13)$$

นำสมการ (2-12) และ (2-13) แทนลงใน (2-11)

$$\text{ฉะนั้น } U_e(s) = \frac{U_o(R_d R_e C_s C_b S + R_e C_s)}{R_d C_b S + R_e C_b S + R_e C_s S + R_d R_e C_s C_b S^2} \quad (2-14)$$

แรงดันที่จ่ายออกจากโวลต์จิกจาก  $U_e(s)$  ตามอัตราส่วนอิมพีแดนซ์จะได้

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

แทน  $U_e(s)$  ด้วยสมการ (2-14)

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งอาจเขียนได้ในรูปแบบต่างๆคือ

$$\begin{aligned} U(s) &= \frac{U_o}{K} \frac{1}{S^2 + B_1S + B_0} \\ &= \frac{U_o}{K} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \left[ \frac{1}{(S - \alpha_1)} - \frac{1}{(S - \alpha_2)} \right] \end{aligned} \tag{2-15}$$

เมื่อกำหนดให้

$$B_1 = \frac{R_dC_b + R_eC_s + R_eC_b}{R_dR_eC_bC_s} \tag{2-16}$$

$$B_0 = \frac{1}{R_dR_eC_bC_s} \tag{2-17}$$

$$K = R_dC_b \tag{2-18}$$

$\alpha_1, \alpha_2$  เป็นค่ารากที่สองของสมการ  $S^2 + B_1S + B_0 = 0$

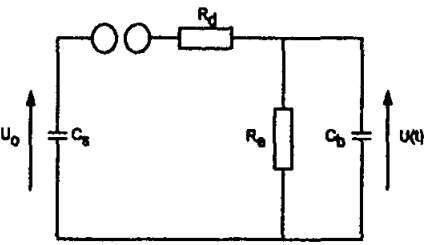
$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4B_0}}{2} \tag{2-19}$$

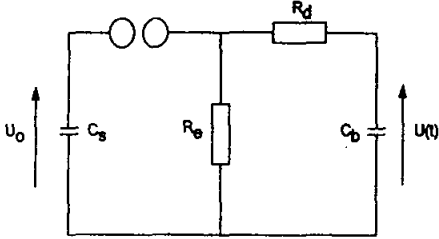
จึงเขียนค่าแรงดันอินพุตในเทอมของเวลาได้ดังนี้

$$u(t) = \frac{U_o}{K} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \{ e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t} \} \tag{2-20}$$

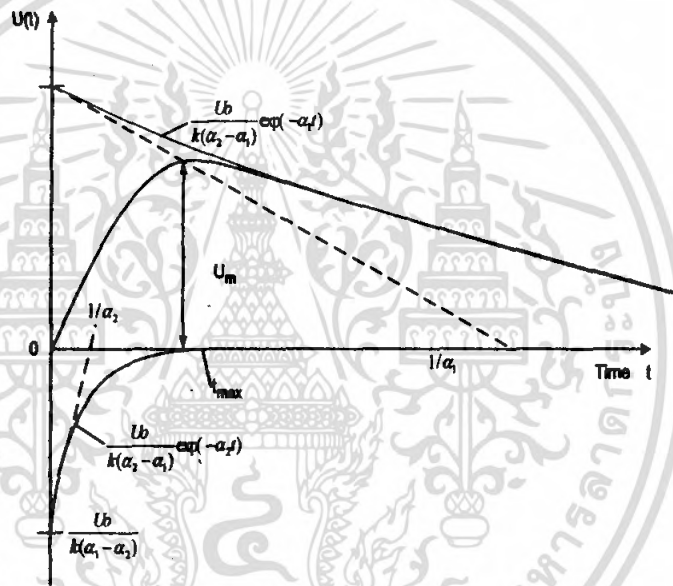
ค่าแฟกเตอร์  $B_1, B_0$  และ  $K$  สำหรับวงจร A และ B แสดงไว้ในตาราง 2-2

ตารางที่ 2-2  $B_1, B_0$  และ  $K$  สำหรับวงจร A และ B

|                                                                                     | $B_1$                                           | $B_0$                    | $K$      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|----------|
|  | $\frac{R_dC_s + R_eC_s + R_eC_b}{R_dR_eC_bC_s}$ | $\frac{1}{R_dR_eC_bC_s}$ | $R_dC_b$ |

|                                                                                   |                                                       |                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------|
|  | $\frac{R_d C_b + R_e C_b + R_e C_s}{R_d R_e C_b C_s}$ | $\frac{1}{R_d R_e C_b C_s}$ | $R_d C_b$ |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------|

จากสมการของแรงดันที่ได้จากวงจรอิมพัลส์จะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของแรงดันในเทอมของเวลา ประกอบด้วยเทอมเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม ซึ่งมีค่าคงตัวเวลา (Time constant) เท่ากับ  $1/\alpha_1$  และ  $1/\alpha_2$  ดังรูป 2-9



รูปที่ 2-9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม

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

$$T_1 = k_2 / \alpha_2 \quad (2-21)$$

$$T_2 = k_1 / \alpha_1 \quad (2-22)$$

กรณีของรูปคลื่น 1.2/50  $\mu s$  ค่าคงตัวจะมีค่า

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

$$1/\alpha_1 (\mu s) = 68.5, \quad 1/\alpha_2 = 0.405$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การคำนวณค่าองค์ประกอบวงจร การสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นใด กำหนดด้วยค่า  $T_1$  และ  $T_2$  ปกติเราจะเริ่มต้นมาจากค่าความจุไฟฟ้าของโหลด  $C_b$  ก่อนและเลือกตัวเก็บประจุอิมพัลส์  $C_s$  ให้สอดคล้องกับ  $C_b$  กล่าวคือ  $C_s$  เป็นตัวเก็บพลังงานได้มากพอที่จะจ่ายถ่ายเทให้กับโหลด ดังนั้นเมื่อทราบค่า  $C_b$  และ  $C_s$  แล้ว องค์ประกอบที่เหลือต้องคำนวณ คือ ความต้านทาน  $R_d$  และ  $R_e$  ซึ่งอาจหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าคงตัวเวลา

$$\begin{aligned} \alpha_1, \alpha_2 &= \sqrt{\frac{B_1}{2} \pm \left(\frac{B_1}{2}\right)^2 - B_0} \\ \text{จะได้ } \alpha_1 + \alpha_2 &= B_1 \\ \alpha_1 \alpha_2 &= B_0 \end{aligned}$$

จากค่า  $B_1$  และ  $B_0$  คำนวณหาค่า  $R_d$  และ  $R_e$  ได้คือ

#### วงจร A

$$R_e = \frac{1}{2(C_s + C_b)} \left\{ \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 C_b}} \right\} \quad (2-23)$$

$$R_d = \frac{1}{2C_s} \left\{ \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 C_b}} \right\} \quad (2-24)$$

#### วงจร B

$$R_e = \frac{1}{2(C_s + C_b)} \left\{ \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 C_s}} \right\} \quad (2-25)$$

$$R_d = \frac{1}{2C_b} \left\{ \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 C_s}} \right\} \quad (2-26)$$

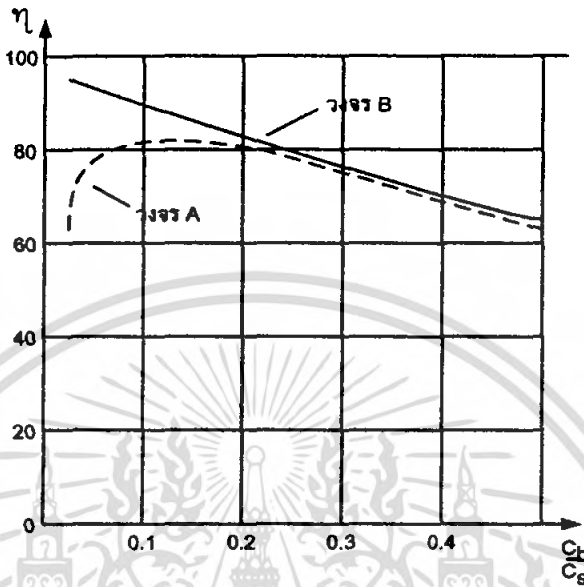
2.4.3 ประสิทธิภาพของวงจร  $\eta$  เมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพของวงจรหรือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ หมายถึง อัตราส่วนค่ายอดของแรงดันที่สร้างขึ้นออกมาได้ ต่อค่าแรงดันอัดประจุ ปกติจะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอทั้งวงจร A หรือวงจร B

$$\eta = U_m / U_0 < 1 \quad (2-27)$$

เมื่อ  $U_m$  คือ ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์  $u(t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$U_0$  คือ แรงดันอัดประจุให้กับ  $C_s$   
ในกรณีแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (1.2/50  $\mu s$ ) ประสิทธิภาพของวงจรอิมพัลส์ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า  $C_b$  และ  $C_s$  มีค่าดังรูป 2-10



รูป 2-10 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

2.4.4 การคำนวณหาค่าช่วงเวลาหน้าคลื่นและช่วงเวลาหางคลื่น  $T_1$  และ  $T_2$  ในกรณีที่ทราบค่าองค์ประกอบต่างๆ ของวงจรอิมพัลส์ ถ้าจำเป็นต้องการทราบค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและช่วงหางคลื่น อาจคำนวณค่าโดยประมาณได้จากค่าดังแสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 เวลา  $T_1$ ,  $T_2$  และประสิทธิภาพของวงจร A และ B

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

การคำนวณที่กล่าวแล้วข้างต้นนั้น ถือว่าวงจรที่ใช้คำนวณ ไม่มีค่าความเหนี่ยวนำ ในทางปฏิบัติรูปคลื่นที่ได้มักจะแตกต่างไปจากค่าทฤษฎี โดยเฉพาะค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ายอดของแรงดัน ทั้งนี้ เนื่องจากในวงจรมีความเหนี่ยวนำซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ อาจทำให้เกิดการแกว่งบริเวณยอดคลื่นขึ้นได้ ดังนั้น ความต้านทานปรับหน้าคลื่น  $R_d$  ต้องมีค่ามากกว่าวิกฤตของวงจร ดังสมการ

$$R_d \geq k \sqrt{\frac{L(C_s + C_b)}{C_s C_b}} \quad \text{โดย } k = 2 \text{ ถึง } 4 \quad (2-28)$$

## 2.5 การวัดแรงดันอิมพัลส์

การวัดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้กันอยู่ในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงทั่วไปมีอยู่ 2 วิธีคือ

- 1) วัดด้วยแกปทรงกลม
- 2) วัดด้วยระบบโวลเตจติไวเคอร์

2.5.1 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลม หลักการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลม ก็ปฏิบัติเช่นเดียวกับการวัดแรงดันกระแสสลับและแรงดันกระแสตรง กล่าวคือ ค่าแรงดันเบรกดาว์นของแกปทรงกลมนั้น ขึ้นอยู่กับระยะแกปของทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม และสภาวะอากาศรอบๆ ทรงกลมการเกิดเบรกดาว์นอย่างสมบูรณ์ในช่องแกปที่เป็นอากาศ ใช้เวลาเพียงไม่กี่ไมโครวินาที ฉะนั้นในกรณีของแรงดันกระแสสลับ ช่วงเวลาของแรงดันที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีผลนัยสำคัญต่อค่าแรงดันเบรกดาว์น  $U_b$  เบรกดาว์นจะเกิดเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าหนึ่ง คือ  $E_b$  แต่ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์ ช่วงเวลาของแรงดันจะมีความสำคัญต่อการเกิดเบรกดาว์น หรือค่าแรงดันเบรกดาว์น ผลของเวลาดังกล่าวอาจอธิบายได้ด้วยเรื่องเวลาล่าช้า (time lag) ของการเกิดเบรกดาว์นของก๊าซด้วยแรงดันอิมพัลส์

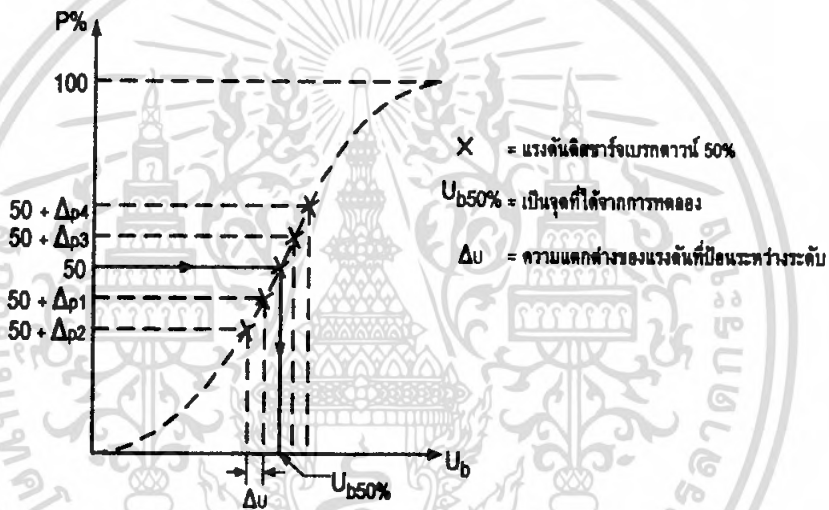
วิธีการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลม มีความแตกต่างที่สำคัญจากการวัดแรงดันกระแสตรง และแรงดันกระแสสลับ ก็คือ การวัดแรงดันอิมพัลส์นั้นไม่สามารถใช้วิธีค่อยๆ เพิ่มแรงดันสูงขึ้นจนกระทั่งการเกิดเบรกดาว์น หากแต่ต้องใช้อัตราการเพิ่มสูงให้กับตัวเก็บประจุแรงสูงของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ให้ได้แรงดันอัตราที่ความต้องการก่อน แล้วจึงปล่อยดิสชาร์จออกไปที่แกปทรงกลม ซึ่งอาจเกิดเบรกดาว์นหรือไม่เกิดก็ได้ ทั้งๆ ที่แรงดันสูงมากพอ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็น (probability) และขนาดแรงดัน ถ้าแรงดันอัตราต่ำเกินไป ก็จะไม่เกิดเบรกดาว์นที่แกปทรงกลมวัดแรงดัน แต่ถ้าแรงดันอัตราเพิ่มสูงขึ้นมากพอ ก็จะทำให้มีโอกาสเกิดเบรกดาว์นมากขึ้น และถ้าแรงดันอัตราสูงมากเกินไป ก็จะเกิดเบรกดาว์นทุกครั้งที่คายประจุออกไป ด้วยเหตุนี้เองการวัดแรงดันอิมพัลส์จึงกำหนดเป็นค่าแรงดันเบรกดาว์น 50% คือ  $U_{50\%}$  อันหมายถึงค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ค่าปานกลาง บางทีก็เรียกว่า ค่าอิมพัลส์วิกฤต (Critical impulse) ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่ทำให้จำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาว์นที่แกปของทรงกลม เป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ดิสชาร์จออกไป ฉะนั้นการหาค่า  $U_{50\%}$  จึงหาได้โดยวิธีการคายประจุออกไปเป็นจำนวนหลายๆ ครั้ง จนกระทั่งจำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาว์นเป็นจำนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่คิซซาร์จออกไป เช่น คิซซาร์จ 10 ครั้ง แล้วเกิดเบรกคาวนที่แกปทรงกลม 5 ครั้ง ค่าแรงดันนั้นก็คือ  $U_{b50\%}$  แต่การที่จะอัดประจุให้ได้แรงดันอัดประจุพอดีที่จะทำให้ได้ค่าแรงดันเบรกคาวน 50% พอดีนั้นทำได้ยากและเสียเวลา

การวัดค่าแรงดัน  $U_{b50\%}$  โดยทั่วไปวัดได้ 2 วิธี คือวิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ (Multiple level voltage method) และวิธีปรับขึ้นลง (Up and down method)

1) วิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ เป็นวิธีหาค่า  $U_{b50\%}$  ด้วยเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ ของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเบรกคาวนกับค่าแรงดัน ป้อนแรงดันอย่างน้อย 10 ครั้งที่แรงดันแต่ละค่า หรือแต่ละระดับต่างกัน  $\Delta U$  น้อยกว่า 3% ของค่าแรงดันเบรกคาวน 50% ที่คาดหมาย ทดลองแรงดันหลายระดับที่สูงกว่า และที่ต่ำกว่าค่าที่ทำให้เกิดเบรกคาวน 50% จากเส้นกราฟนี้จะหาค่าแรงดันคิซซาร์จ 50% ได้ดังรูปที่ 2-11



รูป 2-11 เส้นกราฟใช้หาแรงดันคิซซาร์จเบรกคาวน 50%

2) วิธีปรับขึ้นลง เป็นวิธีหาค่าแรงดันคิซซาร์จเบรกคาวน 50% โดยการเริ่มต้นเลือกแรงดันค่าหนึ่ง  $U_k$  ที่คาดว่าจะจะเป็นค่าแรงดันเบรกคาวน 50% ป้อนเข้าไปที่แกปทรงกลม ถ้าหากไม่เกิดเบรกคาวนที่แกปทรงกลมให้เพิ่มแรงดันขึ้น  $\Delta U$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 3% ของแรงดันคิซซาร์จ 50% จึงป้อนแรงดันใหม่ด้วยค่า  $U_k + \Delta U$  แต่ถ้าเกิดเบรกคาวนที่แกปทรงกลมที่แรงดัน  $U_k$  ก็ให้ลดแรงดันเหลือเพียง  $U_k - \Delta U$  ฉะนั้นค่าแรงดันที่ป้อนต่อไป จะขึ้นอยู่กับผลที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันครั้งที่ผ่านมา ปฏิบัติต่อเนื่องกันเช่นนี้จนกระทั่งมีจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันมากพอ จะหาค่าแรงดันคิซซาร์จเบรกคาวน 50% ได้จากสมการ

$$U_{50\%} = \frac{\sum n_i U_i}{\sum n_i} \quad (2-29)$$

โดยที่  $n_i$  คือ จำนวนครั้งที่ที่ป้อนแรงดันที่ระดับแรงดัน  $U_i$   
และ  $\sum n_i$  คือ ผลรวมจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดัน ควรจะ  $> 20$

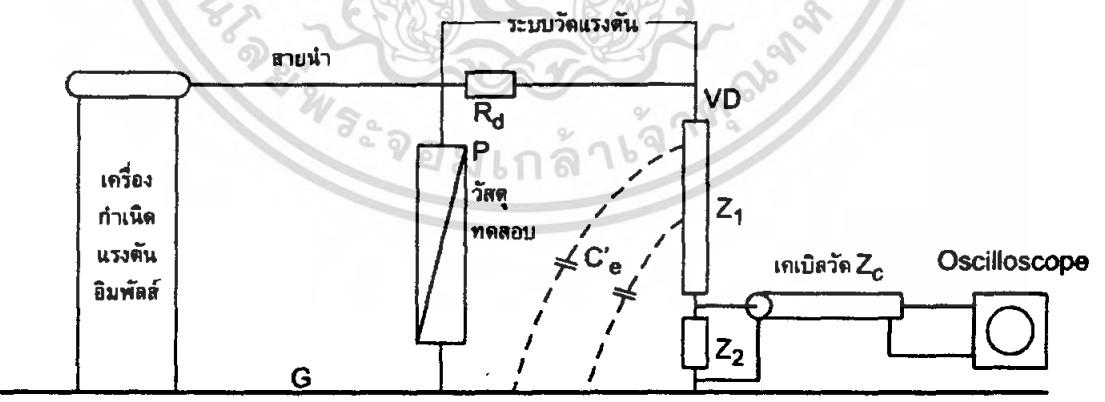
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแรงดันเบรกคาว์อิมพัลส์ 50% วัดที่สภาพอากาศของห้องที่มีใช้สภาวะมาตรฐาน เมื่อจะเทียบกับค่ามาตรฐานในตาราง ต้องแก้ด้วยตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นของอากาศ  $k_d$  เช่นเดียวกับการวัดแรงดันกระแสสลับ หรือกระแสตรง

2.5.2 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจติไวเตอร์ การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรนกลมนั้น ทราบแต่ค่ายอดเท่านั้น แต่ไม่ทราบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตามเวลา คือรูปคลื่นแรงดัน ซึ่งจำเป็นต้องทำการวัด และมีทางทำได้ โดยใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) หรือเครื่องบันทึกแรงดันอิมพัลส์ ประกอบเข้ากับโวลเตจติไวเตอร์ ถ้าแรงดันที่วัดมีค่ายังสูงไม่มากนัก คือ ต่ำกว่า 100 kV เทคนิคการวัดก็ไม่ยุ่งยากอะไร เมื่อแรงดันเพิ่มสูงมากขึ้นเทคนิคและปัญหาการวัดก็มีมากขึ้นตามขนาดแรงดันที่วัด ยิ่งในปัจจุบันนี้มีการสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าสูงหลายล้านโวลต์ เมื่อสร้างขึ้นมากก็ต้องการวิธีวัดให้ได้

การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยระบบโวลเตจติไวเตอร์ โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 4 ส่วนด้วยกันคือ สายตัวนำแรงสูง ตัวติไวเตอร์  $Z_1, Z_2$  สูงประมาณ 2.5 m/MV เคเบิลวัดแบบแกนร่วม  $Z_c$  และออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ดังในรูปที่ 2-12 ซึ่งจะมีองค์ประกอบในการวัดแรงดันดังนี้

1) ตัวความต้านทานหน่วง  $R_d$  ทำหน้าที่หน่วงการแกว่งในภาวะทรานเซียนต์ ที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำของสายตัวนำกับค่าเก็บประจุของโวลเตจติไวเตอร์ ตัวความต้านทานหน่วงที่ใช้เป็นแบบไร้ความเหนี่ยวนำ โดยอาจต่อที่ต้นสายตัวนำ หรือที่อิเล็กทรอนิกส์แรงสูงของโวลเตจติไวเตอร์ ในกรณีที่สายตัวนำมีความยาวมาก การต่อความต้านทานหน่วงที่ต้นสายตัวนำ โดยให้มีค่าประมาณเท่ากับค่าเสรีจอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำ จะช่วยหน่วงการแกว่งที่เกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ ที่ไม่เท่ากันของสายตัวนำกับวงจรกำเนิดแรงดัน และโวลเตจติไวเตอร์



รูปที่ 2-12 องค์ประกอบในระบบวัดแรงดัน

2) สายตัวนำระหว่างวัสดุทดสอบกับโวลเตจติไวเตอร์ โดยทั่วไปโวลเตจติไวเตอร์จะต้องอยู่ห่างจากอุปกรณ์ทดสอบ ความยาวของสายตัวนำจะต้องมีความยาวอย่างน้อยเท่ากับค่าของโวลเตจติไวเตอร์ เพื่อลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่มีต่อโวลเตจติไวเตอร์ ขนาดของสายตัวนำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนำควรจะต้องมีขนาดโคพอที่จะไม่ทำให้เกิดโคโรนา ซึ่งเป็นคลื่นรบกวนต่อระบบวัดแรงดันได้ ในวงจรทดสอบทั่วไปสายตัวนำมักอยู่ในระดับ เวลาคลื่นเดินทาง  $\tau_L$  จะมีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วแสง  $c$  โดยประมาณจากสูตร  $Z_L = \sqrt{L_L/C_L}$  และ  $\tau_L = \sqrt{L_L C_L} = \ell/c$  โดย  $L_L$  คือความต้านทานเหนี่ยวนำ  $C_L$  คือค่าเก็บประจุและ  $\ell$  คือความยาวของสายตัวนำ ตามลำดับ ดังนั้น จะได้  $Z_L = \ell/(cC_L)$  ค่าเก็บประจุของสายตัวนำสามารถคำนวณได้ โดยสมมุติว่า สายตัวนำเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d$  วางอยู่สูง  $H$  เหนือระนาบดิน สมการหาค่าเก็บประจุของสายตัวนำคือ

$$C_L = \frac{2\pi\epsilon_0\ell}{B} \quad (2-30)$$

$$\text{โดยที่ } B = \ln\left(\frac{4H}{d}\right) - \ln\frac{1}{2}\left(1 + \sqrt{1 + 2(H/\ell)^2}\right) \quad (2-31)$$

เนื่องจาก  $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$  เมื่อ  $\mu_0$  คือค่าเพอร์มิบิลิตี (Permeability) และ  $\epsilon_0$  คือค่าเพอร์มิตติวิตี (Permittivity) ของสูญญากาศ ตามลำดับ ดังนั้น จะได้ค่าเสถียรจิมพีแค้นซ์ของสายตัวนำเป็น

$$(Z_L)_{hor} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} B \approx 60B(\ell, d, H) \Omega \quad (2-32)$$

3) โวลเตจดีไวเคอร์ VD ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันสูงลงมา ให้มีขนาดอยู่ในย่านที่อุปกรณ์วัดในภาคแรงต่ำสามารถวัดได้

4) เกเบิลวัด  $Z_c$  ทำหน้าที่ส่งสัญญาณจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเคอร์มายังอุปกรณ์วัดเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน และลดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปเป็นแบบแกนร่วม (coaxial cable) ที่มีการลดทอนสัญญาณต่ำ

5) อุปกรณ์วัดและบันทึกรูปคลื่น อาจเป็นโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอดหรือออสซิลโลสโคป หรือ เครื่องบันทึกอิมพัลส์ อุปกรณ์เหล่านี้จะอยู่ในห้องที่มีชิลด์ เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก

6) ระบบสายดิน G ทำหน้าที่เชื่อมต่อจุดลงดินของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบทดสอบให้มีความศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน ปกติสายดินจะเป็นชนิดที่มีความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้แรงดันตกในสายดินมีค่าน้อยที่สุด โดยทั่วไปจะใช้แผ่นโลหะบาง เช่น ทองแดงแผ่นบาง

## บทที่ 3

### การออกแบบ และประกอบสร้าง

#### 3.1 การออกแบบวงจรชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์ที่ถูกสร้างขึ้นโดยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นั้น ควรจะต้องกำหนดหรือควบคุมได้ ทั้งนี้เพื่อให้แรงดันที่ป้อนเข้าไปที่วัสดุทดสอบหลายครั้งมีค่าคงที่ การควบคุมแรงดันนั้นสามารถทำได้โดยการใช้ชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เป็นตัวช่วยในการเริ่มเกิดคายประจุที่สปาร์กแกปของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยบังคับจากระยะไกล ซึ่งการใช้ชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (Trigatron) เป็นตัวจุดชนวนนั้น จะทำให้เกิดการสปาร์กตามที่กำหนด และช่วยลดการกระจัดกระจายแรงดันจ่ายออก นั่นคือจะทำให้แรงดันทดสอบมีค่าที่ต้องการ

วงจรชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ที่ได้ทำการออกแบบ ประกอบด้วย 3 วงจรหลัก คือ วงจรกำเนิดแรงดันสูง วงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ และวงจรทวีแรงดัน

##### 3.1.1 การออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันสูง

วงจรกำเนิดแรงดันสูง ดังรูปที่ 3-1 จะประกอบด้วย แกนเหล็กเฟอไรต์ความถี่สูง ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำซึ่งเป็นขดลวด 2 ชุด คือขดลวดป้อนแรงดันเข้าเป็นด้านแรงดันต่ำกว่าอีกด้านหนึ่งที่เป็นขดลวดจ่ายแรงดันออกซึ่งเป็นขดลวดแรงสูง ขดลวดทั้งสองถ่ายทอดพลังงานทางสนามแม่เหล็กผ่านทางแกนเฟอไรต์ ขดลวดทางด้านป้อนแรงดันเข้า  $L_1$  จะต่อขนานกับตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทางด้านแรงสูงจะมีขดลวดแรงสูง  $L_2$  จากรูปที่ 3-1 เมื่อ  $C_1$  ได้รับการอัดประจุจากวงจรทวีแรงดันจนได้แรงดันตามต้องการแล้ว และเมื่อได้รับคำสั่งจากชุดวงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นชุดสั่งให้เริ่มการทำงาน พลังงานที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุ  $C_1$  ในรูปสนามไฟฟ้า ก็จะถ่ายเทประจุให้กับขดลวด  $L_1$  และขดลวด  $L_1$  จะเก็บพลังงานในรูปสนามแม่เหล็กจนเต็มที่แล้ว  $L_1$  ก็จะถ่ายทอดพลังงานกลับมาให้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ใหม่ การถ่ายทอดพลังงานไปมาระหว่าง  $C_1$  กับ  $L_1$  จึงทำให้เกิดการแกว่ง(Oscillation)ขึ้น จะมีรูปคลื่นเป็นขบวนหน่วง(Damped train wave)ดังรูปแสดงผลในส่วนของผลการทดลองบทที่ 4 ซึ่งกระแสดจากการแกว่ง (Oscillation) ทางด้านแรงต่ำจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นทางด้านแรงสูง

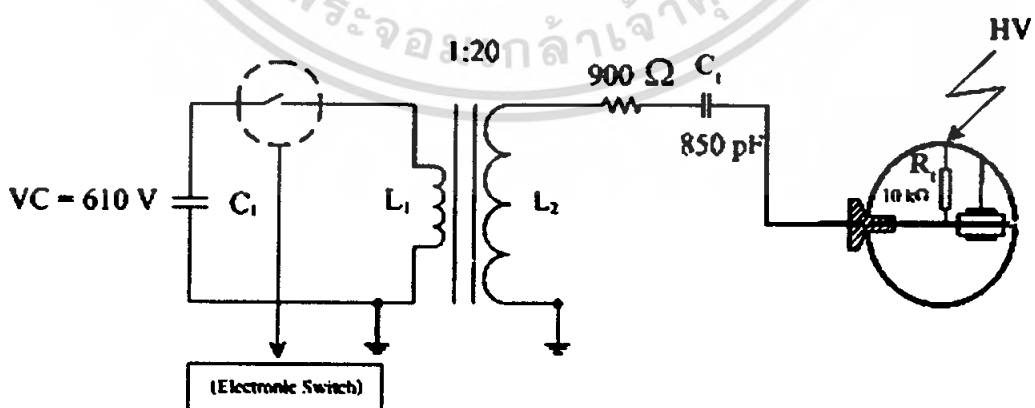
ชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์(trigatron) สามารถนำไปใช้ติดตั้งได้ทั้งสปาร์กแกปด้านแรงสูงและด้านกราวด์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งข้อแตกต่างระหว่างการมีชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์อยู่ที่ศักย์ไฟฟ้าต่างกันคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีที่เมื่อต่อชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เข้าที่ด้านแรงสูง ต้องมีความต้านทาน  $R_i$  ดังรูปที่ 3-1 ก. ความต้านทาน  $R_i$  จะมีค่าเท่ากับ  $10\text{ k}\Omega$  เพื่อใช้ในการชาร์จตัวเก็บประจุ  $C_i$  (trigatron capacitor) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $850\text{ pF}$  ซึ่งจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าของทริกาตรอนอิเล็กทรอนิกส์มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับช่องสปาร์กแกปทรงกลม ทำให้สามารถควบคุมการสปาร์กที่ช่องสปาร์กอากาศช่วยได้ แต่ถ้าไม่มีความต้านทาน  $R_i$  เมื่อทำการชาร์จตัวเก็บประจุ  $C_i$  (ตัวเก็บประจุอิมพัลส์) จนสูงมากพอ จะทำให้เกิดการสปาร์กที่ช่องสปาร์กอากาศช่วยเหลือ โดยที่เรายังไม่ได้เริ่มสั่งการทำงานของชุดทริกาตรอน และแรงดันชาร์จยังไม่ถึงค่าที่ต้องการ ( $U_0$ )

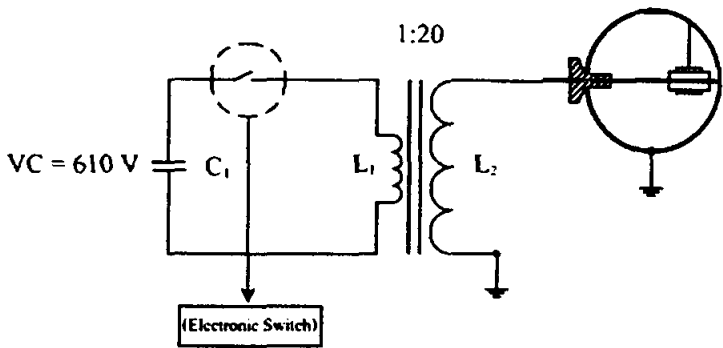
- กรณีเมื่อต่อชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เข้าที่ด้านกราวด์ ดังรูปที่ 3-1 ข. ไม่จำเป็นต้องมีความต้านทาน  $R_i$  และตัวเก็บประจุ  $C_i$  ทั้งนี้เนื่องจากก่อนการสั่งชุดทริกาตรอนให้ทำงาน สปาร์กแกปทรงกลมจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์โวลต์ แต่เมื่อเราสั่งให้ชุดทริกาตรอนทำงาน จะทำให้มีค่าแรงดันสัญญาณพัลส์ของชุดทริกาตรอนเท่ากับ  $12\text{ kV}$  ทำให้มีความต่างศักย์เกิดขึ้นระหว่างทริกาตรอนอิเล็กทรอนิกส์และสปาร์กแกปทรงกลม จึงสามารถทำให้มีการสปาร์กที่ช่องอากาศช่วยได้ แต่จะต้องมีการกลับขั้วสัญญาณพัลส์ของชุดทริกาตรอนเพื่อทำให้เกิดการโอโอในเซชันระหว่างสปาร์กแกปทรงกลมทั้ง 2 ด้าน กล่าวคือ ถ้ายิ่งแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก จะต้องกลับขั้วสัญญาณพัลส์ของชุดทริกาตรอนเป็นขั้วลบ และถ้ายิ่งแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ จะต้องกลับขั้วสัญญาณพัลส์ของชุดทริกาตรอนให้เป็นขั้วบวกเช่นกัน

การกลับขั้วสัญญาณพัลส์ของชุดทริกาตรอน ทำได้โดยการพันขดลวด  $L_1$  จำนวน 2 ขดให้สวนทางกัน จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งสวนทางกัน จากนั้นเส้นทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่ต่างกัน จะทำให้สามารถเลือกต่อเข้ากับขดลวด  $L_1$  ขดใดขดหนึ่งเพื่อเลือกจะให้สัญญาณพัลส์เป็นขั้วบวกหรือขั้วลบ



ก) เมื่อต่อชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เข้าที่ด้านแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) เมื่อต่อชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เข้าที่ด้านกราวด์

รูปที่ 3-1 วงจรกำเนิดแรงดันสูง

ในขั้นต้นเราจะกำหนดคุณสมบัติของชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันสูงของชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ค่ายอดแรงดันของสัญญาณพัลส์ 12 kV
- ช่วง 1 คาบเวลาของสัญญาณพัลส์ 1  $\mu$ s
- ตัวเก็บประจุพลังงาน C<sub>1</sub> 2  $\mu$ F
- แรงดันอัดประจุ C<sub>1</sub> 610 V
- อัตราส่วนหม้อแปลงประมาณ 1:20

แรงดันที่เกิดขึ้นนั้นจะต้องมีหน้าคลื่นที่ไวพอ โดยเลือกที่ 250 ns ซึ่ง 1 คาบเวลาการแกว่งเป็น 1  $\mu$ s ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างตัวเก็บประจุ C<sub>1</sub> และตัวเหนี่ยวนำ L<sub>1</sub> ซึ่งเลือกค่า C<sub>1</sub> = 2  $\mu$ F สามารถคำนวณค่า L<sub>1</sub> ได้ตามสมการที่ 3-1

$$L_1 = \frac{1}{C_1} \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2 \tag{3-1}$$

ได้ค่า L<sub>1</sub> = 12.66 nH โดยเลือกอัตราส่วนหม้อแปลง ประมาณ 1:20 เนื่องจากวงจรทวีแรงดันที่แปลงไฟด้านขาเข้าประมาณ 610 V และต้องการแรงดันออกประมาณ 12 kV ฉะนั้นจึงกำหนดให้จำนวนรอบของขดลวดด้านแรงดันต่ำเท่ากับ 1 รอบ จำนวนรอบด้านแรงดันสูงอยู่ที่ 30 รอบ ผลการทดสอบจริงจะให้ค่ายอดรูปคลื่นเต็ม ดังแสดงผลในส่วนของการทดลอง แต่ในความเป็นจริงแล้วแรงดันที่ใช้ในการเกิดสปาร์กที่แกปช่วยจะยังไม่ทันถึง 12 kV นั่นคือเวลาที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ในการสปาร์กแกปนั้นจะไม่ถึง 1 คาบด้วยเช่นกัน ดังแสดงผลในส่วนของการทดลอง  
เช่นเดียวกัน

จากสมการ

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

(3-2)

- L
- =
- ค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า
- N
- =
- จำนวนรอบขดลวด
- $\mu$
- =
- ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแกนเหล็ก
- $A_c$
- =
- พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก
- $l_c$
- =
- ความยาวเฉลี่ยของแกนเหล็ก

กำหนดให้

$$K = \frac{\mu A_c}{l_c}$$

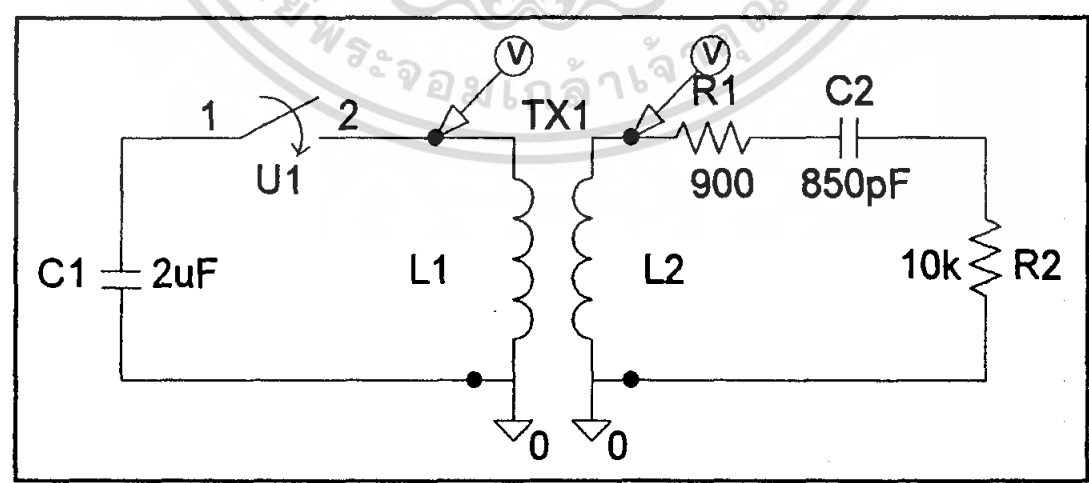
(3-3)

ให้ K เป็นค่าคงที่ เพราะฉะนั้น

$$L \propto KN^2$$

(3-4)

จากสมการที่ (3-4) จะเห็นว่าค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับกำลังสอง  
ของจำนวนรอบขดลวด ดังนั้น จากค่า  $L_1 = 12.66 \text{ nH}$  ที่จำนวนรอบดัดแรงต่ำ 1 รอบ และเมื่อ  
เทียบกับจำนวนรอบดัดแรงสูงที่ 30 รอบ จะได้ค่า  $L_2 = 11.4 \text{ }\mu\text{H}$  จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์  
ต่างๆทางไฟฟ้ามาทำการจำลองแบบวงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามวงจรในรูปที่ 3-2 โดย  
กำหนดให้แรงดันอัดประจุ  $C_1$  มีค่าเท่ากับแรงดันพิกัดคือ 610 V ผลการจำลองด้วยโปรแกรม  
คอมพิวเตอร์แสดงผลในส่วนของการทดลองบทที่ 4



รูปที่ 3-2 วงจรที่ใช้ในการจำลองสร้างรูปคลื่นสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิด  
แรงดันอิมพัลส์

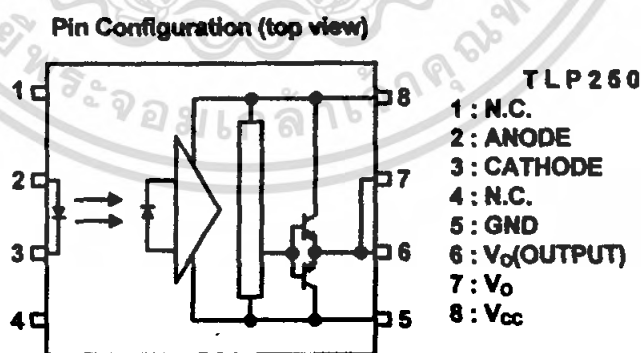
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 การออกแบบวงจรชุดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์

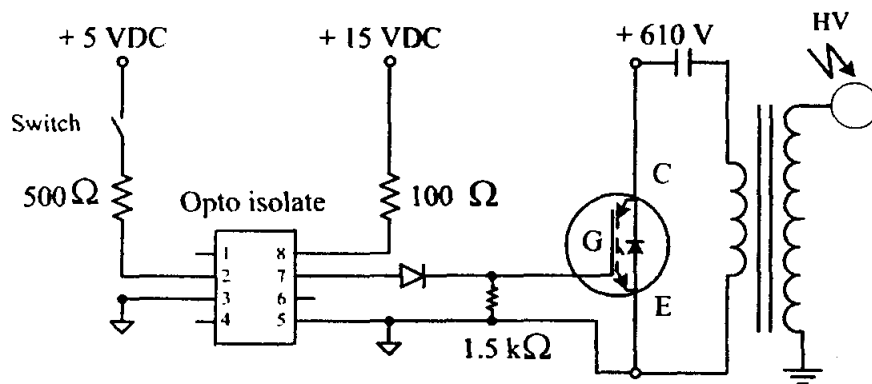
IGBT ในวงจรชุดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิด-ปิดวงจร โดยจะต้องได้รับคำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ก่อนจึงจะทำงาน และเมื่อ IGBT ทำการปิดวงจรจะทำให้มีการถ่ายเทพลังงานจากตัวเก็บประจุที่อัดประจุไฟฟ้าไปยังตัวเหนี่ยวนำผ่านทางหม้อแปลงความถี่สูง

การควบคุมการเปิด-ปิดวงจรของ IGBT จะใช้หลักการควบคุมแรงดันระหว่างขาเกต (Gate) กับขาอีมิเตอร์ (Emitter) การเปิดปิดวงจรของ IGBT จะรวดเร็วมาก สังเกตได้จากพารามิเตอร์  $t_{d(on)}$ ,  $t_{d(off)}$ ,  $t_r$  และ  $t_f$  ในตารางที่ 3-1 อยู่ในช่วงเวลา 30-120 ns อย่างไรก็ตาม การเปิด-ปิดวงจรของ IGBT อาจเป็นไปได้ช้า เนื่องจากประจุที่ค้างอยู่ระหว่างขาเกต กับขาอีมิเตอร์ เราสามารถแก้ไขปัญหานี้ ได้โดยการต่อความต้านทานขนาด  $1.5\text{ k}\Omega$  เพื่อใช้คายประจุที่ค้างอยู่ระหว่างขาเกต และขาอีมิเตอร์ ทำให้การเปิดวงจรทำได้เร็วขึ้น

โดยจะใช้วงจรแยกทางแสง (Opto isolate) ในการควบคุม IGBT ซึ่งจะใช้ IC เบอร์ TLP250 เป็นตัวสร้างพัลส์ไปที่ขาเกตของ IGBT ซึ่งมีการทำงานดังนี้ เมื่อไม่มีกระแสไบอัสไหล LED ในขาที่ 2 และขาที่ 3 จะทำให้แรงดันระหว่างขาที่ 7 กับขาที่ 5 มีค่าเป็น 0 V แต่เมื่อมีกระแสไบอัสเข้ามาที่ขา 2 และ ขาที่ 3 จนทำให้หลอด LED เปล่งแสง จะทำให้ขาที่ 7 และขาที่ 8 เสมือนลัดวงจรถึงกัน ทำให้มีแรงดันตกคร่อมระหว่างขาที่ 7 กับขาที่ 5 ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมระหว่างขาที่ 8 กับขาที่ 5 การทำงานของ IC เบอร์ TLP250 จึงเสมือนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่ควบคุมได้ คุณสมบัติทางไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 3-2 ความต้านทาน  $500\ \Omega$  จะจำกัดกระแสไบอัสของหลอด LED ไม่ให้สูงเกินไป ค่าความต้านทาน  $100\ \Omega$  เป็นค่าความต้านทานขาออกเพื่อช่วยให้แรงดันตกคร่อมระหว่างขาเกต กับขาอีมิเตอร์ มีค่าสูงพอที่จะสั่งให้ IGBT ทำงานได้ วงจรชุดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ดังรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-3 วงจรภายใน IC เบอร์ TLP250



รูปที่ 3-4 วงจรชุดสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์

Electrical Characteristics @ T<sub>J</sub> = 25°C (unless otherwise specified)

|                                        | Parameter                                | Min. | Typ. | Max. | Units | Conditions                                                                          |
|----------------------------------------|------------------------------------------|------|------|------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| V <sub>(BR)CES</sub>                   | Collector-to-Emitter Breakdown Voltage   | 600  | ---- | ---- | V     | V <sub>GE</sub> = 0V, I <sub>C</sub> = 250μA                                        |
| V <sub>(BR)ECS</sub>                   | Emitter-to-Collector Breakdown Voltage @ | 18   | ---- | ---- | V     | V <sub>GE</sub> = 0V, I <sub>C</sub> = 1.0A                                         |
| ΔV <sub>(BR)CES</sub> /ΔT <sub>J</sub> | Temperature Coeff. of Breakdown Voltage  | ---- | 0.60 | ---- | V/°C  | V <sub>GE</sub> = 0V, I <sub>C</sub> = 1.0mA                                        |
| V <sub>CE(ON)</sub>                    | Collector-to-Emitter Saturation Voltage  | ---- | 1.65 | 2.0  | V     | I <sub>C</sub> = 27A, V <sub>GE</sub> = 15V<br>I <sub>C</sub> = 55A<br>See Fig.2, 5 |
| V <sub>GE(th)</sub>                    | Gate Threshold Voltage                   | 3.0  | ---- | 6.0  | V     | I <sub>C</sub> = 27A, T <sub>J</sub> = 150°C                                        |
| ΔV <sub>GE(th)</sub> /ΔT <sub>J</sub>  | Temperature Coeff. of Threshold Voltage  | ---- | -13  | ---- | mV/°C | V <sub>CE</sub> = V <sub>GE</sub> , I <sub>C</sub> = 250μA                          |
| g <sub>fs</sub>                        | Forward Transconductance @               | 18   | 24   | ---- | S     | V <sub>CE</sub> ≥ 15V, I <sub>C</sub> = 27A                                         |
| I <sub>CES</sub>                       | Zero Gate Voltage Collector Current      | ---- | ---- | 250  | μA    | V <sub>GE</sub> = 0V, V <sub>CE</sub> = 600V                                        |
|                                        |                                          | ---- | ---- | 2.0  | μA    | V <sub>GE</sub> = 0V, V <sub>CE</sub> = 10V, T <sub>J</sub> = 25°C                  |
|                                        |                                          | ---- | ---- | 5000 | μA    | V <sub>GE</sub> = 0V, V <sub>CE</sub> = 600V, T <sub>J</sub> = 150°C                |
| I <sub>ges</sub>                       | Gate-to-Emitter Leakage Current          | ---- | ---- | ±100 | nA    | V <sub>GE</sub> = ±20V                                                              |

Switching Characteristics @ T<sub>J</sub> = 25°C (unless otherwise specified)

|                     | Parameter                         | Min. | Typ. | Max. | Units | Conditions                                   |
|---------------------|-----------------------------------|------|------|------|-------|----------------------------------------------|
| Q <sub>g</sub>      | Total Gate Charge (turn-on)       | ---- | 180  | 270  | nC    | I <sub>C</sub> = 27A                         |
| Q <sub>ge</sub>     | Gate - Emitter Charge (turn-on)   | ---- | 25   | 38   | nC    | V <sub>CC</sub> = 400V<br>See Fig. 8         |
| Q <sub>gc</sub>     | Gate - Collector Charge (turn-on) | ---- | 61   | 90   | nC    | V <sub>GE</sub> = 15V                        |
| t <sub>d(on)</sub>  | Turn-On Delay Time                | ---- | 32   | ---- | ns    | T <sub>J</sub> = 25°C                        |
| t <sub>r</sub>      | Rise Time                         | ---- | 20   | ---- | ns    | I <sub>C</sub> = 27A, V <sub>CC</sub> = 480V |
| t <sub>d(off)</sub> | Turn-Off Delay Time               | ---- | 170  | 260  | ns    | V <sub>GE</sub> = 15V, R <sub>G</sub> = 5.0Ω |
| t <sub>f</sub>      | Fall Time                         | ---- | 88   | 130  | ns    | Energy losses include "tail"                 |
| E <sub>on</sub>     | Turn-On Switching Loss            | ---- | 0.12 | ---- | mJ    | See Fig. 10, 11, 13, 14                      |
| E <sub>off</sub>    | Turn-Off Switching Loss           | ---- | 0.54 | ---- | mJ    |                                              |
| E <sub>s</sub>      | Total Switching Loss              | ---- | 0.66 | 0.9  | mJ    |                                              |
| t <sub>d(on)</sub>  | Turn-On Delay Time                | ---- | 31   | ---- | ns    | T <sub>J</sub> = 150°C,                      |
| t <sub>r</sub>      | Rise Time                         | ---- | 23   | ---- | ns    | I <sub>C</sub> = 27A, V <sub>CC</sub> = 480V |
| t <sub>d(off)</sub> | Turn-Off Delay Time               | ---- | 230  | ---- | ns    | V <sub>GE</sub> = 15V, R <sub>G</sub> = 5.0Ω |
| t <sub>f</sub>      | Fall Time                         | ---- | 120  | ---- | ns    | Energy losses include "tail"                 |
| E <sub>s</sub>      | Total Switching Loss              | ---- | 1.6  | ---- | mJ    | See Fig. 13, 14                              |
| L <sub>E</sub>      | Internal Emitter Inductance       | ---- | 13   | ---- | nH    | Measured 5mm from package                    |
| C <sub>iss</sub>    | Input Capacitance                 | ---- | 4000 | ---- | pF    | V <sub>GE</sub> = 0V                         |
| C <sub>oss</sub>    | Output Capacitance                | ---- | 250  | ---- | pF    | V <sub>CC</sub> = 30V<br>See Fig. 7          |
| C <sub>res</sub>    | Reverse Transfer Capacitance      | ---- | 52   | ---- | pF    | f = 1.0MHz                                   |

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติการเปิดปิดวงจรของ IGBT เบอร์ IRG4PC50U

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

| CHARACTERISTIC                             |           | SYMBOL                    | TEST CIRCUIT | TEST CONDITION                                                                                 |                                                  | MIN                 | TYP.      | MAX   | UNIT          |
|--------------------------------------------|-----------|---------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------|-----------|-------|---------------|
| Input Forward Voltage                      |           | $V_F$                     | —            | $I_F = 10\text{ mA}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$                                                |                                                  | —                   | 1.6       | 1.8   | V             |
| Temperature Coefficient of Forward Voltage |           | $\Delta V_F / \Delta T_a$ | —            | $I_F = 10\text{ mA}$                                                                           |                                                  | —                   | -2.0      | —     | mV/°C         |
| Input Reverse Current                      |           | $I_R$                     | —            | $V_R = 5\text{ V}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$                                                  |                                                  | —                   | —         | 10    | $\mu\text{A}$ |
| Input Capacitance                          |           | $C_T$                     | —            | $V = 0.1 = 1\text{ MHz}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$                                            |                                                  | —                   | 45        | 250   | pF            |
| Output Current                             | 'H' Level | $I_{OH}$                  | 2            | $V_{CC} = 30\text{ V}$<br>(*)                                                                  | $I_L = 10\text{ mA}$<br>$V_{BE} = 4\text{ V}$    | -1.0                | -1.5      | —     | A             |
|                                            | 'L' Level | $I_{OL}$                  | 1            |                                                                                                | $I_L = 0$<br>$V_{BE} = 2.5\text{ V}$             | 1.0                 | 2         | —     |               |
| Output Voltage                             | 'H' Level | $V_{OH}$                  | 3            | $V_{CC} = +15\text{ V}$<br>$V_{EE} = -15\text{ V}$<br>$R_L = 200\Omega$ , $I_F = 5\text{ mA}$  |                                                  | 11                  | 12.8      | —     | V             |
|                                            | 'L' Level | $V_{OL}$                  | 4            | $V_{CC} = +15\text{ V}$<br>$V_{EE} = -15\text{ V}$<br>$R_L = 200\Omega$ , $V_F = 0.8\text{ V}$ |                                                  | —                   | -14.2     | -12.5 |               |
| Supply Current                             | 'H' Level | $I_{CO}$                  | —            | $V_{CC} = 30\text{ V}$                                                                         | $I_F = 10\text{ mA}$<br>$T_a = 25^\circ\text{C}$ | —                   | 7         | —     | mA            |
|                                            |           |                           |              |                                                                                                | $I_F = 10\text{ mA}$                             | —                   | —         | 11    |               |
|                                            | 'L' Level | $I_{CC}$                  | —            |                                                                                                | $I_F = 0\text{ mA}$<br>$T_a = 25^\circ\text{C}$  | —                   | 7.5       | —     | mA            |
|                                            |           |                           |              |                                                                                                | $I_F = 0\text{ mA}$                              | —                   | —         | 11    |               |
| Threshold Input Current                    | L→H       | $I_{IH}$                  | —            | $V_{CC} = +15\text{ V}$<br>$V_{EE} = -15\text{ V}$<br>$R_L = 200\Omega$ , $V_O > 0\text{ V}$   |                                                  | —                   | 1.2       | 5     | mA            |
| Threshold Input Voltage                    | H→L       | $V_{IL}$                  | —            | $V_{CC} = +15\text{ V}$<br>$V_{EE} = -15\text{ V}$<br>$R_L = 200\Omega$ , $V_O < 0\text{ V}$   |                                                  | 0.8                 | —         | —     | V             |
| Supply Voltage                             |           | $V_{CC}$                  | —            | —                                                                                              |                                                  | 10                  | —         | 35    | V             |
| Capacitance (Input-Output)                 |           | $C_s$                     | —            | $V_s = 0.1 = 1\text{ MHz}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$                                          |                                                  | —                   | 1.0       | 2.0   | pF            |
| Resistance (Input-Output)                  |           | $R_s$                     | —            | $V_s = 500\text{ V}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$<br>R.H. $\leq 60\%$                            |                                                  | $1 \times 10^{-12}$ | $10^{14}$ | —     | $\Omega$      |

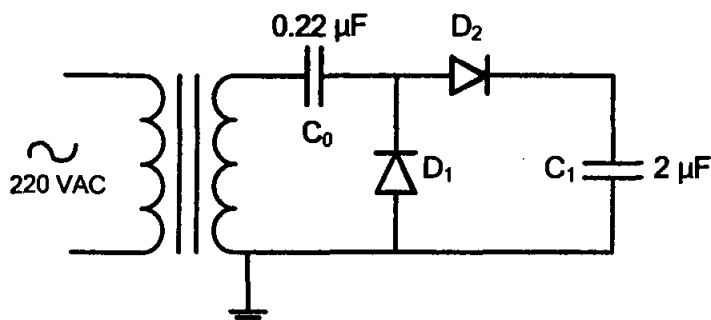
(\*) : All typical values are at Ta=25°C

(\*)1) : Duration of IO time  $\leq 50\mu\text{s}$

ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ IC เบอร์ TLP250

3.1.3 การออกแบบวงจรพื้นฐาน

คาววงจรในรูปที่ 3-5 ซึ่งประกอบไปด้วยไดโอด  $D_1$  และตัวเก็บประจุ  $C_0$  จะช่วยให้สามารถสร้างแรงดันได้สูงขึ้นเป็น 2 เท่าของค่ายอดแรงดันด้านจ่ายออกของหม้อแปลง โดยไดโอดจะต้องทนแรงดันได้อย่างน้อย 2 เท่าของค่ายอดแรงดัน ฉะนั้นถ้าเอาแรงดันนี้ไปผ่านเรกติฟายเออร์ ที่มีไดโอด  $D_2$  และตัวเก็บประจุกรองกระแส  $C_1$  ก็จะทำให้ได้แรงดันกระแสตรงสูงเป็น 2 เท่าของแรงดันค่ายอดของหม้อแปลงด้านจ่ายกำลังออก โดยตัวเก็บประจุกรองกระแส  $C_1$  ในวงจรพื้นฐานนั้นเป็นตัวยุกับตัวเก็บประจุ  $C_1$  ในวงจรกำเนิดแรงดันสูง



รูปที่ 3-5 วงจรทรีแรงดัน

### 3.2 การออกแบบชุดควบคุมแรงดันอัดประจุ

ในขั้นต้นเราจะกำหนดคุณสมบัติของชุดควบคุมแรงดันอัดประจุของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการออกแบบวงจรชุดควบคุมแรงดันอัดประจุ ซึ่งจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ต้องใช้สวิตช์กฤษญแจ เป็นสวิตช์ในการเปิด-ปิดชุดควบคุมแรงดันอัดประจุ
- เมื่อทำการหมุนสวิตช์กฤษญแจ เพื่อเปิดชุดควบคุมแรงดันอัดประจุ หลอดไฟ OFF Variac จะต้องสว่างขึ้น

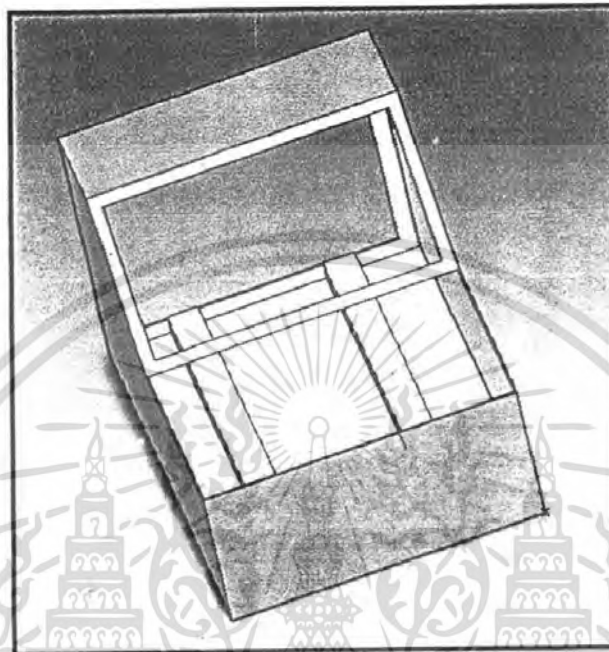
- จะกดปุ่ม OFF Variac ได้ ก็ต่อเมื่อกดปุ่ม ON Variac ก่อน
- จะไม่สามารถทำการขึ้นแรงดันอัดประจุได้ ถ้าไม่กดปุ่ม ON Variac
- สามารถเลือกการขึ้น-ลงแรงดันอัดประจุได้ โดยใช้มือหมุน Variac
- เมื่อมีการกดปุ่ม Emergency จะต้องมีการตัดวงจรทั้งหมดออกจากหม้อแปลงแรงดันอัดประจุ โดยไม้กาวัดจะถูกดันลงโดยอัตโนมัติเพื่อทำการคายประจุที่ค้างอยู่ที่หม้อแปลงแรงดันอัดประจุ และจะมีการลงแรงดันหม้อแปลงปรับแรงดันโดยอัตโนมัติเอง โดยจะต้องมีหลอดบ่งบอกสถานะถึงไฟที่ค้างอยู่ที่หม้อแปลงปรับแรงดัน (Variat Not Zero) โดยจะไม่สามารถกดปุ่ม ON Variac ได้ ถ้าแรงดันที่หม้อแปลงไม่ใช่ศูนย์โวลต์

- ให้มีการติดตั้ง Over Current relay ไว้เพื่อขณะที่ทำการทดสอบหากเกิด Flashover และมีการแอสสูงเกินที่คั้งไว้ Over Current relay จะสับสวิตช์ออกไฟจะหยุดไหลเข้าหม้อแปลงปรับแรงดัน

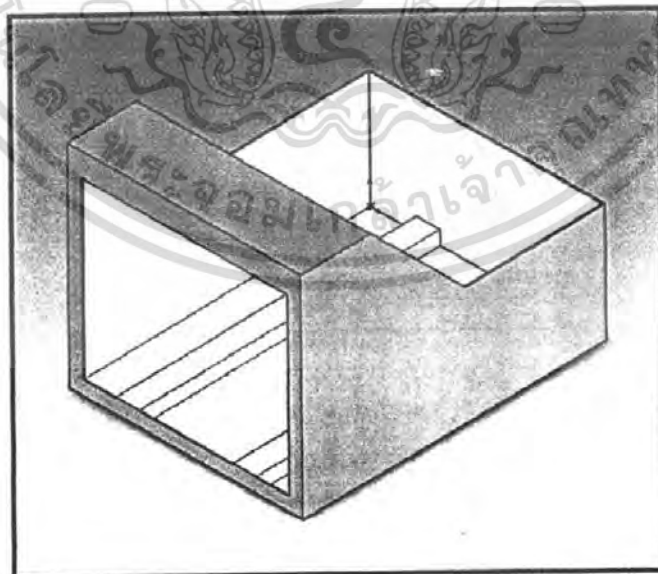
### 3.2.1 การออกแบบโครงสร้างภายนอก

โครงสร้างภายนอกของตัวตู้ ได้ทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solid work ตามรูปที่

3-6

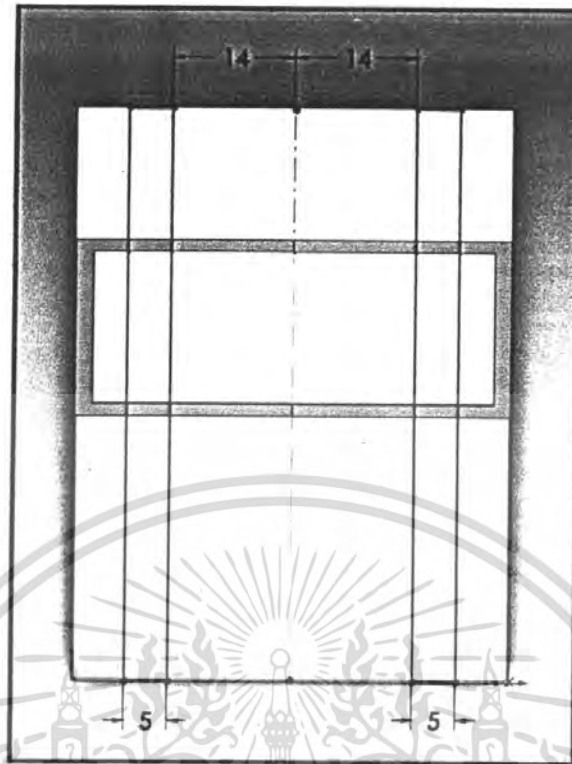


ก) ภาพฉายด้านหน้า

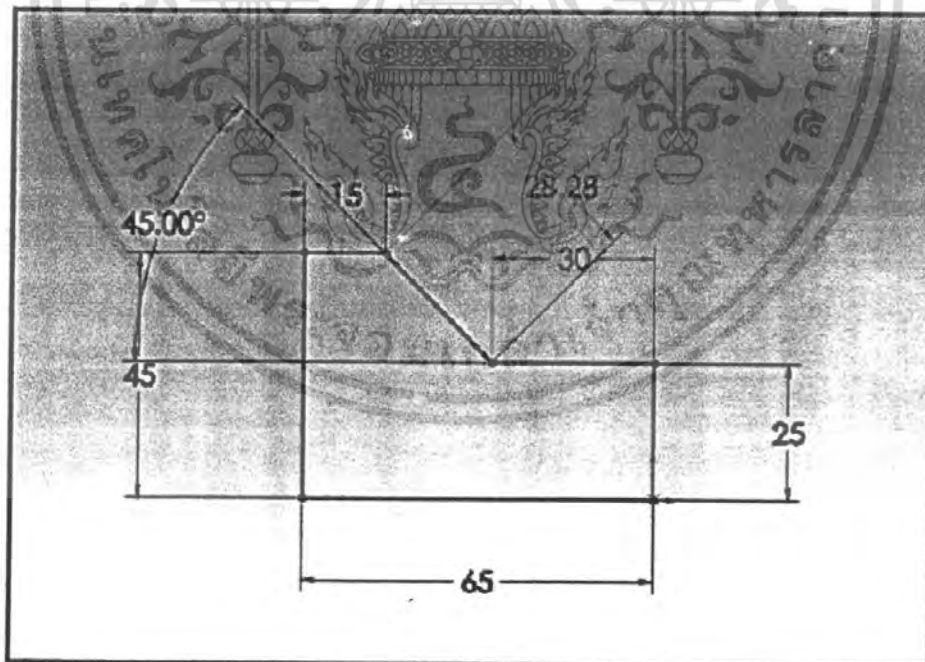


ข) ภาพฉายด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

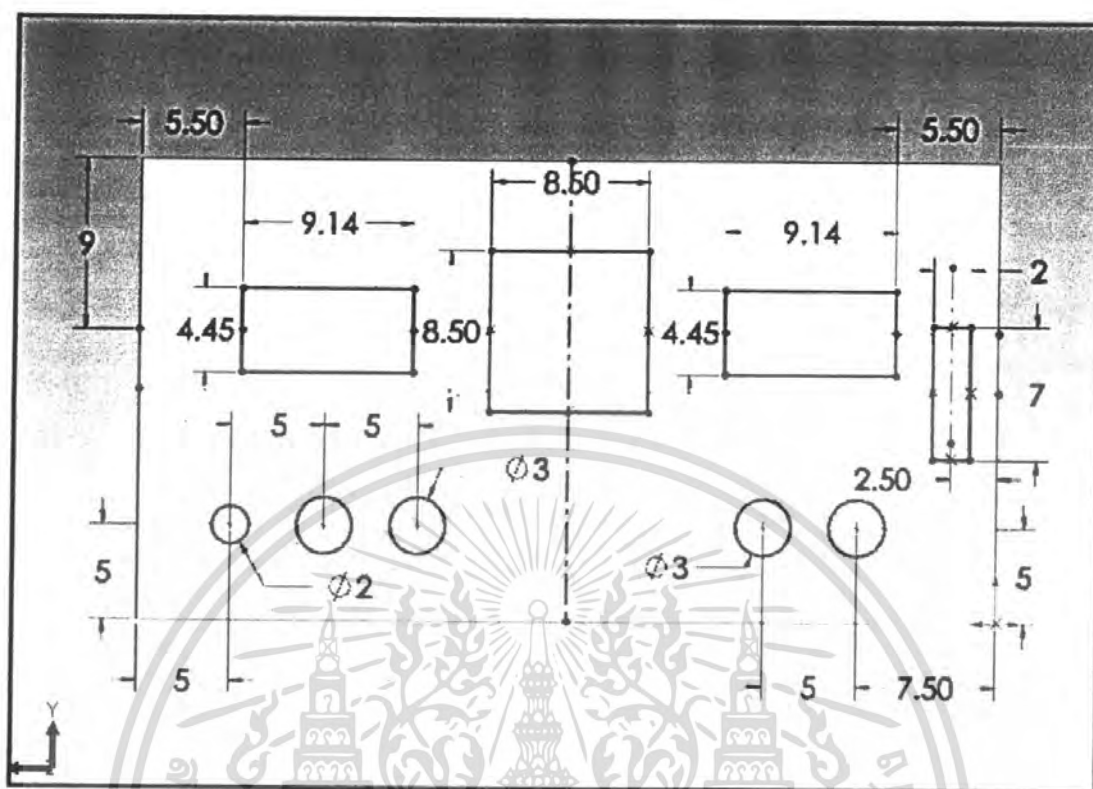


ค) ขนาดคานยึดตู้

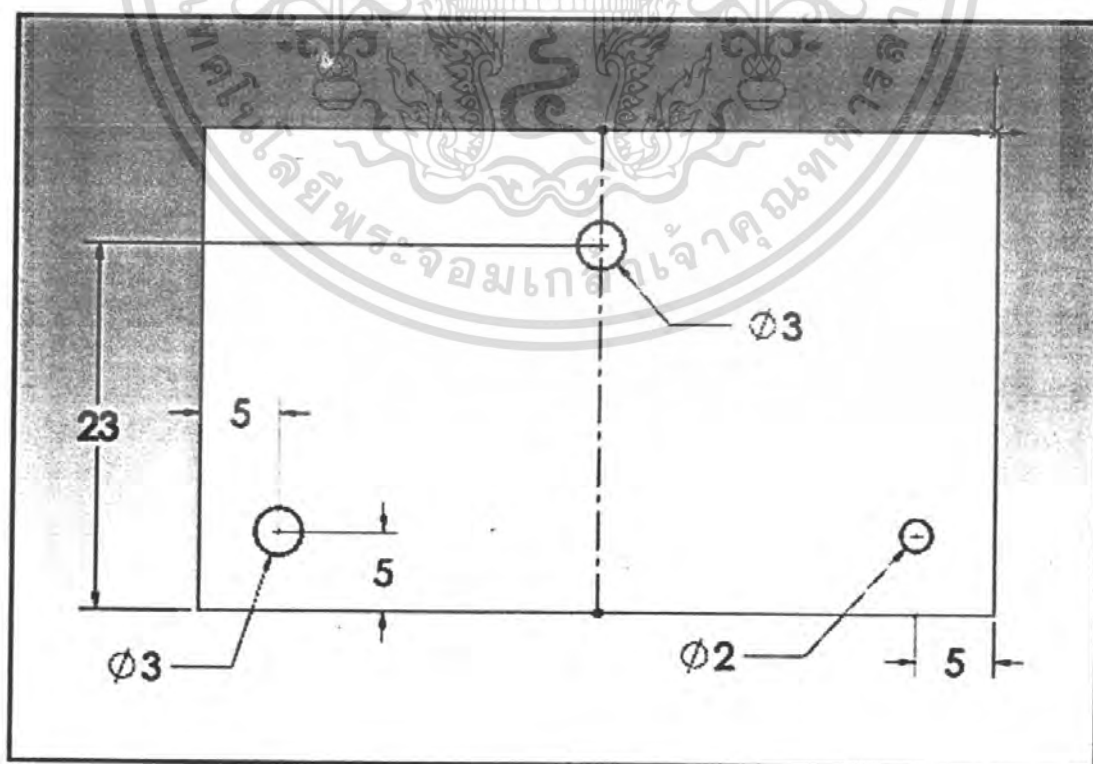


ง) ขนาดด้านข้างของตู้ควบคุมแรงดันอัดประจุ

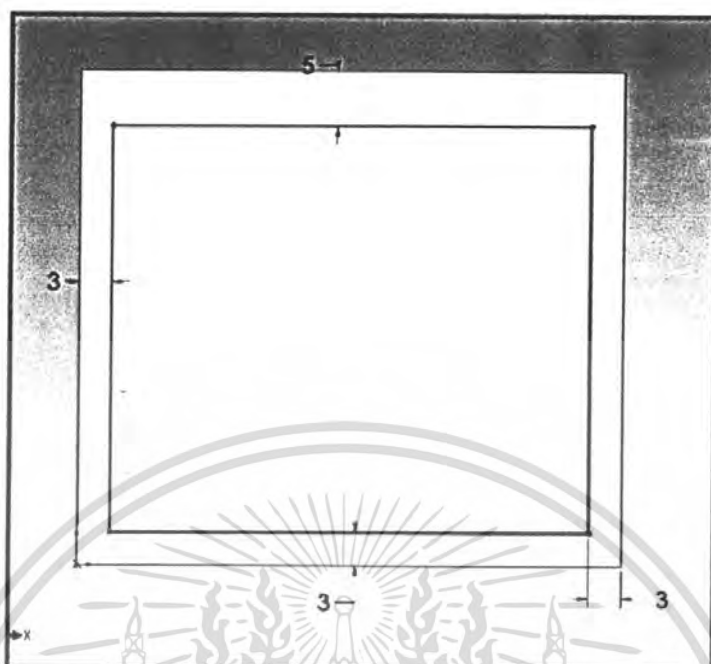
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จ) ขนาดแผงหน้าปัดแสดงการทำงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 จ) ขนาดแผงการควบคุม Variac, ปุ่ม Emergency, และปุ่มทริกเกอร์  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ช) ขนาดด้านหลังตู้ควบคุมแรงดันอัตโนมัติ

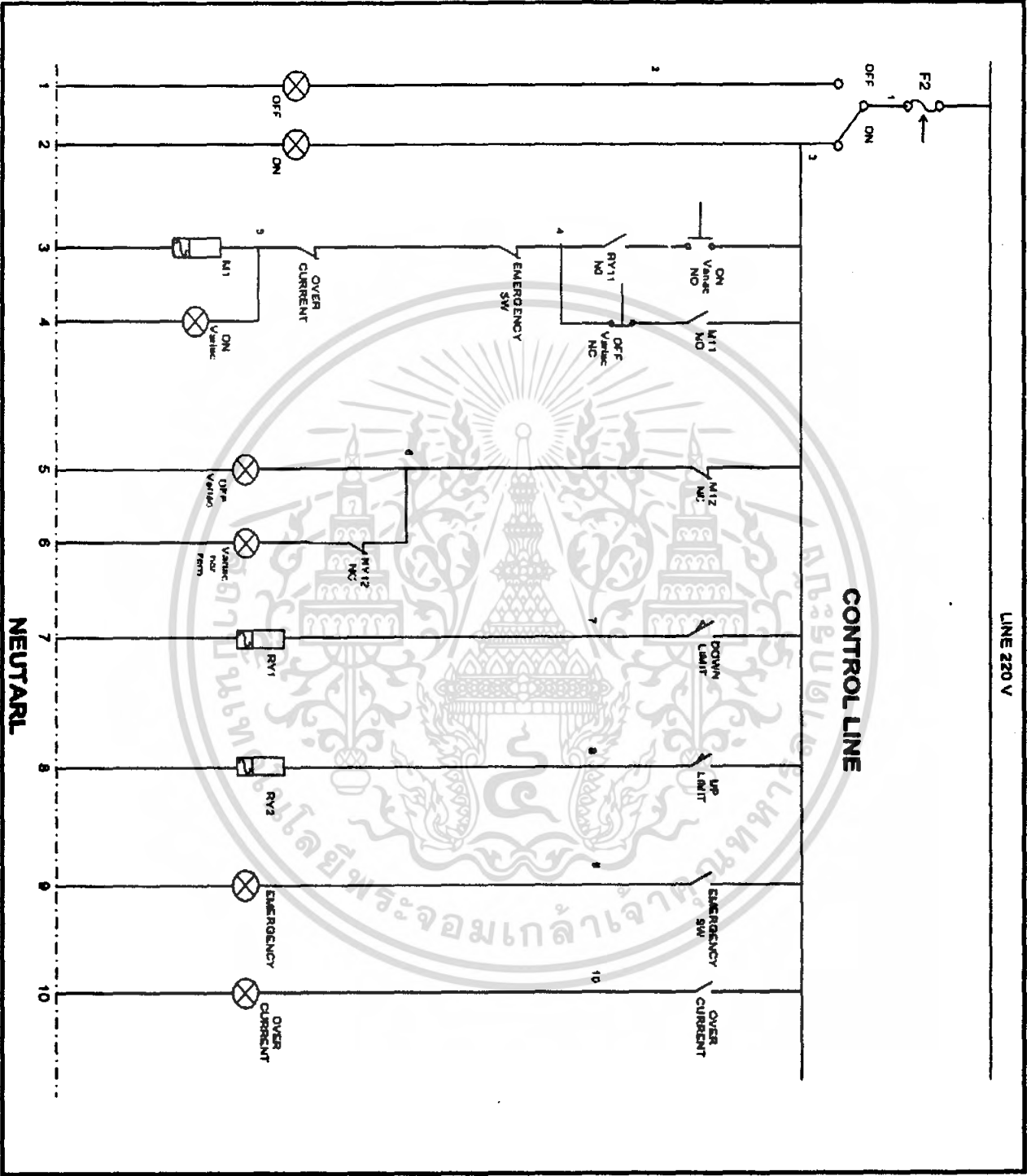


ช) ตู้ควบคุมแรงดันอัตโนมัติได้ทำการออกแบบ โดยลงอุปกรณ์ครบทุกจุด

รูปที่ 3-6 โครงสร้างของตู้ควบคุมแรงดันอัตโนมัติได้ทำการออกแบบด้วยโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้ในการค้า  
คอมพิวเตอร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การออกแบบวงจรชุดควบคุมแรงดันอัดประจุ  
วงจรควบคุมแรงดันอัดประจุที่ได้ทำการออกแบบ ตามรูป 3-7



รูปที่ 3-7 วงจรควบคุมแรงดันอัดประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 รายชื่อหน้าที่ของอุปกรณ์วงจรควบคุมแต่ละแถว

#### -แถวที่ 1

1. สวิตช์กฏูญแจดตำแหน่ง OFF ทำหน้าที่หยุดการทำงานทั้งหมดของตัวตู้คอนโทรล ทำให้ไม่มีกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าไปในวงจรควบคุม

2. หลอดไฟ OFF ทำหน้าที่แสดงสถานะการทำงานเมื่อปิดกฏูญแจดมาที่ตำแหน่ง OFF หลอดไฟจะสว่าง

#### -แถวที่ 2

1. สวิตช์กฏูญแจดตำแหน่ง ON เมื่อปิดกฏูญแจดมาที่ตำแหน่ง ON จะทำให้มีกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามาในชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ และป้อนเข้าเข้ามาในวงจรควบคุมซึ่งขณะนี้วงจรพร้อมที่จะทำงานตามคำสั่งเงื่อนไขต่างๆต่อไป

2. หลอดไฟ ON ทำหน้าที่แสดงสถานะการทำงานเมื่อปิดกฏูญแจดมาที่ตำแหน่ง ON หลอดไฟจะสว่าง

#### -แถวที่ 3

1. สวิตช์กดติด-ปล่อยดับ ON VARIAC NO (Push button switch) เมื่อกดสวิตช์ที่ตำแหน่งนี้จะทำให้มีกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าหม้อแปลงปรับแรงดัน (VARIAC) หม้อแปลงปรับแรงดันพร้อมทำงาน

2. RY11 NC (รีเลย์ช่วย RY1 ชนิดปกติเปิด) ทำหน้าที่ในการ interlock สวิตช์ ON VARIAC ไว้ ก็คือ เมื่อกดสวิตช์ ON VARIAC ไปแล้ว จะกดสวิตช์ ON VARIAC ได้อีกทีก็ต่อเมื่อมีกำลังไฟฟ้าป้อนออกจากหม้อแปลงแรงดันเหลือศูนย์โวลต์เท่านั้น จึงกด ON VARIAC ได้อีกครั้ง โดยจะ interlock ไว้ด้วย RY11 NC

3. EMERGENCY SWITCH เมื่อกดปุ่มตัวสวิตช์จะทำหน้าที่ตัดการทำงานทั้งหมดของแถวที่ 3 ออกคือตัดกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าหม้อแปลงปรับแรงดัน

4. OVER CURRENT RELAY ทำหน้าที่ตัดการทำงานทั้งหมดของแถวที่ 3 ออก คือตัดกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าหม้อแปลงแรงดัน เมื่อขณะที่ทำการทดสอบหากเกิด Flashover จะทำให้เกิดกระแสสูงไหลเข้าสู่ชุดควบคุม เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับอุปกรณ์อื่นเนื่องมาจากกระแสเกิน จึงติดตั้ง OVER CURRENT RELAY ไว้

6. M1 (MAIN MAGNETIC CONTACTOR M1) เมื่อกดสวิตช์ ON VARIAC ตัว M1 จะทำหน้าที่สับสวิตช์ในวงจรกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าหม้อแปลงปรับแรงดัน

#### -แถวที่ 4

1. M11 NO (หน้าสัมผัสช่วยสวิตช์คอนแทกปกติเปิด M1 ) ทำหน้าที่เป็นตัว interlock กับตัว MAIN MAGNETIC CONTACTOR M1 ไว้ ทำให้ K1 ทำงานตลอดเวลา แม้จะปล่อยมือจากปุ่มสวิตช์ ON VARIAC แล้วก็ตาม
2. สวิตช์กดติด-ปล่อยดับ OFF VARIAC NC (Push button switch) เมื่อกดสวิตช์ที่ตำแหน่งนี้จะทำให้กำลังไฟฟ้าหยุดป้อนเข้าหม้อแปลงปรับแรงดัน (VARIAC)
3. หลอดไฟ ON VARIAC หลอดจะสว่างเมื่อ M1 ทำงาน

#### -แถวที่ 5

1. M12 NC (หน้าสัมผัสช่วยสวิตช์คอนแทกปกติปิด M1) ทำหน้าที่ต่อให้หลอดไฟ OFF VARIAC สว่าง เมื่อ M1 หยุดการทำงาน
2. หลอดไฟ OFF VARIAC หลอดจะสว่างเมื่อ M1 หยุดการทำงาน

#### -แถวที่ 6

1. RY12 NC (รีเลย์ช่วย RY1 ชนิดปกติปิด) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ต่อให้หลอดไฟ VARIAC NOT ZERO สว่างเมื่อมีการขึ้น-ลงแรงดัน คือ เมื่อหม้อแปลงปรับแรงดันยังมีกำลังไฟฟ้าอยู่ และจะตัดให้หลอดไฟ VARIAC NOT ZERO ดับ เมื่อไฟในหม้อแปลงปรับแรงดันเหลือศูนย์โวลต์
2. หลอดไฟ VARIAC NOT ZERO ทำหน้าที่แสดงสถานะของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนอยู่ในหม้อแปลงปรับแรงดัน คือสว่างเมื่อมีไฟไหลในหม้อแปลงปรับแรงดัน และดับเมื่อไม่มีกำลังไฟฟ้าป้อนอยู่ในหม้อแปลงปรับแรงดัน

#### -แถวที่ 7

1. DOWN LIMIT (ลิมิตสวิตช์ตัวที่1) ทำหน้าที่ในการเป็นสวิตช์หน้าสัมผัสรอให้หมุน Variac เพื่อลดแรงดันอัดประจุมาสัมผัสที่หน้าสัมผัสของมัน เพื่อทำการตัดต่อวงจรให้ RY1
2. RY1 (คอยล์รีเลย์ RY1) ทำหน้าที่ตัดต่อหน้าสัมผัสช่วยในแถวต่างๆ

#### -แถวที่ 8

1. UP LIMIT (ลิมิตสวิตช์) ทำหน้าที่ในการเป็นสวิตช์หน้าสัมผัสรอให้หมุน Variac เพื่อขึ้นแรงดันค่าสูงสุดที่ตั้งไว้มาสัมผัสที่หน้าสัมผัสของมัน เพื่อทำการตัดต่อวงจรให้ RY2
2. RY2 (คอยล์รีเลย์ RY2) ทำหน้าที่ตัดต่อหน้าสัมผัสช่วยในแถวต่างๆ

### -แถวที่ 9

1. **EMERGENCY SWITCH** เมื่อกดปุ่มตัวสวิตช์จะทำหน้าที่ตัดกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าหม้อแปลงปรับแรงดัน

2. หลอด **EMERGENCY** จะสว่างในขณะที่ทำการกดปุ่ม **EMERGENCY** และดับเมื่อปลดปุ่ม **EMERGENCY** ออก

### -แถวที่ 10

1. **OVER CURRENT RELAY** ทำหน้าที่ตัดกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าหม้อแปลงแรงดัน เมื่อขณะที่ทำการทดสอบหากเกิด Flashover จะทำให้เกิดกระแสสูงป้อนเข้าชุดควบคุม เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับอุปกรณ์อื่นเนื่องมาจากกระแสเกิน จึงติดตั้ง **OVER CURRENT RELAY** ไว้ และจะต่อให้หลอดแสดงสถานการณ์ทำงาน **OVER CURRENT** สว่าง

2. หลอด **OVER CURRENT** สว่างเมื่อ **OVER CURRENT RELAY** ทำงาน และดับเมื่อ **OVER CURRENT RELAY** หยุดการทำงาน

### 3.2.4 ขั้นตอนการทำงานของชุดควบคุม

#### - การเปิด/ปิดชุดควบคุมแรงดันอัดประจุ

เมื่อบิดสวิตช์กุญแจมาที่ตำแหน่ง **ON** กำลังไฟฟ้าจะป้อนผ่านหลอดไฟ **ON** และหลอดไฟ **ON** สีแดงจะสว่าง พร้อมกันนั้น กำลังไฟฟ้าจะป้อนเข้าสู่ **speed control motor** กำลังไฟฟ้าจะป้อนไปร่ายยังชุดควบคุมทั้งหมด เพื่อบริการการทำงานในเงื่อนไขต่างๆต่อไป แต่เมื่อเราบิดกุญแจกลับไปยังตำแหน่ง **OFF** จะทำให้กำลังไฟฟ้าป้อนผ่านหลอดสีเขียว หลอดสีเขียวจะสว่างทันที ซึ่งขณะนี้อยู่ในชุดควบคุมจะไม่มีไฟ ซึ่งต้องรอให้บิดกุญแจไปที่ตำแหน่ง **ON** อีกครั้งเพื่อให้วงจรควบคุมพร้อมทำงานตามเงื่อนไขต่างๆต่อไป

#### - การเปิด/ปิดหม้อแปลงแรงดัน

เมื่อเราทำการบิดกุญแจไปที่ตำแหน่ง **ON** ไฟจะมารอที่ชุดควบคุม แต่หม้อแปลงจะยังไม่ทำงาน ซึ่งเราต้องกดปุ่ม **ON Variac** ก่อน เมื่อกดปุ่มแล้วกำลังไฟฟ้าจะป้อนผ่าน **Magnetic M1** และหลอดไฟแสดงการ **ON Variac** จะสว่างขึ้น ในส่วนของ **Auxiliary NO** ของ **Magnetic M1** จะ **Interlock** ตัวมันเอง ทำให้มีกำลังไฟฟ้าป้อนผ่าน **Magnetic M1** ตลอดเวลาโดยไม่ต้องกดปุ่มค้าง หากกดสวิตช์ **OFF Variac** กำลังไฟฟ้าจะหยุดป้อนผ่าน **Magnetic M1** และทำให้ **Magnetic M1** ในวงจรกำลังสับสวิตช์ออก กำลังไฟฟ้าจะหยุดป้อนเข้าหม้อแปลงปรับแรงดัน และทำให้ **Auxiliary NO** ของ **Magnetic M1** ที่ **Interlock** อยู่กลับสู่สภาวะปกติ ส่วน **Auxiliary NO** ของ **Magnetic M1** ที่ต่ออยู่แถวที่ 5 จะต่อวงจรให้กำลังไฟฟ้าป้อนผ่านหลอดไฟ **OFF Variac** ซึ่งวงจรจะกลับสู่สภาวะปกติ จนกว่าจะ **ON Variac** อีกครั้ง

- แรงดันของหม้อแปลงยังไม่ได้อยู่ที่ศูนย์โวลต์

เมื่อทำการกดปุ่ม On Variac นั้น หลอด Variac Not Zero ยังคงดับอยู่ เพราะเรายังไม่ได้หมุน Variac เพื่อขึ้นแรงดัน แต่หลังจากนั้นเมื่อเราทำการหมุน Variac เพื่อทำการขึ้นแรงดันไปแล้ว หลอด Variac Not Zero จะสว่างขึ้น เพราะขณะนั้นแรงดันที่ตัว Variac ไม่ใช่ศูนย์โวลต์แล้ว จากนั้นเมื่อเราทำการหมุน ปุ่ม Variac ลงจนสุดไปสัมผัสกับหน้าสัมผัส Limit switch down ที่ตั้งไว้เพื่อทำการคายประจุ หลอด Variac Not Zero จะดับลง

- การป้อนแรงดัน

การป้อนแรงดันอัดประจุ ทำได้โดยหลังจากกดปุ่ม On Variac ไปแล้ว โดยใช้มือเป็นคัตวหมุนป้อน แรงดัน ซึ่งจะมีลิ้มิตสวิตช์ ตั้งไว้ที่ค่าสูงสุด เพื่อป้องกันการป้อนเกินค่าลิ้มิตที่ตั้งไว้

- การลดแรงดัน

การลดแรงดันอัดประจุ จะทำได้ก็ต่อเมื่อ เมื่อหมุน Variac ขึ้นไปก่อน การลงแรงดันจะใช้มือเป็นคัตวหมุนบังคับ ซึ่งก่อนการคายประจุทุกครั้งจะต้องทำการปรับ Variac ลง จากนั้นจึงทำการกดปุ่มทริกเกอร์เพื่อทำการคายประจุ

- การทำงานของปุ่ม EMERGENCY

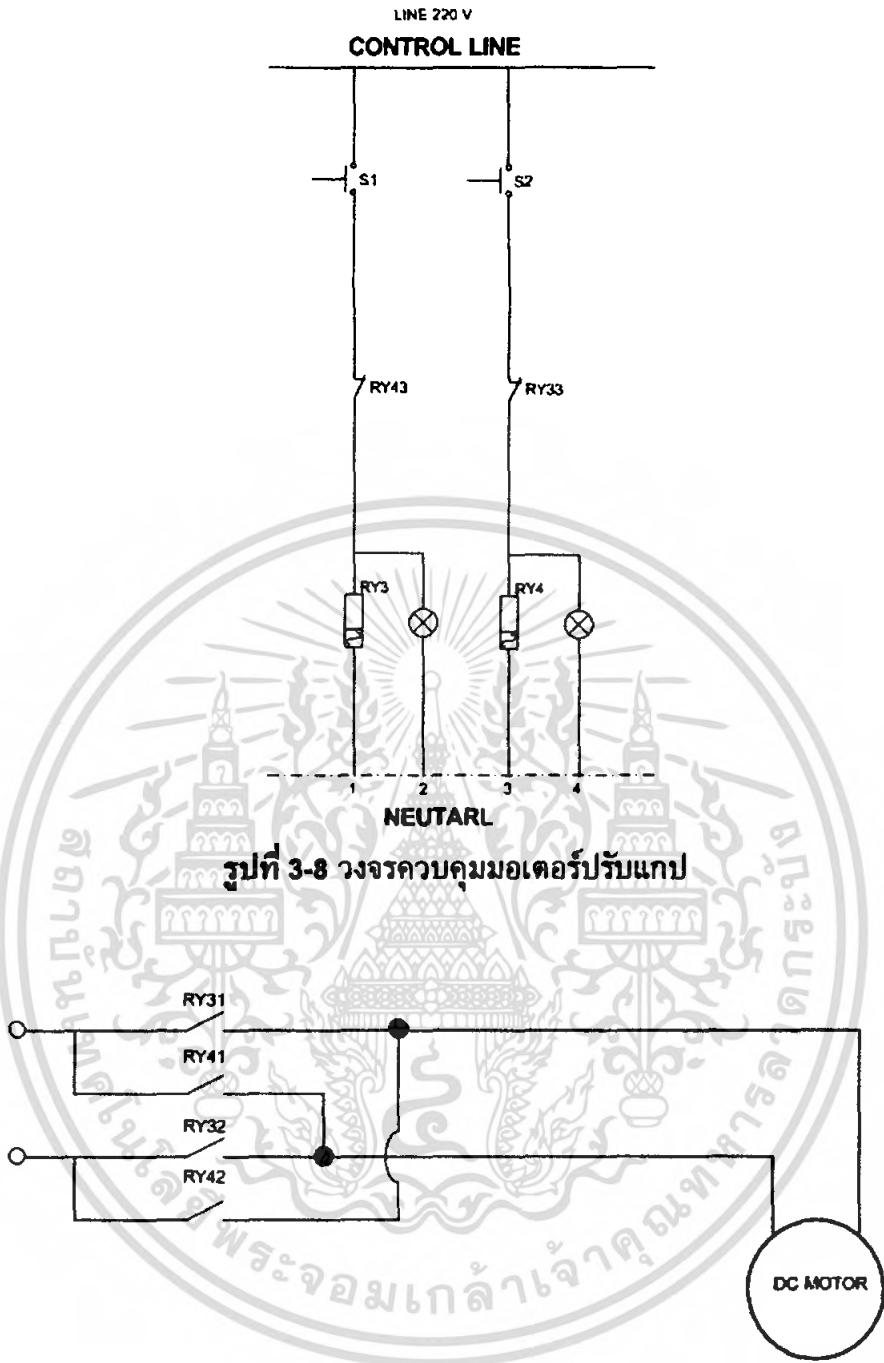
เมื่อทำการกดปุ่ม Emergency จะทำให้สวิตช์ปกติเปิด ทำการปิดลงส่งผลให้หลอดไฟ Emergency สว่าง Auxiliary ชนิด NC จะเปิดออกทำให้กำลังไฟฟ้าหยุดป้อนผ่าน Magnetic M1 จากนั้น Magnetic ในวงจรกำลังจะสับสวิตช์ออกกำลังไฟฟ้าจะหยุดป้อนเข้าหม้อแปลงปรับแรงดันและทำให้ Auxiliary ของ Magnetic M1 กลับสู่สภาวะปกติ

- การทำงานของ OVER CURRENT

ในขณะที่ทำการทดสอบหากเกิด Flashover จะทำให้เกิดกระแสสูงป้อนเข้าสู่ชุดควบคุมเพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับอุปกรณ์อื่นเนื่องมาจากกระแสเกิน จึงติดตั้ง Over Current Relay โดยเมื่อมีกระแสเกิน จะทำให้สวิตช์ Over Current ปิดลง กระแสไฟฟ้าจะป้อนผ่าน หลอดไฟ Over Current ทำให้หลอดไฟ Over Current สว่าง และกระแสไฟฟ้าจะป้อนผ่าน Auxiliary ชนิด NC ที่ต่อไว้แถวที่ 3 เพื่อตัดวงจรควบคุม ทำให้กระแสไฟฟ้าหยุดป้อนผ่าน Magnetic M1 จากนั้น Magnetic ในวงจรกำลังจะสับสวิตช์ออกกระแสไฟฟ้าจะหยุดป้อนเข้า หม้อแปลงปรับแรงดันและทำให้ Auxiliary ของ Magnetic M1 กลับสู่สภาวะปกติ

### 3.2.5 การออกแบบวงจรควบคุมมอเตอร์ปรับแกป

วงจรควบคุมและวงจรกำลังที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ปรับแกปขนาด 15 VDC นั้นจะมีวงจรตามรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ



รูปที่ 3-9 วงจรกำลังมอเตอร์ปรับแกป

3.3 การประกอบสร้าง

3.3.1 การประกอบสร้างตู้ควบคุมแรงดันอัดประจุ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการประกอบสร้างตู้ควบคุมแรงดันอัดประจุตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.2.1 โดยใช้โครงสร้างทำเป็นเหล็กพับขึ้นรูป ซึ่งเหล็กที่ใช้มีความหนาขนาด 1.2 มม.

โดยอุปกรณ์หลักๆที่ใช้ในการประกอบ ดังรูปที่ 3.10 และตู้ควบคุมแรงดันอัดประจุที่ได้ทำการ

เอกสารประกอบสร้างจริงดังรูปที่ 3.11

การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ดิจิตอลมิเตอร์รุ่น PAXLA สำหรับแสดงค่าระยะแกปทรงกลม



ข) ดิจิตอลมิเตอร์รุ่น PAXH สำหรับแสดงค่าแรงดันอัดประจุ



ค) ลิมิทสวิตช์สำหรับกำหนดค่าแรงดันอัดประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ง) Push bottom switch พร้อมหลอดไฟในตัว

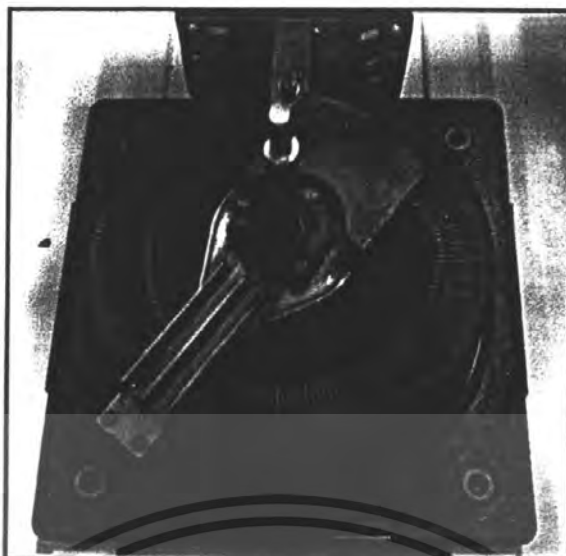


จ) รีเลย์ที่ใช้ในการตัดต่อวงจรควบคุม



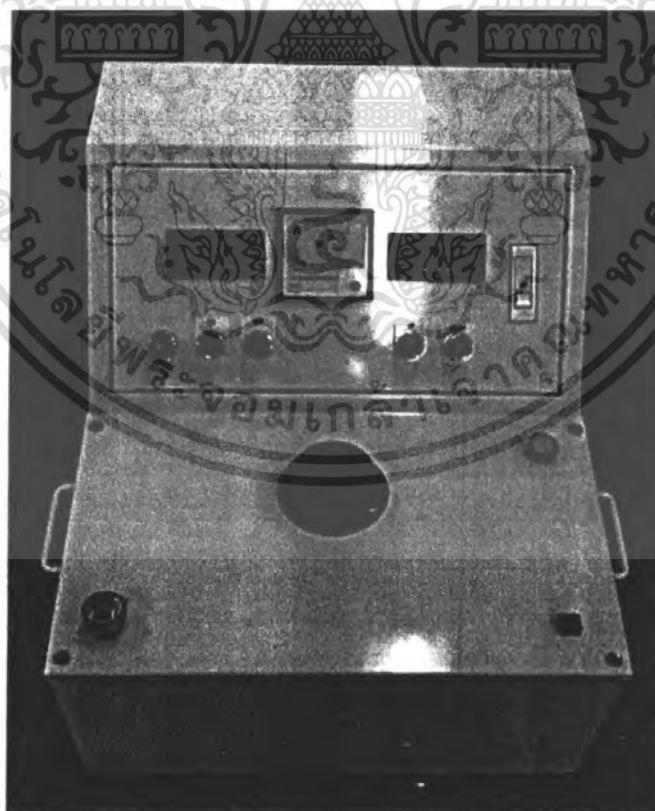
ช) แมกเนติกคอนแทคเตอร์สำหรับตัดต่อวงจรกำลังและวงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



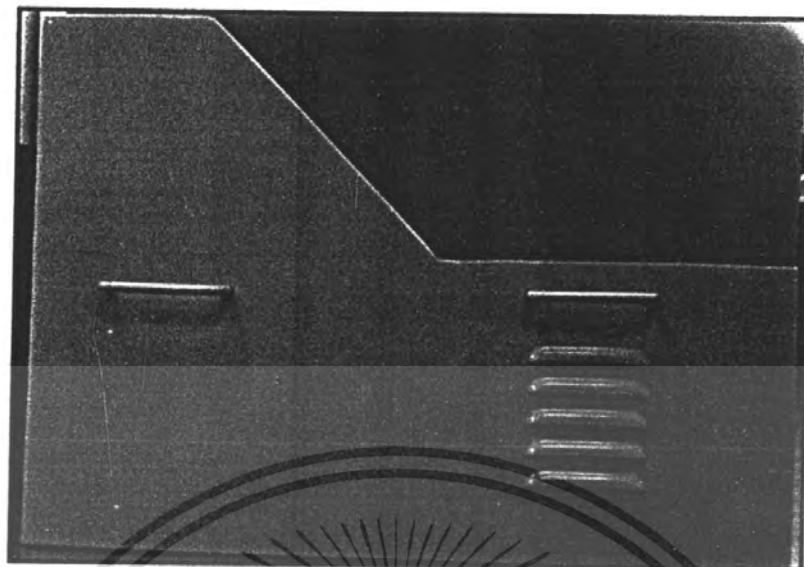
ช) Variac 380 VAC สำหรับปรับค่าแรงดันขาเข้าให้กับหม้อแปลงอัดประจุ  
รูปที่ 3-10 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการประกอบตู้ควบคุมแรงดันอัดประจุ

ตู้ควบคุมแรงดันอัดประจุที่ได้ทำการประกอบสร้างจริงดังรูปที่ 3.9



ก) ภาพฉายด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

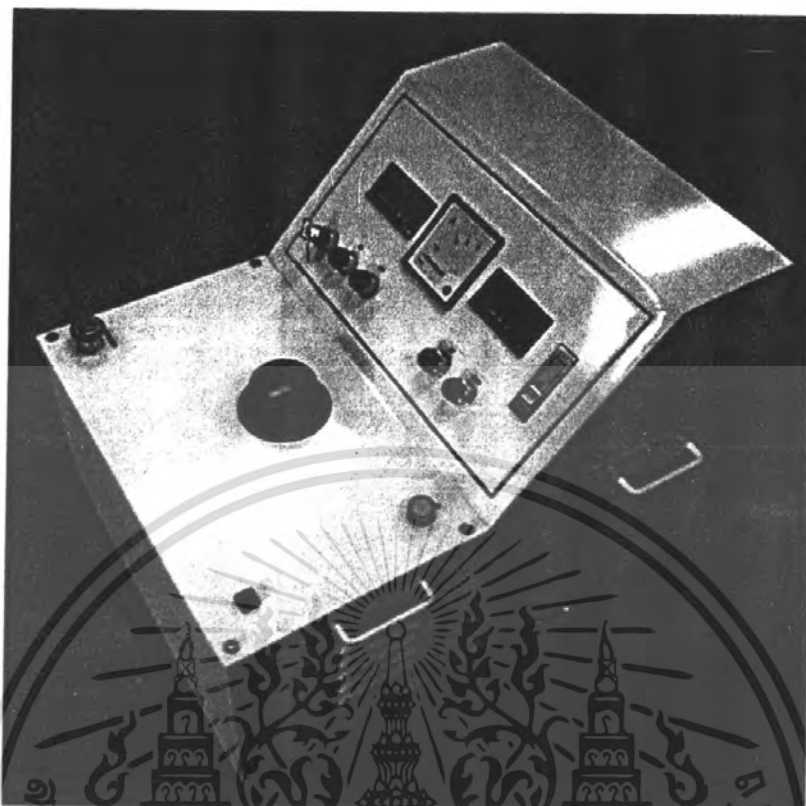


ข) ภาพฉายด้านข้าง



ค) ภาพฉายด้านขวา-บน

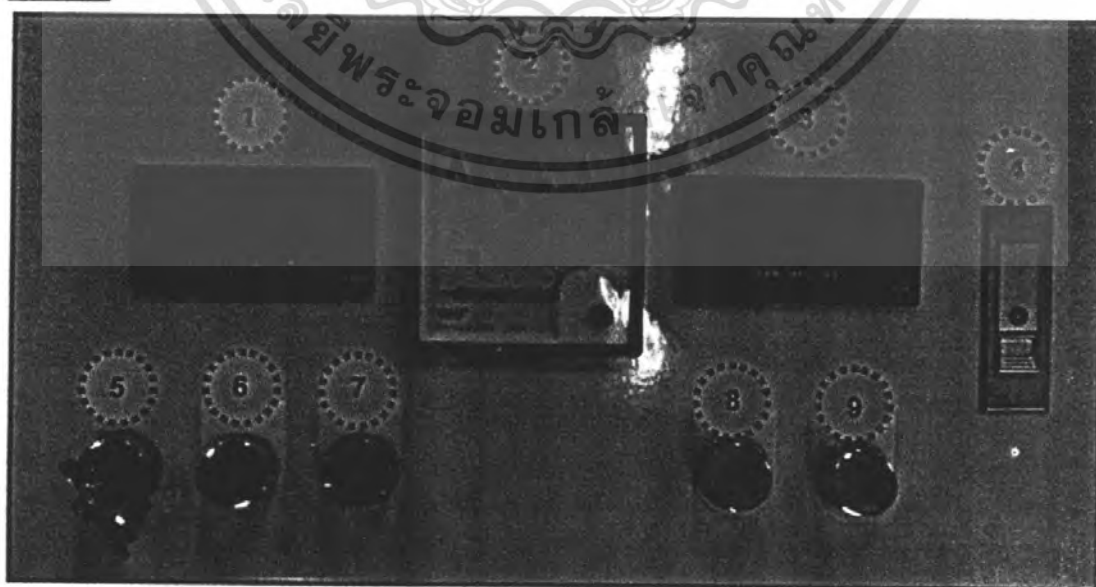
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ง) ภาพฉายด้านขวา

รูปที่ 3-11 ตู้ควบคุมแรงดันอัดประจุที่ได้ทำการประกอบสร้างจริง

แผงหน้าปัดฟังก์ชันการทำงานของตู้ควบคุมแบ่งเป็นส่วนต่างๆ 3 ส่วน ซึ่งมีรายละเอียด  
ต่างๆดังรูปที่ 3-12  
ส่วนที่ 1



ก) แผงหน้าปัดฟังก์ชันการทำงานของตู้ควบคุมส่วนที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- |           |     |                                                               |
|-----------|-----|---------------------------------------------------------------|
| หมายเลข 1 | คือ | ดิจิตอลมิเตอร์แสดงแรงดันอัดประจุ                              |
| หมายเลข 2 | คือ | มิเตอร์แสดงกระแส                                              |
| หมายเลข 3 | คือ | ดิจิตอลมิเตอร์แสดงระยะแกปทรงกลม                               |
| หมายเลข 4 | คือ | สวิตช์เปิด-ปิด ฝาตู้แผงหน้าปัดด้านหน้า                        |
| หมายเลข 5 | คือ | สวิตช์กุญแจเปิด-ปิด ตู้ควบคุมแรงดันอัดประจุ                   |
| หมายเลข 6 | คือ | สวิตช์สั่งให้หม้อแปลง Variac ทำงานพร้อมหลอดแสดงสถานะสีเขียว   |
| หมายเลข 7 | คือ | สวิตช์สั่งให้หม้อแปลง Variac หยุดทำงานพร้อมหลอดแสดงสถานะสีแดง |
| หมายเลข 8 | คือ | สวิตช์ปรับแกปขึ้น พร้อมหลอดไฟแสดงสถานะสีเขียว                 |
| หมายเลข 9 | คือ | สวิตช์ปรับแกปลง พร้อมหลอดไฟแสดงสถานะสีเขียว                   |

## ส่วนที่ 2

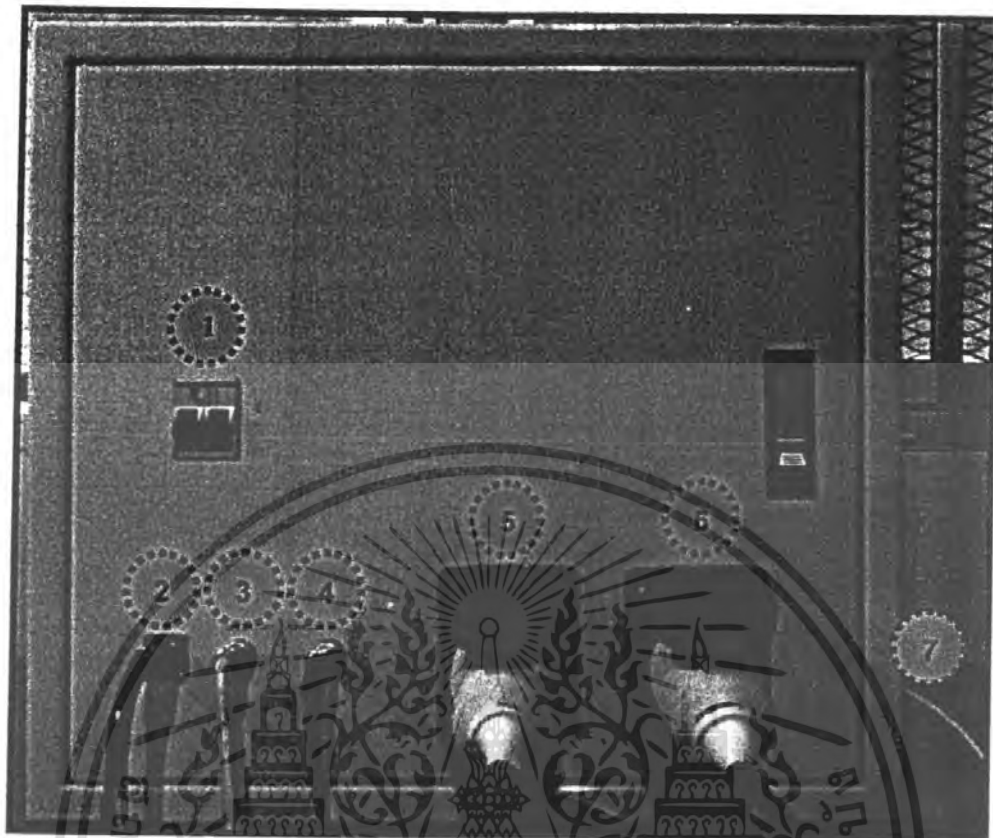


ข) แผงหน้าปัดฟังก์ชันการทำงานของตู้ควบคุมส่วนที่ 2

- |           |     |                                               |
|-----------|-----|-----------------------------------------------|
| หมายเลข 1 | คือ | ปุ่มกด Emergency พร้อมหลอดในตัว               |
| หมายเลข 2 | คือ | แป้นหมุน Variac สำหรับขึ้น - ลงแรงดันอัดประจุ |
| หมายเลข 3 | คือ | ไฟแสดง Variac Not Zero                        |
| หมายเลข 4 | คือ | ปุ่ม Trigger เพื่อสั่งการคายแรงดันอัดประจุ    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ส่วนที่ 3



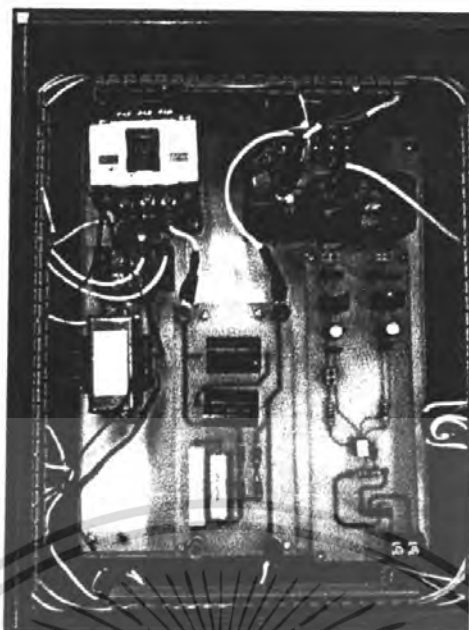
ค) แผงหน้าปัดฟังก์ชันการทำงานของตู้ควบคุมส่วนที่ 3  
รูปที่ 3-12 แผงหน้าปัดฟังก์ชันการทำงานของตู้ควบคุม

|           |     |                                                        |
|-----------|-----|--------------------------------------------------------|
| หมายเลข 1 | คือ | Circuit Breaker ป้องกันการลัดวงจร                      |
| หมายเลข 2 | คือ | ช่องเสียบสายสัญญาณ ดีไวเซอร์วัดแรงดันอัตรา             |
| หมายเลข 3 | คือ | ช่องเสียบสายสัญญาณ Trigger และควบคุมมอเตอร์ปรับระยะแกป |
| หมายเลข 4 | คือ | สายสัญญาณวัดระยะของแกปเพื่อส่งสัญญาณกลับมาที่มิเตอร์   |
| หมายเลข 5 | คือ | เต้าเสียบเพื่อจ่ายแรงดันไปยังหม้อแปลงอัตรา             |
| หมายเลข 6 | คือ | เต้ารับแรงดันไฟฟ้า 220 V                               |
| หมายเลข 7 | คือ | สายกราวด์ของระบบตู้ควบคุม                              |

#### 3.3.2 การประกอบสร้างชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ในหัวข้อนี้จะเป็นการประกอบสร้างชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.1 โดยนำแผงวงจรวางในกล่องเหล็กขนาด 35 ซม. × 30.5 ซม. ชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ทำการประกอบสร้างจริง ดังรูปที่ 3.13 นั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



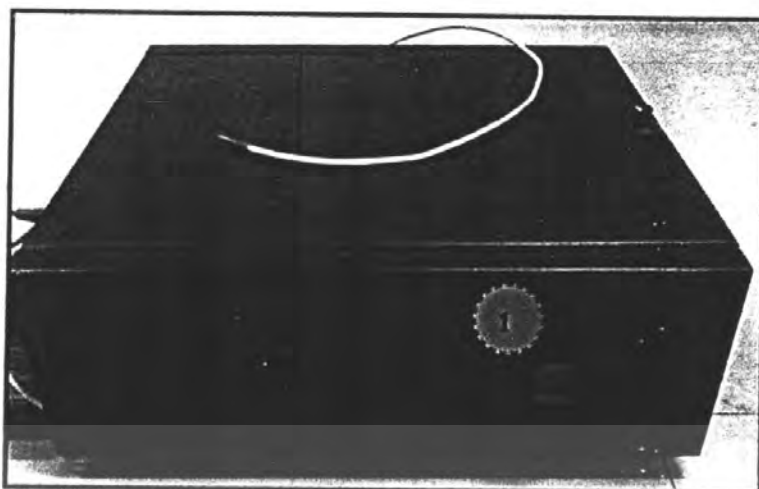
ก) ส่วนประกอบภายในของชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ทำการออกแบบจริง



ข) ด้านหลังของชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

- |           |     |                                                            |
|-----------|-----|------------------------------------------------------------|
| หมายเลข 1 | คือ | สายไฟแรงดันสูง 12 kV                                       |
| หมายเลข 2 | คือ | ช่องเสียบสายสัญญาณเพื่อกลับขั้วสัญญาณพัลส์ของชุดทริกกาตรอน |
| หมายเลข 3 | คือ | สายกราวด์ สำหรับต่อลงดิน                                   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค) ด้านซ้ายของชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

หมายเลข 1 คือ สวิตช์เปิด-ปิดชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์



ง) ด้านขวาของชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

หมายเลข 1 คือ ปุ่มสวิตช์ทริกเกอร์

หมายเลข 2 คือ ช่องสายไฟแรงดันสูง 12 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จ) ด้านหน้าของชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์  
รูปที่ 3-13 ชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ทำการ  
ประกอบสร้างจริง

- หมายเลข 1 คือ ช่องเสียบปลั๊กแรงดันไฟฟ้า 220 VAC  
หมายเลข 2 คือ ช่องเสียบสายสัญญาณเทร็กเกอร์ไปยังตู้ควบคุมแรงดันอัดประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดสอบและวิเคราะห์ผล

เพื่อเป็นการยืนยัน หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์(Trigatron) จึงต้องมีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนหลักๆดังนี้ คือ

#### 1. การทดสอบหาผลลัพธ์ของรูปคลื่นแรงดันสัญญาณพัลส์ที่วัดได้

- ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์
- ผลการทดสอบจริงที่วัดได้ด้วยออสซิลโลสโคปความถี่สูง
- ผลการทดสอบรูปคลื่นตัดซึ่งเกิดจากการจุกสปาร์กแกป

#### 2. การทดสอบชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อวิเคราะห์ช่วงกระชุนสปาร์กได้ โดยนำไปติดตั้งเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 200 kV 5 kJ

#### 4.1 การทดสอบหาผลลัพธ์ของรูปคลื่นแรงดันของสัญญาณพัลส์ที่วัดได้

ตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบ โดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์กับการทดสอบจริงนั้น จะมีอยู่ด้วยกัน 2 ตัวแปรคือ

1. ค่ายอดแรงดันของสัญญาณพัลส์ จะต้องมียอดประมาณ 12 kV
2. ช่วง 1 คาบเวลาของสัญญาณพัลส์ จะต้องมียอดประมาณ 1  $\mu s$  หรือ ช่วงเวลาหน้าคลื่นประมาณ 250 ns

ซึ่งทั้ง 2 ตัวแปรนี้ จะเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งจะต้องมีค่าใกล้เคียงกับเงื่อนไขเริ่มต้น ที่เราร่างไว้ก่อนทำการออกแบบ

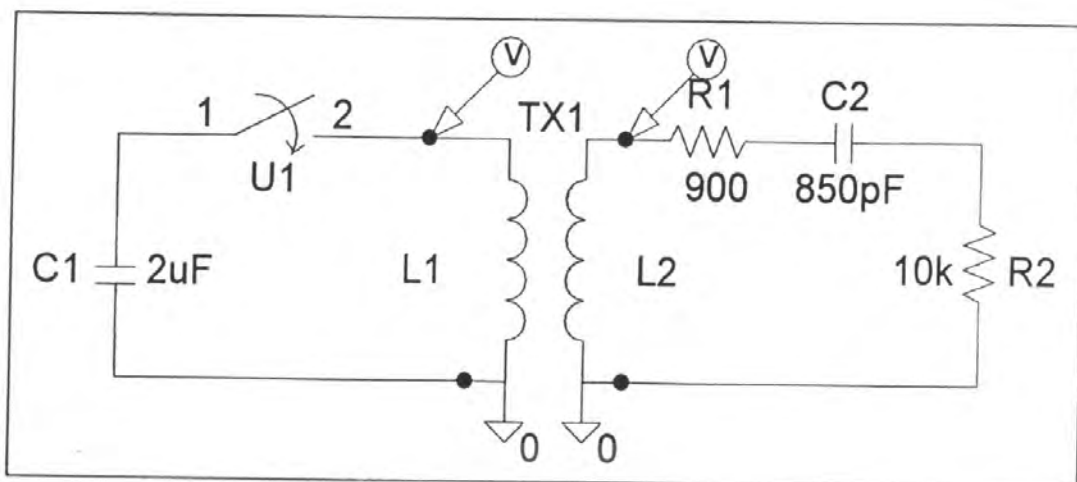
##### 4.1.1 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากข้อมูลของการออกแบบในบทที่ 3 นั้น เมื่อนำมาจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 4-1 จะได้ผลของการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 4-2

ข้อมูลของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

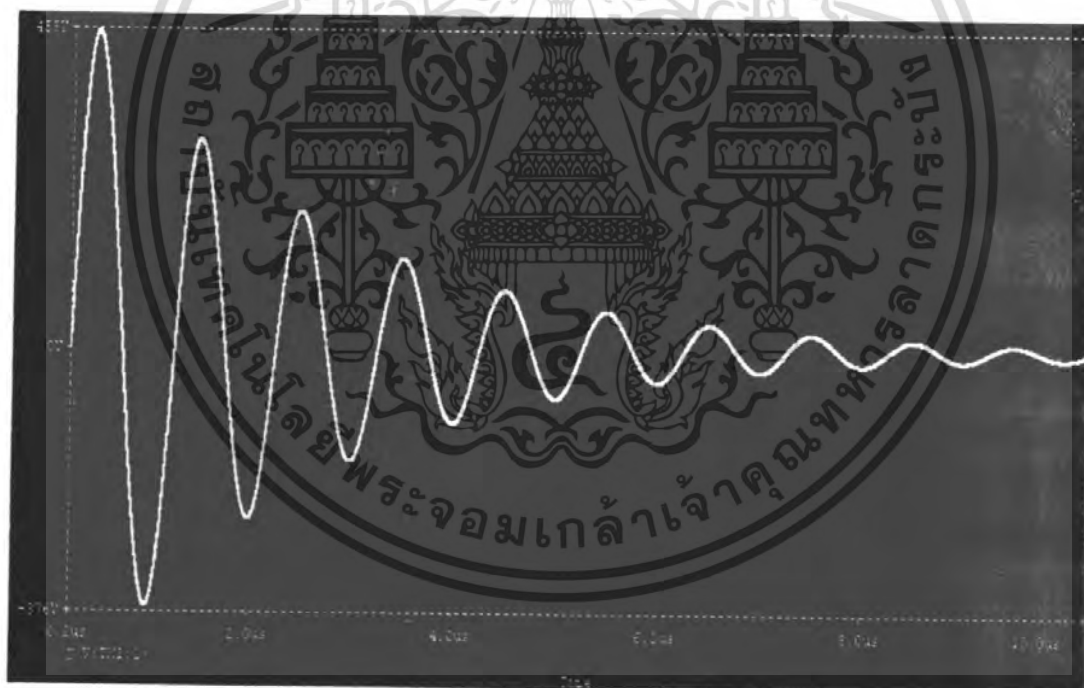
- ตัวเก็บประจุพลังงาน  $C_1 = 2 \mu F$
- แรงดันอัดประจุ  $C_1 = 610 VDC$
- switch time close = 0 s
- ค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าด้านแรงต่ำ  $L_1 = 12.66 nH$
- ค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าด้านแรงสูง  $L_2 = 11.4 \mu H$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-1 วงจรที่ใช้ในการจำลองสร้างรูปคลื่นสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

รูปคลื่นสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการจำลอง



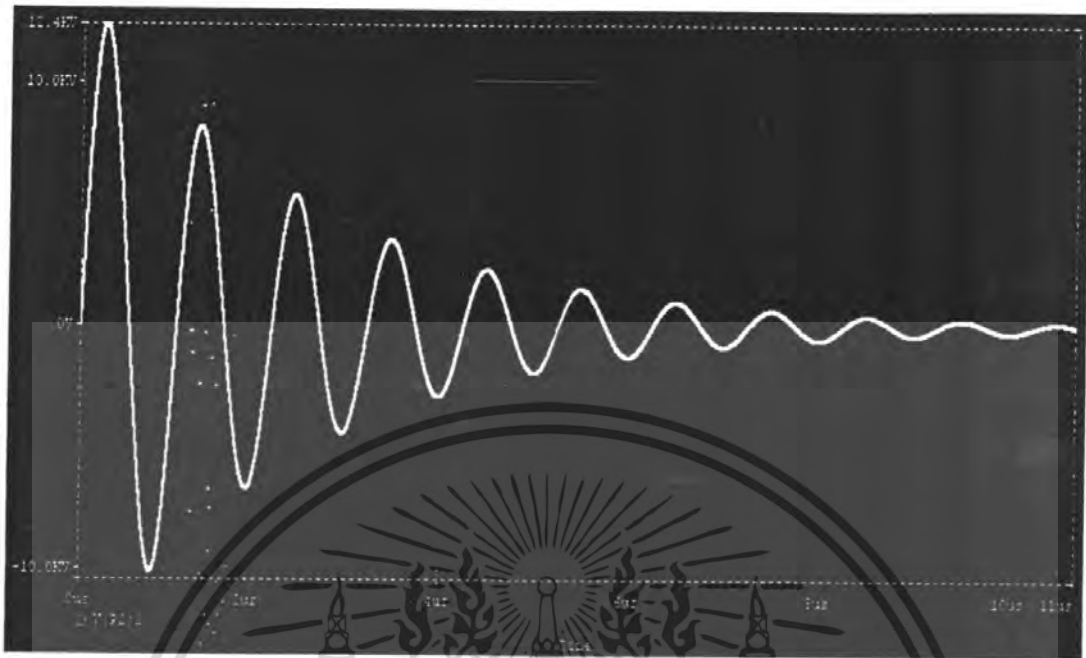
ก) รูปคลื่นเต็มซิงค์วัดได้จากค่านแรงต่ำ

ตารางที่ 4-1 ก ข้อมูลผลการจำลองรูปคลื่นเต็มซิงค์วัดได้จากค่านแรงต่ำ

|                   |           |
|-------------------|-----------|
| แรงดันค่ายอด      | 455 V     |
| ช่วงเวลาหน้าคลื่น | 240.36 ns |
| ช่วง 1 คาบเวลา    | 1 $\mu$ s |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### รูปคลื่นสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการจำลอง



ข) รูปคลื่นเต็มซึ่งวัดได้จากด้านแรงสูง

รูปที่ 4-2 ผลของการจำลองรูปคลื่นสัญญาณพัลส์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 4-1 ข ข้อมูลผลการจำลองรูปคลื่นเต็มซึ่งวัดได้จากด้านแรงสูง

|                   |            |
|-------------------|------------|
| แรงดันค่ายอด      | 12.414 kV  |
| ช่วงเวลาหน้าคลื่น | 240.047 ns |
| ช่วง 1 คาบเวลา    | 1 μs       |

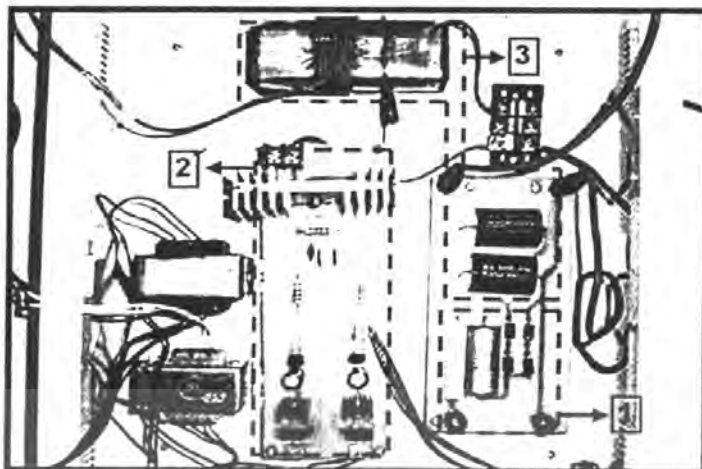
ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในหัวข้อ 4.1.1 จะเห็นได้ว่า รูปคลื่นสัญญาณพัลส์ที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับเงื่อนไขเริ่มต้นที่เราตั้งไว้ก่อนทำการออกแบบ ทั้งทางด้านแรงต่ำและด้านแรงสูง ที่ค่าพารามิเตอร์ตามที่ได้ทำการคำนวณไว้ในบทที่ 3

#### 4.1.2 ผลการทดสอบจริงที่วัดได้ด้วยออสซิลโลสโคปความถี่สูง

รูปภาพวงจรจริงที่ได้ทำการออกแบบและสร้าง ดังรูปที่ 4-3 และรูปคลื่นที่วัดได้จากการทดสอบนั้นแสดง ดังรูปที่ 4-4

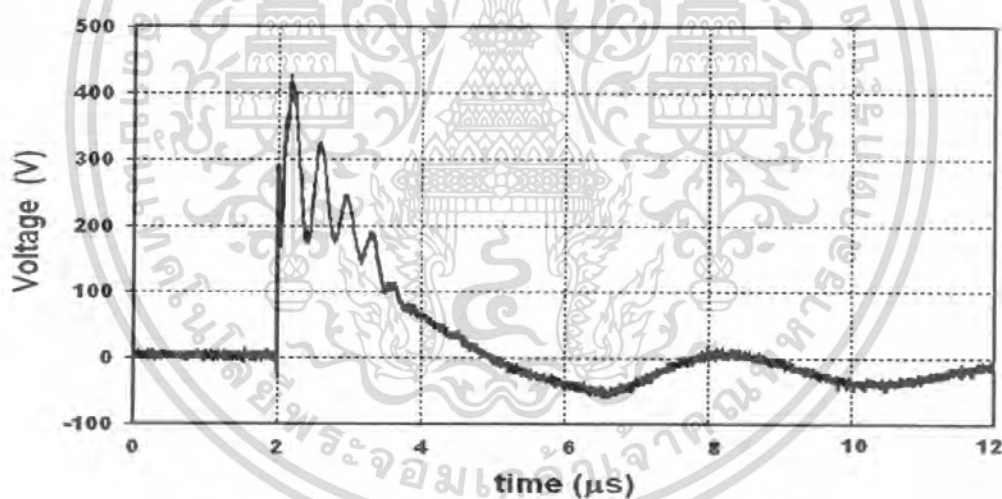
ข้อมูลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดูได้จากหัวข้อที่ 3.1 ในเรื่องการออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-3 วงจรกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1) ชุดวงจรทีวีแรงดัน 2) ชุดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ 3) ชุดกำเนิดแรงดันสูง

รูปคลื่นสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการทดสอบ



ก) รูปคลื่นเต็มซึ่งวัดได้จากด้านแรงต่ำ

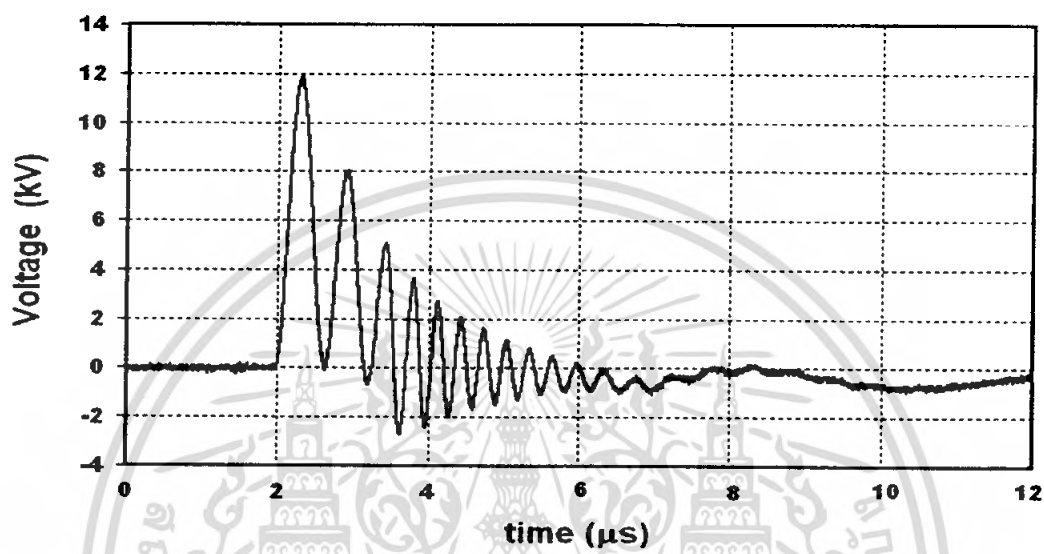
ตารางที่ 4-2 ก ข้อมูลผลการทดสอบรูปคลื่นเต็มซึ่งวัดได้จากด้านแรงต่ำ

|                   |              |
|-------------------|--------------|
| แรงดันค่ายอด      | 430 V        |
| ช่วงเวลาหน้าคลื่น | 210 ns       |
| ช่วง 1 คาบเวลา    | 0.85 $\mu$ s |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4-4 ก) จะเห็นว่ามีความถี่ที่เกิดขึ้นทั้งหมด 2 ความถี่ คือความถี่ทางด้านแรงต่ำและความถี่ทางด้านแรงสูงซึ่งทับซ้อนกันอยู่ ซึ่งมาจากการแกว่ง (Oscillation) ของกระแสทางด้านแรงต่ำที่นำไปสู่การทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นทางด้านแรงสูง

รูปคลื่นสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการทดสอบ



ข) รูปคลื่นเต็มซึ่งวัดได้จากด้านแรงสูง

รูปที่ 4-4 ผลของการทดสอบรูปคลื่นสัญญาณพัลส์ที่วัดได้ด้วยออสซิลโลสโคปความถี่สูง

ตารางที่ 4-2 ข ข้อมูลผลการทดสอบรูปคลื่นเต็มซึ่งวัดได้จากด้านแรงสูง

|                   |        |
|-------------------|--------|
| แรงดันค่ายอด      | 12 kV  |
| ช่วงเวลาหน้าคลื่น | 250 ns |
| ช่วง 1 คาบเวลา    | 1 μs   |

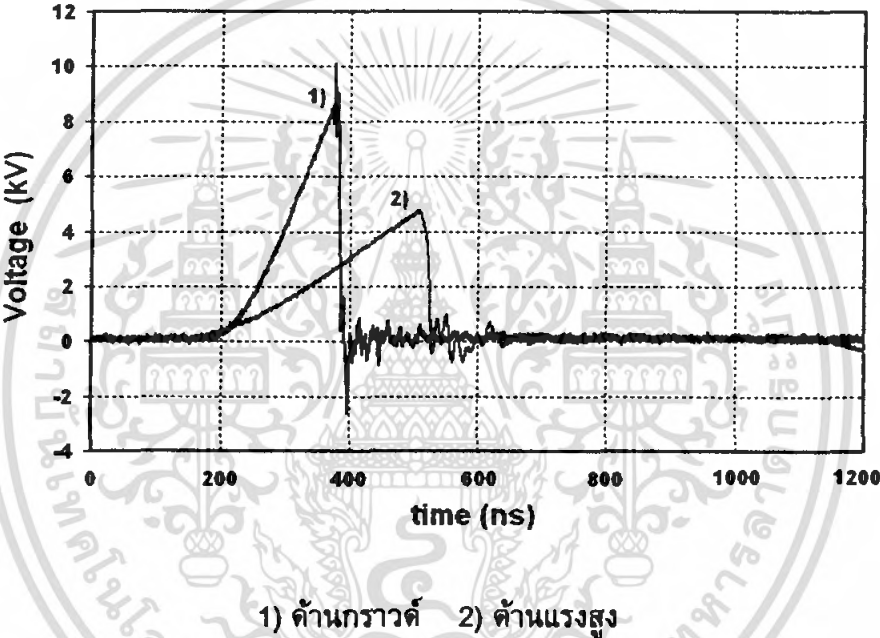
จากผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่า ถึงแม้ลักษณะรูปร่างของรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ กับการทดสอบจริงนั้นจะแตกต่างกันไปบ้าง แต่ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการพิจารณา คือ แรงดันค่ายอด และช่วงเวลาหน้าคลื่น ซึ่งจากข้อมูลในตารางทั้ง 2 การทดสอบนั้นจะเห็นได้ว่า ข้อมูลที่ได้มีความใกล้เคียงกัน เพราะฉะนั้นจึงสามารถเป็นการยืนยันหลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้เป็นอย่างดี

4.1.3 ผลการทดสอบรูปคลื่นตัดซึ่งเกิดจากการจุดสปาร์กแกป

การทดสอบในหัวข้อนี้ ได้นำชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ออกแบบและสร้าง ทำการต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เพื่อทดสอบการจุดสปาร์กแกป โดยแบ่งตามลักษณะการต่อออกเป็น 2 แบบ คือ

- 1. เมื่อต่อชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เข้าที่ด้านแรงสูง
- 2. เมื่อต่อชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เข้าที่ด้านกราวด์

รูปคลื่นสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 4-5 รูปคลื่นตัดซึ่งเกิดจากการจุดสปาร์กแกป

ตารางที่ 4-3 ข้อมูลผลการทดสอบรูปคลื่นตัดซึ่งเกิดจากการจุดสปาร์กแกปทั้ง 2 ด้าน

|                            | ด้านกราวด์ | ด้านแรงสูง |
|----------------------------|------------|------------|
| ค่าแรงดันที่ใช้ในการสปาร์ก | 9.1 kV     | 4.8 kV     |
| ช่วงเวลาที่ใช้ในการสปาร์ก  | 170 ns     | 300 ns     |

จากผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่า การจุดสปาร์กแกปทางด้านกราวด์จะใช้เวลาน้อยกว่าการจุดสปาร์กแกปด้านแรงสูง รวมถึงค่าแรงดันในการสปาร์กที่ใช้จะสูงกว่า นั่นเป็นเพราะการจุดสปาร์กแกปด้านกราวด์ไม่ต้องมีองค์ประกอบความต้านทาน  $R_t$  และเก็บประจุ  $C_t$  (trigatron capacitor) เข้ามาต่อในวงจร จึงใช้เวลาในการสปาร์กแกปที่น้อยกว่าด้านแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อวิเคราะห์ช่วงกระตุ้นสปาร์กได้

ช่วงการกระตุ้นสปาร์กได้ (Trigger range) ถือเป็นลักษณะสมบัติที่สำคัญของชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ผลการทดสอบโดยใช้ชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นกับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 200 kV 5 kJ ที่มีสปาร์กแกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 ซม. โดยการปรับระยะแกปที่ค่าต่าง ๆ ตั้งแต่ 3 มม. ถึง 36 มม. ซึ่งทดสอบทั้งแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกและชั่วลบ โดยค่าเปอร์เซ็นต์ช่วงการเริ่มต้นทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันตลอดช่วงแรงดันอัดประจุระหว่าง 5-90 kV หาได้จากสูตรการคำนวณที่ 4-1

$$\frac{(\text{ขีดจำกัดบน} - \text{ขีดจำกัดล่าง})}{\text{ขีดจำกัดบน}} \times 100\% \tag{4-1}$$

โดยก่อนการทดสอบได้มีการบันทึกค่าพลาพเตอร์ต่างๆในห้องทดสอบ ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิ (t) = 28 °C, ความดันบรรยากาศ (p) = 765 mm.Hg และค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (h) = 73 %

4.2.1 ทดสอบที่แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก  
ตารางที่ 4-4 ก) แรงดันเบรกควานส์ถิติ

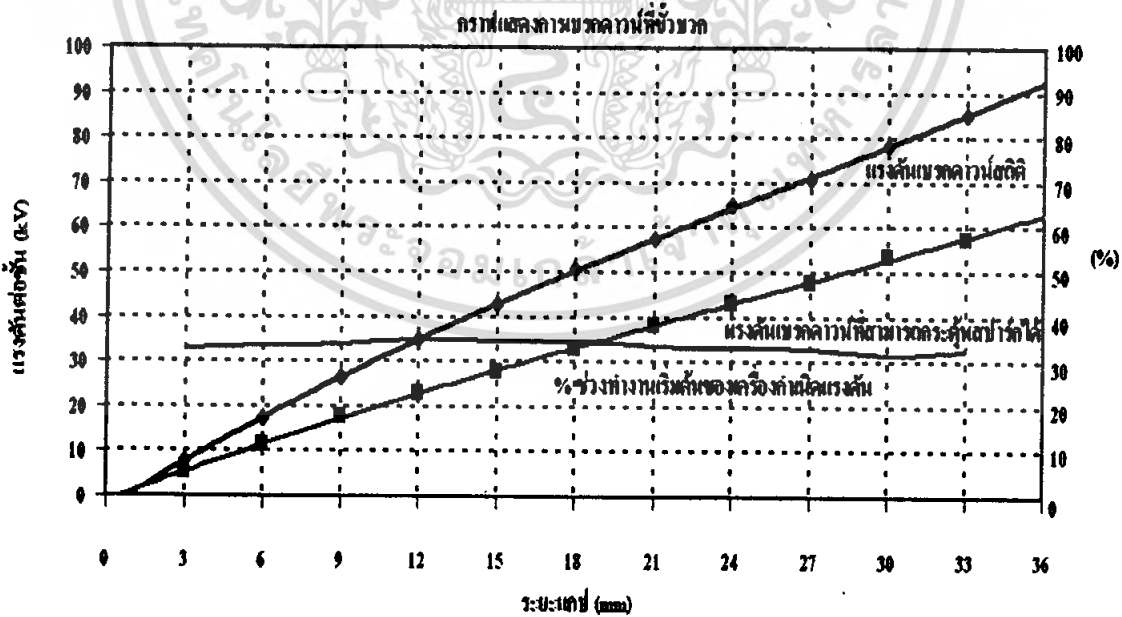
| ระยะแกป(mm) | แรงดัน (kV) |           |           |           |
|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
|             | ครั้งที่1   | ครั้งที่2 | ครั้งที่3 | ค่าเฉลี่ย |
| 3           | 7.8         | 7.8       | 7.7       | 7.77      |
| 6           | 17.1        | 18        | 17.3      | 17.47     |
| 9           | 26.7        | 26.7      | 26.5      | 26.63     |
| 12          | 35.1        | 35.6      | 34.7      | 35.13     |
| 15          | 42.9        | 42.7      | 42.6      | 42.73     |
| 18          | 50.8        | 50.4      | 50.6      | 50.60     |
| 21          | 57.1        | 57.8      | 57.5      | 57.47     |
| 24          | 65.1        | 65.1      | 64.8      | 65.00     |
| 27          | 71.4        | 71.5      | 69.8      | 70.90     |
| 30          | 78.2        | 78.6      | 78.7      | 78.50     |
| 33          | 85.4        | 85.4      | 85.4      | 85.40     |
| 36          | 92.4        | 93.45     | 93        | 92.61     |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-4 ข) แรงดันเบรกคาวร์ที่สามารถกระตุ่นสปาร์กได้

| ระยะแก๊ป (mm) | แรงดัน (kV) |
|---------------|-------------|
| 3             | 5.2         |
| 6             | 11.6        |
| 9             | 17.6        |
| 12            | 22.9        |
| 15            | 27.9        |
| 18            | 33          |
| 21            | 38.2        |
| 24            | 43.3        |
| 27            | 47.6        |
| 30            | 53.7        |
| 33            | 57.6        |
| 36            | 62.9        |

จากนั้นนำค่าที่ได้ในตารางมาพล็อตกราฟ เพื่อหาช่วงการกระตุ่นสปาร์กได้ และค่าเปอร์เซ็นต์ช่วงการเริ่มต้นทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ จะได้ดังรูปที่ 4-6



รูปที่ 4-6 กราฟความสัมพันธ์ที่ชั่ววอก ของค่าแรงดันอัดประจุที่เกิดจากค่าแรงดันเบรกคาวร์สถิตี ค่าแรงดันเบรกคาวร์ที่สามารถกระตุ่นสปาร์กได้ และ % ช่วงทำงานเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ทดสอบที่แรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ  
ตารางที่4-5 ก) แรงดันเบรกดาวนส์ถิตติ

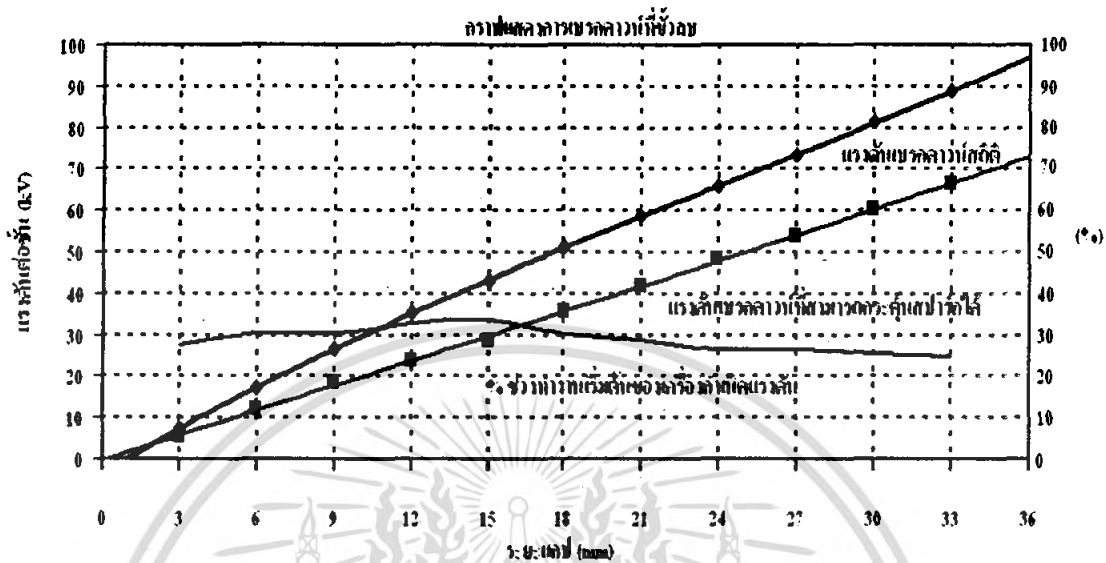
| ระยะแกป<br>(mm) | แรงดัน (kV) |           |           |           |
|-----------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
|                 | ครั้งที่1   | ครั้งที่2 | ครั้งที่3 | ค่าเฉลี่ย |
| 3               | 7.2         | 7.7       | 7.5       | 7.47      |
| 6               | 17.2        | 17.3      | 17.3      | 17.27     |
| 9               | 26.5        | 26.6      | 26.7      | 26.60     |
| 12              | 35.5        | 35.4      | 35.5      | 35.47     |
| 15              | 43.4        | 43.4      | 42.8      | 43.20     |
| 18              | 51.2        | 51.2      | 51.3      | 51.23     |
| 21              | 58.9        | 59        | 58.5      | 58.80     |
| 24              | 65.8        | 66.1      | 66        | 65.97     |
| 27              | 73.4        | 73.6      | 73.6      | 73.53     |
| 30              | 81.7        | 81        | 81.6      | 81.43     |
| 33              | 89.1        | 88.6      | 88.8      | 88.83     |
| 36              | 96.5        | 96.84     | 96.86     | 96.73     |

ตารางที่4-5 ข) แรงดันเบรกดาวนส์ที่สามารถกระตุ้นสปาร์กได้

| ระยะแกป (mm) | แรงดัน (kV) |
|--------------|-------------|
| 3            | 5.4         |
| 6            | 12          |
| 9            | 18.5        |
| 12           | 23.8        |
| 15           | 28.6        |
| 18           | 35.8        |
| 21           | 41.8        |
| 24           | 48.3        |
| 27           | 54          |
| 30           | 60.5        |
| 33           | 66.5        |
| 36           | 72.4        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำค่าที่ได้ในตารางมาพล็อตกราฟ เพื่อหาช่วงการกระตุ้นสปาร์กได้ และค่าเปอร์เซ็นต์ช่วงการเริ่มต้นทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ จะได้ดังรูปที่ 4-7



รูปที่ 4-7 กราฟความสัมพันธ์ที่ซับซ้อน ของค่าแรงดันอัดประจุที่เกิดจากค่าแรงดันเบรกควาร์นสถิติต่อค่าแรงดันเบรกควาร์นที่สามารถกระตุ้นสปาร์กได้ และ % ช่วงทำงานเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

จากการทดสอบในหัวข้อที่ 4.2 สามารถสรุปได้ว่า ชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นนั้น มีช่วงเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ประมาณ 25 - 35 % ของแรงดันอัดประจุ ตลอดช่วงแรงดันอัดประจุระหว่าง 5 -90 kV ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ

4.3 การทดสอบตู้ควบคุมแรงดันอัดประจุ

การทดสอบจะเป็นการนำตู้ควบคุมแรงดันอัดประจุที่ได้ทำการประกอบสร้างจริงต่อเข้ากับหม้อแปลงของชุดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 200 kV 5 kJ เพื่อทดสอบดูการขึ้น-ลงแรงดันอัดประจุจริง ซึ่งจากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1. การปรับระดับแรงดันเพิ่มขึ้นหรือลดลงของตู้ควบคุมแรงดันที่ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้าง สามารถใช้ได้ดี ไม่มีปัญหาแต่อย่างใด
- 2. ก่อนกดปุ่มทริกเกอร์เพื่อคายแรงดันอัดประจุ จะต้องลดแรงดันที่ Variac ลงให้สุดก่อน จึงจะทำการกดทริกเกอร์ได้
- 3. ค่าแสดงผลการวัดระยะแกปที่ดิจิตอลมิเตอร์ สามารถแสดงค่าที่ออกมาได้อย่างถูกต้อง
- 4. เมื่อกดปุ่ม Emergency แมกเนติกคอนแทกเตอร์จะตัดกำลังที่ป้อนเข้าหม้อแปลง Variac ออกทันที

## บทที่ 5

### สรุปและวิเคราะห์ผล

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงานในโครงการ

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 kV 5 kJ ที่ได้เข้ามาทำการปรับปรุงและศึกษานั้น ได้พบปัญหาต่างๆที่นำไปสู่การออกแบบชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ และชุดควบคุมแรงดันอัดประจุ โดยก่อนการออกแบบนั้นจะต้องมีการศึกษาข้อมูลของชุดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ดังกล่าวอย่างละเอียดเสียก่อน และต้องตั้งเงื่อนไขคุณสมบัติของชุดที่จะออกแบบใหม่ เพื่อให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับชุดเก่าที่เสียไป ที่สำคัญต้องให้สอดคล้องกับงบประมาณและสามารถนำไปติดตั้งใช้งานได้จริงกับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เครื่องดังกล่าวอีกด้วย

ชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นนั้น จะใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวควบคุมการทำงาน ซึ่งสวิตช์ระยะไกลที่บังคับนั้นจะช่วยสร้างความปลอดภัยให้กับผู้ทำการทดสอบเมื่อเกิดความผิดพลาดใดๆขึ้นในชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งมีข้อดีกว่าการใช้ชุดรีเลย์เป็นสวิตช์ควบคุมซึ่งจะใช้เวลาในการสวิตช์ซึ่งที่สูงกว่ามากและจะเกิดปัญหาการอาร์คขึ้นที่หน้าสัมผัสตัวรีเลย์เมื่อทำการสวิตช์ซึ่งที่แรงดันสูงๆ ทำให้รูปคลื่นที่วัดได้ไม่มีความคงที่เมื่อเปรียบเทียบกับจากการสวิตช์ซึ่งในแต่ละครั้ง โดยในส่วนของหม้อแปลงความถี่สูงนั้นจะใช้ไมลาร์เป็นฉนวนกันช่อนระหว่างขดลวดแต่ละชั้น ด้วยน้ำหนักที่เบาของฉนวนไมลาร์นั้น จะทำให้สะดวกในการเคลื่อนย้าย และบำรุงรักษาได้ง่ายกว่าการใช้น้ำมันเป็นฉนวน

ในส่วนการออกแบบและสร้างชุดควบคุมแรงดันอัดประจุเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ จะประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆที่สามารถหาซื้อได้จากบริษัทที่จำหน่ายภายในประเทศทั้งหมด งานวิจัยออกแบบจะใช้เทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ในแขนงวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง และทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้าด้วยกัน การออกแบบจะออกแบบในลักษณะการประยุกต์ใช้ตัวอุปกรณ์ให้น้อย วงจรจะต้องมีขนาดเล็กที่สุด ด้วยเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่เข้ามาเกี่ยวข้องจึงทำให้สามารถพัฒนาได้ต่อไป อย่างไม่หยุดยั้ง

ส่วนการออกแบบและสร้างชุดควบคุมแรงดันอัดประจุนั้น ต้องตั้งเงื่อนไขที่มีระบบป้องกันที่ปลอดภัยทั้งตัวผู้ปฏิบัติงานและตัวอุปกรณ์ ส่วนการทดสอบเมื่อทำการประกอบสร้างเสร็จแล้วนั้น จะได้ผลที่ตรงกับเงื่อนไขที่ได้ตั้งไว้ก่อนการออกแบบในบทที่ 3 ซึ่งเงื่อนไขในการออกแบบสามารถขยายให้มีความหลากหลายมากขึ้นอีกได้ ทั้งการตั้งสวิตช์ประจุนิรภัย และเงื่อนไขการมีสัญญาณเตือนก่อนกดปุ่มทริกเกอร์ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นต้องคิดถึงงบประมาณและจุดประสงค์การใช้งานที่แท้จริง แต่จากแนวคิดดังกล่าวจึงสามารถพัฒนาชิ้นงานให้มีความหลากหลายในเงื่อนไขได้มากขึ้นในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 อุปสรรคและวิธีการแก้ไขในโครงการ

อุปสรรคในการดำเนินงาน คือการต้องตั้งเงื่อนไขและคุณสมบัติของชุดกำเนิดสัญญาณ เริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ และชุดควบคุมแรงดันอัดประจุ ที่จะต้องให้สอดคล้องและเหมาะสมกับการใช้งานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ดังกล่าว และต้องมีการศึกษาข้อมูลชุดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ชุดดังกล่าวอย่างละเอียด เพื่อให้เมื่อนำไปสร้างและติดตั้งใช้งานจริง จะได้ไม่เกิดปัญหขึ้น ขณะใช้งาน และไม่เกิดอันตรายกับผู้ปฏิบัติงาน โดยจะต้องสร้างเงื่อนไขและคุณสมบัติที่น่าเชื่อถือได้สำหรับการออกแบบ

ซึ่งช่วงระหว่างการทำงานวิจัยนั้น ได้เกิดปัญหาและอุปสรรคขึ้นในการทำงานดังนี้

1) แกนเหล็กที่จะนำมาใช้ในการทำแกนหม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งได้ทำการทดลองใช้วัสดุหลายแบบและทดลองหลายชนิดมาทำการสร้างดู เพื่อให้ได้ขนาดค่ายอดแรงดันและความเสถียรภาพของหม้อแปลงที่ดีที่สุด โดยผลที่ได้เราได้ใช้แกนเฟอร์ไรต์ชิ้นเล็กๆหลายๆอันมาต่อเข้าด้วยกันให้เป็นแกนเฟอร์ไรต์ U และ I ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จากนั้นนำมาประกบกันจะได้เป็นแกน UI เพื่อนำมาใช้เป็นแกนหม้อแปลงความถี่สูง

2) ปัญหาการเลือกใช้ตัวนำที่จะนำมาใช้พันเป็นขดลวดเข้ากับแกนความถี่สูง จากการสร้างได้ทดลองใช้สายตัวนำหลายแบบซึ่ง เมื่อพันแล้วปัญหาที่เกิดขึ้น คือเกิดการเบรกดาวขึ้นในขดลวดที่ทำการพัน เนื่องมาจากฉนวนของสายไม่สามารถทนกับแรงดันที่เกิดขึ้นได้ จนในที่สุดเราจึงได้ใช้ขดลวดฉนวนไฟฟ้าแรงสูงในการพัน เพราะจะไม่เกิดการเบรกดาวขึ้นภายในขดลวดที่พัน

3) การเลือกใช้อุปกรณ์ Electronic ประเภทอุปกรณ์แบบสวิตชิงเพื่อมาเป็นตัวสวิตซ์ซึ่งในวงจร ในการสร้างนั้นเราได้เลือกใช้ IGBT มาเป็นตัวสวิตซ์ซึ่งภายในวงจร เนื่องจาก IGBT มีเวลาในการสวิตซ์ซึ่งที่ไวและมีค่าสูญเสียในขณะสวิตซ์ซึ่งน้อย แต่มีปัญหาในเรื่องของระยะเวลา เพราะถ้าใช้ไปนานๆอาจเกิดการชำรุดเสียหายต้องเปลี่ยนใหม่

4) อุปสรรคที่ต้องแก้ไขปัญหามาเนื่องจากคิรจิคอลมีเตอร์วัดแรงดันอัดประจุ ไม่สามารถวัดค่าที่เข้ามาเป็นลบได้โดยตรง จึงแก้ไขโดยการต่อ แรงดันไฟคงที่ที่ 15 VDC แล้วตั้งให้มิเตอร์อ่านค่าเป็น 0 Volt แทนซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาคได้

## 5.3 บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

จากการทดสอบชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในเบื้องต้น ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ จึงได้เขียนบทความวิชาการเข้าร่วมการประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30 ที่ โรงแรมเฟลิกซ์ริเวอร์แควรีสอร์ท จ.กาญจนบุรี โดยบทความดังกล่าวได้รับการตอบรับให้นำไปเสนอเรียบเรียงแล้ว รายละเอียดของบทความแสดงในภาคผนวก ก

## รายการอ้างอิง

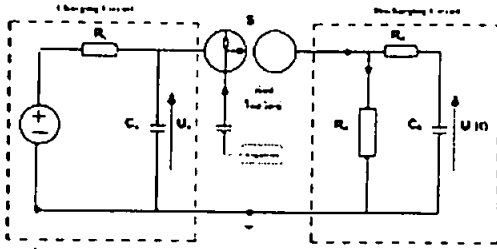
- [1] **IEC 71-1**, Insulation Co-ordination, Part 1, Definitions, principles and rules, seventh edition. 1999-12.
- [2] **สำราญ สังข์สะอาด, รายงานผลการประดิษฐ์ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 400 kV 1000J, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, มีนาคม 2536.**
- [3] **ดร.สำราญ สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, มีนาคม 2549.**
- [4] **มนตรี ไทยมานะ, สันติ สุวิชาญวรสิน, การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 3 ชั้น 300 กิโลโวลต์ 3 กิโลจูล, ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.**
- [5] **ชนันท์ หนูสุวรรณ, การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ ขนาด 800 V, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.**
- [6] **E. KUFFEL, W.S. ZANEGL, HIGH-VOLTAGE ENGINEERING Fundamentals, PERGAMON PRESS 1984.**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

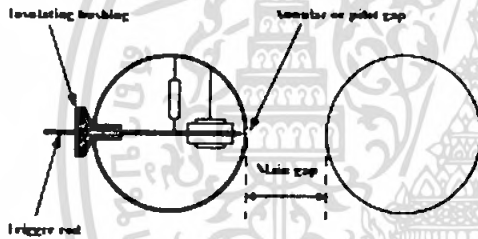


## บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ (ต่อ)



รูปที่ 1 การวัดค่าแรงดันเปิดวงจรของแหล่งกำเนิดแรงดันด้วยวิธีแบ่งแรงดัน

- เมื่อ  $U$  = แรงดันเปิดวงจรของแหล่งกำเนิด  
 $C$  = ตัวเก็บประจุที่มีค่าเป็นค่าที่แน่นอน  
 $C$  = โหลดที่นำมาประจุ  
 $R$  = ความต้านทานของตัวเก็บประจุ  
 $R$  = ความต้านทานของตัวนำเป็นค่าที่แน่นอน  
 $R$  = ความต้านทานของตัวนำเป็นค่าที่แน่นอน  
 $U(t)$  = แรงดันเปิดวงจรที่เปลี่ยนแปลงไป  
 $S$  = สวิตช์



รูปที่ 2 วิธีวัดแรงดันเปิดวงจร

### 3. การออกแบบและสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอินพุต

จุดประสงค์ของงานวิจัยคือการสร้างวงจรกำเนิดแรงดันอินพุตที่สามารถใช้งานได้จริง โดยใช้วิธีวัดแรงดันเปิดวงจรของแหล่งกำเนิดแรงดันด้วยวิธีแบ่งแรงดัน ซึ่งวิธีนี้จะช่วยให้สามารถวัดแรงดันเปิดวงจรของแหล่งกำเนิดแรงดันได้อย่างแม่นยำ โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือวัดแรงดันที่แพงเกินไป ซึ่งวิธีนี้จะช่วยให้สามารถวัดแรงดันเปิดวงจรของแหล่งกำเนิดแรงดันได้อย่างแม่นยำ โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือวัดแรงดันที่แพงเกินไป ซึ่งวิธีนี้จะช่วยให้สามารถวัดแรงดันเปิดวงจรของแหล่งกำเนิดแรงดันได้อย่างแม่นยำ โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือวัดแรงดันที่แพงเกินไป

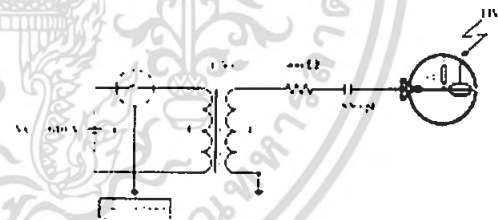
แรงดันอินพุตที่ใช้ในการออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันอินพุตจะวัดแรงดันเปิดวงจรของแหล่งกำเนิดแรงดันด้วยวิธีแบ่งแรงดัน ซึ่งวิธีนี้จะช่วยให้สามารถวัดแรงดันเปิดวงจรของแหล่งกำเนิดแรงดันได้อย่างแม่นยำ โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือวัดแรงดันที่แพงเกินไป ซึ่งวิธีนี้จะช่วยให้สามารถวัดแรงดันเปิดวงจรของแหล่งกำเนิดแรงดันได้อย่างแม่นยำ โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือวัดแรงดันที่แพงเกินไป

#### 3.1 การออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันอินพุต

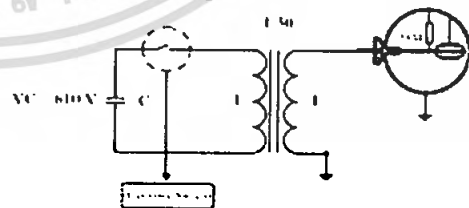
วงจรกำเนิดแรงดันอินพุตจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันอินพุตและตัวเก็บประจุที่มีค่าเป็นค่าที่แน่นอน ซึ่งวิธีนี้จะช่วยให้สามารถวัดแรงดันเปิดวงจรของแหล่งกำเนิดแรงดันได้อย่างแม่นยำ โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือวัดแรงดันที่แพงเกินไป ซึ่งวิธีนี้จะช่วยให้สามารถวัดแรงดันเปิดวงจรของแหล่งกำเนิดแรงดันได้อย่างแม่นยำ โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือวัดแรงดันที่แพงเกินไป

แรงดันอินพุตที่ใช้ในการออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันอินพุตจะวัดแรงดันเปิดวงจรของแหล่งกำเนิดแรงดันด้วยวิธีแบ่งแรงดัน ซึ่งวิธีนี้จะช่วยให้สามารถวัดแรงดันเปิดวงจรของแหล่งกำเนิดแรงดันได้อย่างแม่นยำ โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือวัดแรงดันที่แพงเกินไป ซึ่งวิธีนี้จะช่วยให้สามารถวัดแรงดันเปิดวงจรของแหล่งกำเนิดแรงดันได้อย่างแม่นยำ โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือวัดแรงดันที่แพงเกินไป

พหุคูณของแรงดันอินพุตจะวัดแรงดันเปิดวงจรของแหล่งกำเนิดแรงดันด้วยวิธีแบ่งแรงดัน ซึ่งวิธีนี้จะช่วยให้สามารถวัดแรงดันเปิดวงจรของแหล่งกำเนิดแรงดันได้อย่างแม่นยำ โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือวัดแรงดันที่แพงเกินไป ซึ่งวิธีนี้จะช่วยให้สามารถวัดแรงดันเปิดวงจรของแหล่งกำเนิดแรงดันได้อย่างแม่นยำ โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือวัดแรงดันที่แพงเกินไป



รูปที่ 3 การวัดค่าแรงดันเปิดวงจรของแหล่งกำเนิดแรงดันด้วยวิธีแบ่งแรงดัน



รูปที่ 4 การวัดค่าแรงดันเปิดวงจรของแหล่งกำเนิดแรงดันด้วยวิธีแบ่งแรงดัน

#### รูปที่ 5 วงจรกำเนิดแรงดันอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





ภาคผนวก ข  
ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PC50U

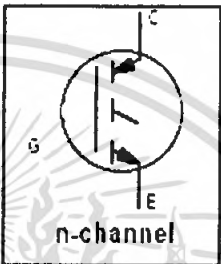
International  
**IR** Rectifier

PD 91470F  
**IRG4PC50U**  
UltraFast Speed IGBT

INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR

Features

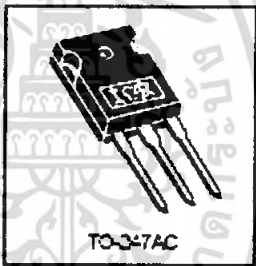
- UltraFast: Optimized for high operating frequencies 6-40 kHz in hard switching, >200 kHz in resonant mode
- Generation 4 IGBT design provides tighter parameter distribution and higher efficiency than Generation 3
- Industry standard TO-247AC package



|                             |
|-----------------------------|
| $V_{CE(s)} = 600V$          |
| $V_{CE(on)}(typ.) = 1.65V$  |
| @ $V_{GE} = 15V, I_C = 27A$ |

Benefits

- Generation 4 IGBT's offer highest efficiency available
- IGBT's optimized for specific application conditions
- Designed to be a 'drop-in' replacement for equivalent industry-standard Generation 3 IR IGBT's



Absolute Maximum Ratings

|                            | Parameter                                        | Max.                              | Units       |
|----------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------|
| $V_{CES}$                  | Collector-to-Emitter Breakdown Voltage           | 600                               | V           |
| $I_C @ T_C = 25^{\circ}C$  | Continuous Collector Current                     | 27                                | A           |
| $I_C @ T_C = 100^{\circ}C$ | Continuous Collector Current                     | 27                                |             |
| $I_{CV}$                   | Pulsed Collector Current $\Delta$                | 200                               |             |
| $I_{LM}$                   | Clamped Inductive Load Current $\Delta$          | 220                               |             |
| $V_{GE}$                   | Gate-to-Emitter Voltage                          | $\pm 20$                          | V           |
| $E_{ASV}$                  | Reverse Voltage Avalanche Energy $\Delta$        | 26                                | mJ          |
| $P_D @ T_C = 25^{\circ}C$  | Maximum Power Dissipation                        | 200                               | W           |
| $P_D @ T_C = 100^{\circ}C$ | Maximum Power Dissipation                        | 78                                |             |
| $T_J, T_{STG}$             | Operating Junction and Storage Temperature Range | $-55$ to $+150$                   | $^{\circ}C$ |
|                            | Soldering Temperature, for 10 seconds            | 300 (0.063 in. (1.6mm) from case) |             |
|                            | Mounting torque 6-32 or M3 screw                 | 10 in-lb (1.1N-m)                 |             |

Thermal Resistance

|          | Parameter                                 | Typ.     | Max. | Units         |
|----------|-------------------------------------------|----------|------|---------------|
| $R_{JC}$ | Junction-to-Case                          | ---      | 0.64 | $^{\circ}C/W$ |
| $R_{CS}$ | Case-to-Sink Flat, Gressed Surface        | 0.24     | ---  |               |
| $R_{JA}$ | Junction-to-Ambient, typical socket mount | ---      | 40   |               |
| Wt       | Weight                                    | 6 (0.21) | ---  | g (oz)        |

www.irf.com

1  
12-30-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PC50U (ต่อ)

### IRG4PC50U

International  
IGBT Rectifier

Electrical Characteristics @  $T_J = 25^\circ\text{C}$  (unless otherwise specified)

|                                | Parameter                               | Min. | Typ. | Max.       | Units   | Conditions                                                                                                      |
|--------------------------------|-----------------------------------------|------|------|------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $V_{BR/CE}$                    | Collector-to-Emitter Breakdown Voltage  | 200  | ---  | ---        | V       | $V_{GE} = 0V, I_C = 250\mu A$                                                                                   |
| $V_{BR/EC}$                    | Emitter-to-Collector Breakdown Voltage  | 15   | ---  | ---        | V       | $V_{CE} = 0V, I_E = 10A$                                                                                        |
| $\Delta V_{BR/CE}/\Delta T_J$  | Temperature Coeff. of Breakdown Voltage | ---  | 0.00 | ---        | V/°C    | $V_{GE} = 0V, I_C = 1.0mA$                                                                                      |
| $V_{CE(sat)}$                  | Collector-to-Emitter Saturation Voltage | ---  | 1.85 | 2.0        | V       | $I_C = 27A, V_{GE} = 15V$<br>$I_C = 55A, V_{GE} = 15V$<br>$I_C = 27A, T_J = 150^\circ\text{C}$<br>See Fig. 2, 5 |
| $V_{GE(th)}$                   | Gate Threshold Voltage                  | 3.0  | 1.0  | 2.0        | V       | $V_{CE} = V_{GE}, I_C = 250\mu A$                                                                               |
| $\Delta V_{GE(th)}/\Delta T_J$ | Temperature Coeff. of Threshold Voltage | ---  | -13  | ---        | mV/°C   | $V_{CE} = V_{GE}, I_C = 250\mu A$                                                                               |
| $g_{fs}$                       | Forward Transconductance $g$            | 16   | 24   | ---        | S       | $V_{CE} \geq 15V, I_C = 27A$                                                                                    |
| $I_{C(su)}$                    | Turn-On Voltage Collector Current       | ---  | ---  | 250        | $\mu A$ | $V_{GE} = 0V, V_{CE} = 15V, T_J = 25^\circ\text{C}$                                                             |
| $I_{C(su)}$                    | Gate-to-Emitter Leakage Current         | ---  | ---  | 5000       | nA      | $V_{GE} = 0V, V_{CE} = 600V, T_J = 150^\circ\text{C}$                                                           |
| $I_{CES}$                      | Gate-to-Emitter Leakage Current         | ---  | ---  | $\pm 10^2$ | nA      | $V_{GE} = \pm 20V$                                                                                              |

Switching Characteristics @  $T_J = 25^\circ\text{C}$  (unless otherwise specified)

|           | Parameter                         | Min. | Typ. | Max. | Units | Conditions                      |
|-----------|-----------------------------------|------|------|------|-------|---------------------------------|
| $Q_g$     | Total Gate Charge (turn-on)       | ---  | 180  | 270  | nC    | $I_C = 27A$                     |
| $Q_{ge}$  | Gate - Emitter Charge (turn-on)   | ---  | 25   | 35   | nC    | $V_{CC} = 400V$<br>See Fig. 8   |
| $Q_{gc}$  | Gate - Collector Charge (turn-on) | ---  | 51   | 90   | nC    | $V_{GE} = 15V$                  |
| $t_{ON}$  | Turn-On Delay Time                | ---  | 32   | ---  | ns    | $T_J = 25^\circ\text{C}$        |
| $t_r$     | Rise Time                         | ---  | 20   | ---  | ns    | $I_C = 27A, V_{CC} = 450V$      |
| $t_{OFF}$ | Turn-Off Delay Time               | ---  | 170  | 280  | ns    | $V_{GE} = 15V, R_G = 5.0\Omega$ |
| $t_f$     | Fall Time                         | ---  | 50   | 130  | ns    | Energy losses include 'tail'    |
| $E_{on}$  | Turn-On Switching Loss            | ---  | 0.12 | ---  | mJ    | See Fig. 10, 11, 13, 14         |
| $E_{off}$ | Turn-Off Switching Loss           | ---  | 0.54 | ---  | mJ    |                                 |
| $E_s$     | Total Switching Loss              | ---  | 0.66 | 0.9  | mJ    |                                 |
| $t_{ON}$  | Turn On Delay Time                | ---  | 31   | ---  | ns    | $T_J = 150^\circ\text{C}$       |
| $t_r$     | Rise Time                         | ---  | 23   | ---  | ns    | $I_C = 27A, V_{CC} = 450V$      |
| $t_{OFF}$ | Turn-Off Delay Time               | ---  | 230  | ---  | ns    | $V_{GE} = 15V, R_G = 5.0\Omega$ |
| $t_f$     | Fall Time                         | ---  | 120  | ---  | ns    | Energy losses include 'tail'    |
| $E_s$     | Total Switching Loss              | ---  | 1.0  | ---  | mJ    | See Fig. 13, 14                 |
| $L_E$     | Internal Emitter Inductance       | ---  | 13   | ---  | nH    | Measured 8mm from package       |
| $C_{iss}$ | Input Capacitance                 | ---  | 4000 | ---  | pF    | $V_{GE} = 0V$                   |
| $C_{oss}$ | Output Capacitance                | ---  | 250  | ---  | pF    | $V_{CC} = 30V$<br>See Fig. 7    |
| $C_{res}$ | Reverse Transfer Capacitance      | ---  | 52   | ---  | pF    | $f = 1.0MHz$                    |

Notes:

- ① Repetitive rating;  $V_{GE} = 20V$ , pulse width limited by max. junction temperature. ( See fig. 13b )
- ②  $V_{CC} = 80\%(V_{CES})$ ,  $V_{GE} = 20V$ ,  $L = 10\mu H$ ,  $R_G = 5.0\Omega$  (See fig. 13a)
- ③ Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature.

- ④ Pulse width  $\leq 0.05\mu s$ ; duty factor  $\leq 0.1\%$ .
- ⑤ Pulse width  $5.0\mu s$ , single shot.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PC50U (ต่อ)

International  
IR Rectifier

IRG4PC50U

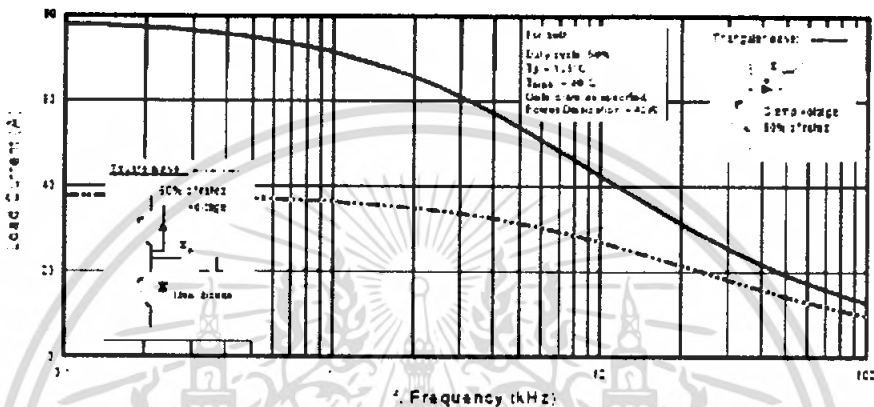


Fig. 1 - Typical Load Current vs. Frequency  
(For square wave,  $I_{avg}$  of fundamental; for triangular wave,  $I_{avg}$ )

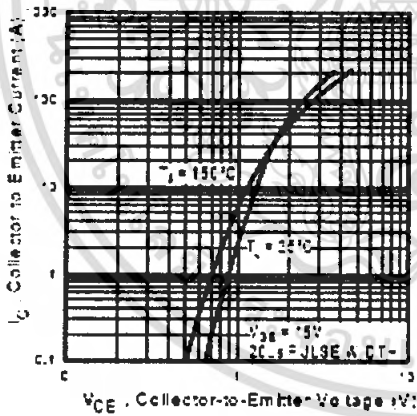


Fig. 2 - Typical Output Characteristics

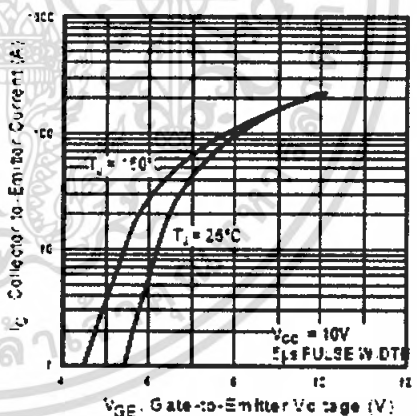


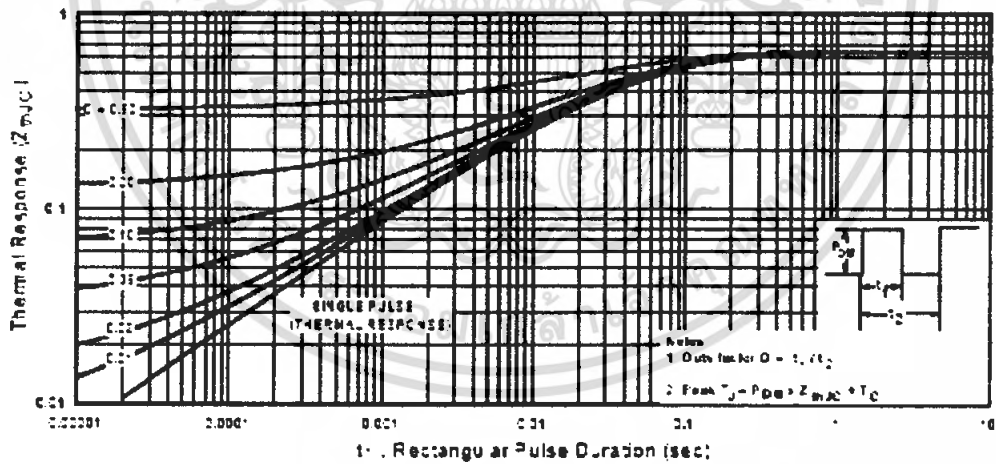
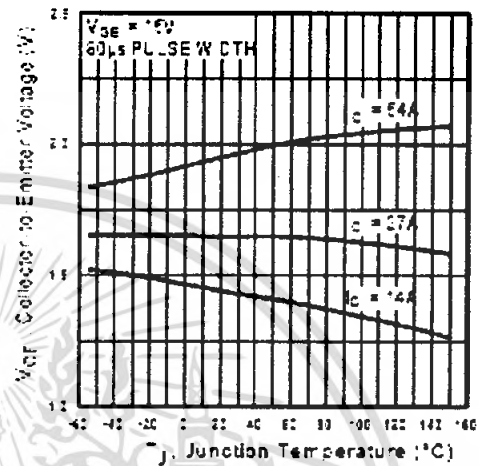
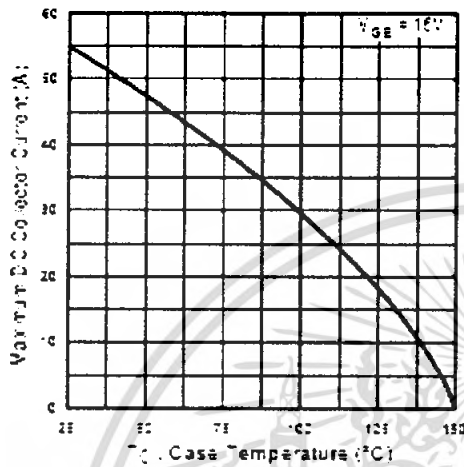
Fig. 3 - Typical Transfer Characteristics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PC50U (ต่อ)

## IRG4PC50U

International  
IR Rectifier



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PC50U (ต่อ)

International  
IR Rectifier

IRG4PC50U

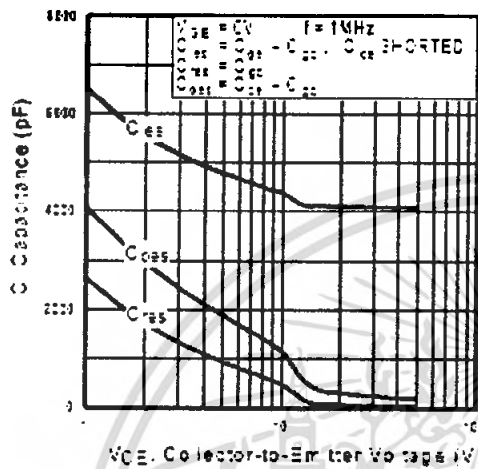


Fig. 7 - Typical Capacitance vs. Collector-to-Emitter Voltage

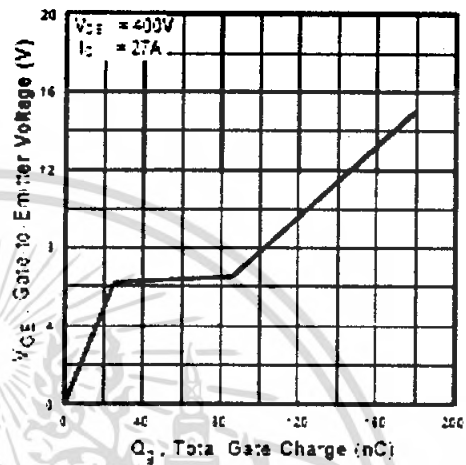


Fig. 8 - Typical Gate Charge vs. Gate-to-Emitter Voltage

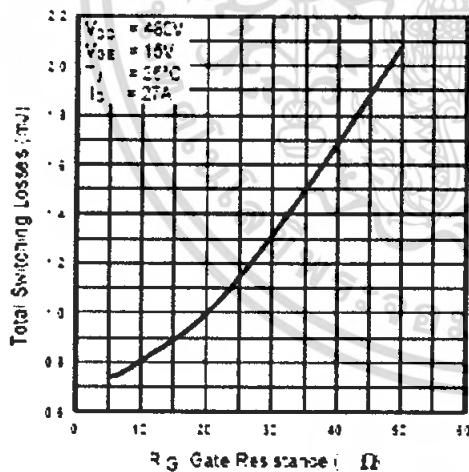


Fig. 9 - Typical Switching Losses vs. Gate Resistance

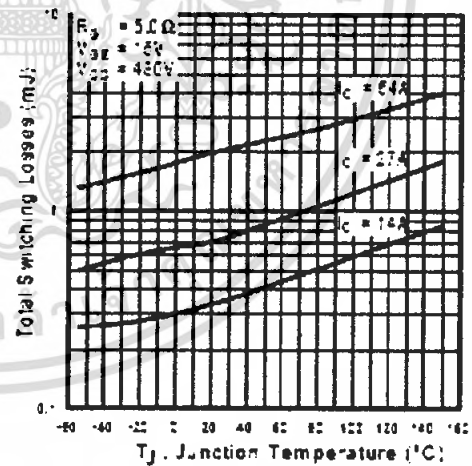


Fig. 10 - Typical Switching Losses vs. Junction Temperature

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PC50U (ต่อ)

IRG4PC50U

International  
IR Rectifier

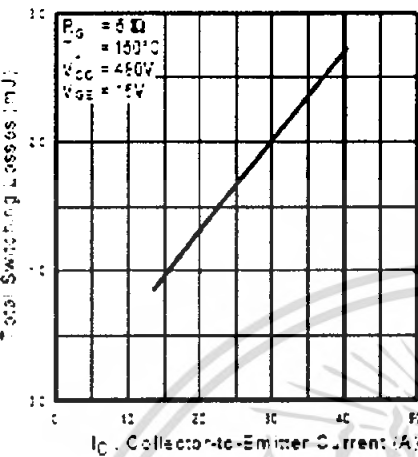


Fig. 11 - Typical Switching Losses vs. Collector-to-Emitter Current

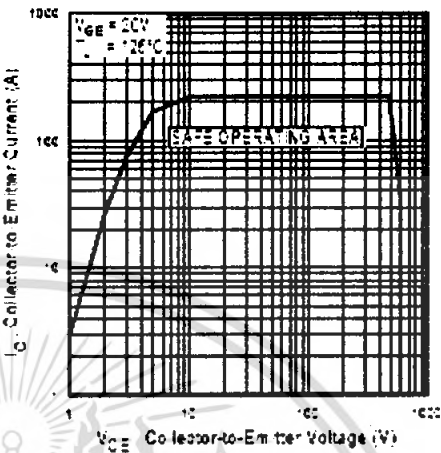


Fig. 12 - Turn-Off SOA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PC50U (ต่อ)

International  
IR Rectifier

IRG4PC50U

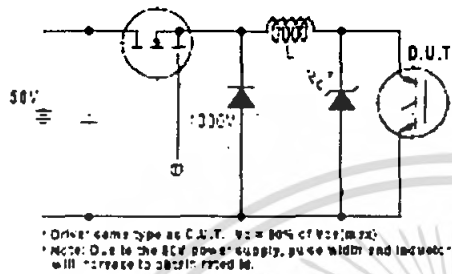


Fig. 13a - Clamped Inductive Load Test Circuit

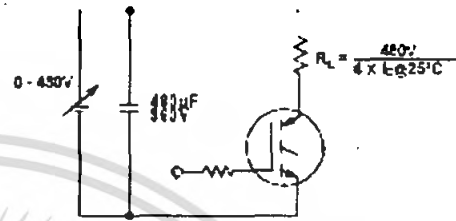


Fig. 13b - Pulsed Collector Current Test Circuit

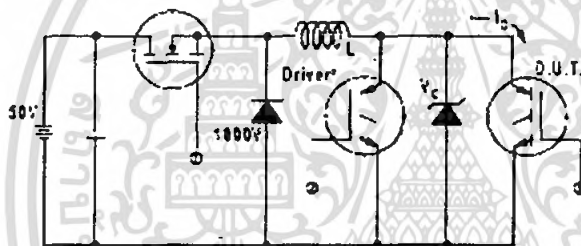


Fig. 14a - Switching Loss Test Circuit

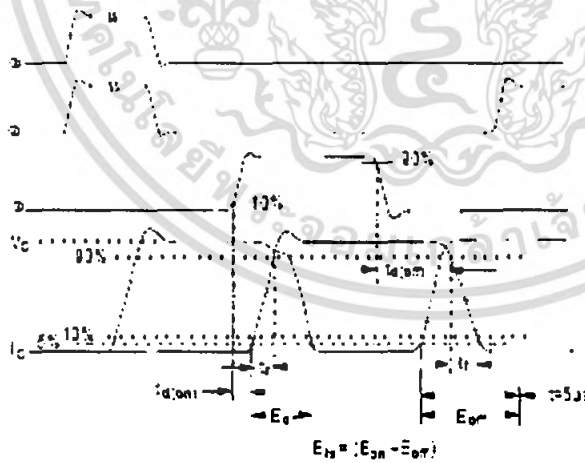


Fig. 14b - Switching Loss Waveforms

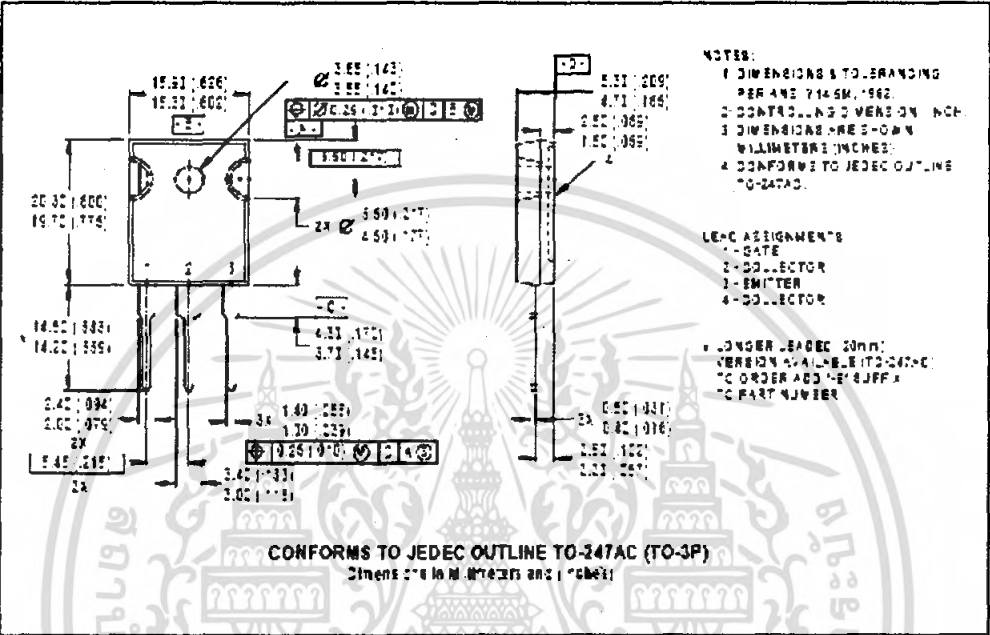
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงคุณสมบัติ IGBT เบอร์ IRG4PC50U (ต่อ)

IRG4PC50U

International  
IR Rectifier

Case Outline and Dimensions — TO-247AC



International  
IR Rectifier

IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, USA Tel: (310) 252-7900  
FAX: (310) 252-7903  
Visit us at [www.irf.com](http://www.irf.com) for sales contact information.  
Data and specifications subject to change without notice. 12/00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

MAXIMUM RATINGS (Ta=25°C)

| CHARACTERISTIC                                                                     |                                                 |                                  |                  | SYMBOL                            | RATING | UNIT  |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------|------------------|-----------------------------------|--------|-------|
| LED                                                                                | Forward Current:                                |                                  |                  | I <sub>F</sub>                    | 20     | mA    |
|                                                                                    | Forward Current Derating (T <sub>a</sub> ≥70°C) |                                  |                  | ΔI <sub>F</sub> /ΔT <sub>a</sub>  | -0.36  | mA/°C |
|                                                                                    | Peak Transient Forward Current (Note 1):        |                                  |                  | I <sub>FM</sub>                   | 1      | A     |
|                                                                                    | Reverse Voltage                                 |                                  |                  | V <sub>R</sub>                    | 5      | V     |
|                                                                                    | Junction Temperature                            |                                  |                  | T <sub>J</sub>                    | 125    | °C    |
| DETECTOR                                                                           | I <sub>OH</sub> Peak Output Current:            | PW≤2.5μs, f <sub>s</sub> ≤15 kHz | (Note 2)         | I <sub>OH</sub>                   | -1.5   | A     |
|                                                                                    |                                                 | PW≤1.0μs, f <sub>s</sub> ≤15 kHz |                  |                                   | -2.0   |       |
|                                                                                    | I <sub>OL</sub> Peak Output Current:            | PW≤2.5μs, f <sub>s</sub> ≤15 kHz | (Note 2)         | I <sub>OL</sub>                   | +1.5   | A     |
|                                                                                    |                                                 | PW≤1.0μs, f <sub>s</sub> ≤15 kHz |                  |                                   | +2.0   |       |
|                                                                                    | Output Voltage                                  | T <sub>a</sub> ≤70°C             | V <sub>O</sub>   | 35                                | V      |       |
|                                                                                    |                                                 |                                  |                  | T <sub>a</sub> ≤55°C              |        | 24    |
|                                                                                    | Supply Voltage                                  | T <sub>a</sub> ≤70°C             | V <sub>CC</sub>  | 35                                | V      |       |
|                                                                                    |                                                 |                                  |                  | T <sub>a</sub> ≤55°C              |        | 24    |
|                                                                                    | Output Voltage Derating (T <sub>a</sub> ≥70°C)  |                                  |                  | ΔV <sub>O</sub> /ΔT <sub>a</sub>  | -0.73  | V/°C  |
|                                                                                    | Supply Voltage Derating (T <sub>a</sub> ≥70°C)  |                                  |                  | ΔV <sub>CC</sub> /ΔT <sub>a</sub> | -0.73  | V/°C  |
| Junction Temperature                                                               |                                                 |                                  | T <sub>J</sub>   | 125                               | °C     |       |
| Operating Frequency (Note 3):                                                      |                                                 |                                  | f                | 25                                | kHz    |       |
| Operating Temperature Range                                                        |                                                 |                                  | T <sub>op</sub>  | -20~55                            | °C     |       |
| Storage Temperature Range                                                          |                                                 |                                  | T <sub>stg</sub> | -55~125                           | °C     |       |
| Lead Soldering Temperature(10s):                                                   |                                                 |                                  | T <sub>in</sub>  | 260                               | °C     |       |
| Isolation Voltage (AC, 1min, R <sub>in</sub> ≤60% T <sub>a</sub> =25°C): (Note 4): |                                                 |                                  | EV <sub>is</sub> | 2500                              | V-rms  |       |

(Note 1) : Pulse width Pw ≤1μs, 300pps  
(Note 2) : Exponential Waveform  
(Note 3) : Exponential Waveform I<sub>OH</sub> ≤-1.0A (≤2.5μs) ; I<sub>OL</sub> ≤+1.0A (≤2.5μs)  
(Note 4) : Device considered a two terminal device: pins 1,2,3 and 4 shorted together and pins 5,6,7 and 8 shorted together.  
(Note 6) : A ceramic capacitor(0.1μF) should be connected from pin 8 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain inverter amplifier. Failure to provide the bypassing may impair the switching property. 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 <sub>pin</sub>                  | 7   | 8    | 10     | mA   |
| Input Voltage, OFF    | V <sub>input</sub>                | 0   | —    | 0.5    | V    |
| Supply Voltage        | V <sub>CC</sub>                   | 15  | —    | 30, 22 | V    |
| Peak Output Current:  | I <sub>OH</sub> / I <sub>OL</sub> | —   | —    | ±0.5   | A    |
| Operating Temperature | T <sub>op</sub>                   | -20 | 25   | 70     | °C   |

# ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

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

| CHARACTERISTIC                             |           | SYMBOL                    | TEST CIRCUIT | TEST CONDITION                                                                                 | MIN                                              | TYP.      | MAX   | UNIT          |  |
|--------------------------------------------|-----------|---------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------|-------|---------------|--|
| Input Forward Voltage                      |           | $V_f$                     | —            | $I_f = 10\text{ mA}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$                                                | —                                                | 1.2       | 1.3   | V             |  |
| Temperature Coefficient of Forward Voltage |           | $\Delta V_f / \Delta T_f$ | —            | $I_f = 10\text{ mA}$                                                                           | —                                                | -2.0      | —     | mV/°C         |  |
| Input Reverse Current                      |           | $I_R$                     | —            | $V_R = 5\text{ V}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$                                                  | —                                                | —         | 10    | $\mu\text{A}$ |  |
| Input Capacitance                          |           | $C_i$                     | —            | $V = 0$ , $f = 1\text{ MHz}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$                                        | —                                                | 45        | 250   | pF            |  |
| Output Current                             | "H" Level | $I_{OH}$                  | 2            | $V_{OL} = 30\text{ V}$<br>(*)                                                                  | $I_L = 10\text{ mA}$<br>$V_{OL} = 4\text{ V}$    | -1.2      | -1.5  | A             |  |
|                                            | "L" Level | $I_{OL}$                  | 1            |                                                                                                | $I_L = 0$<br>$V_{OL} = 2.5\text{ V}$             | 1.0       | 2     |               |  |
| Output Voltage                             | "H" Level | $V_{OH}$                  | 3            | $V_{CC} = +15\text{ V}$<br>$V_{EE} = -15\text{ V}$<br>$R_L = 200\Omega$ , $I_L = 5\text{ mA}$  | —                                                | 12.8      | —     | V             |  |
|                                            | "L" Level | $V_{OL}$                  | 4            | $V_{CC} = +15\text{ V}$<br>$V_{EE} = -15\text{ V}$<br>$R_L = 200\Omega$ , $V_i = 0.5\text{ V}$ | —                                                | -14.2     | -12.5 |               |  |
| Supply Current                             | "H" Level | $I_{OH}$                  | —            | $V_{CC} = 30\text{ V}$                                                                         | $I_L = 10\text{ mA}$<br>$T_a = 25^\circ\text{C}$ | —         | 7     | mA            |  |
|                                            |           |                           |              |                                                                                                | $I_L = 10\text{ mA}$                             | —         | 11    |               |  |
|                                            | "L" Level | $I_{OL}$                  | —            |                                                                                                | $I_L = 0\text{ mA}$<br>$T_a = 25^\circ\text{C}$  | —         | 7.5   | mA            |  |
|                                            |           |                           |              |                                                                                                | $I_L = 0\text{ mA}$                              | —         | 11    |               |  |
| Threshold Input Current                    | "H"       | $I_{ih}$                  | —            | $V_{CC} = +15\text{ V}$<br>$V_{EE} = -15\text{ V}$<br>$R_L = 200\Omega$ , $V_i > 3\text{ V}$   | —                                                | 1.2       | 5     | mA            |  |
| Threshold Input Voltage                    | "H"-"L"   | $V_{ih}$                  | —            | $V_{CC} = +15\text{ V}$<br>$V_{EE} = -15\text{ V}$<br>$R_L = 200\Omega$ , $V_i < 3\text{ V}$   | 0.8                                              | —         | —     | V             |  |
| Supply Voltage                             |           | $V_{CC}$                  | —            | —                                                                                              | 10                                               | —         | 35    | V             |  |
| Capacitance (Input-Output)                 |           | $C_s$                     | —            | $V_s = 0$ , $f = 1\text{ MHz}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$                                      | —                                                | 1.0       | 2.0   | pF            |  |
| Resistance (Input-Output)                  |           | $R_s$                     | —            | $V_s = 50\text{ V}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$<br>$R_L = \infty$                               | $1 \times 10^{-5}$                               | $10^{-4}$ | —     | $\Omega$      |  |

(\*) : All typical values are at Ta=25°C

(†) : Duration of IC time ≤ 50μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

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

| CHARACTERISTIC                                      | SYMBOL          | TEST CIRCUIT | TEST CONDITION                                                                                    | MIN    | Typ. | MAX  | UNIT |
|-----------------------------------------------------|-----------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------|------|------|
| Propagation Delay Time                              | L → H           | 5            | I <sub>b</sub> = 3 mA<br>V <sub>OL</sub> = 15 V<br>R <sub>L</sub> = 210 Ω, C <sub>L</sub> = 10 nF | 0.05   | 0.15 | 0.5  | μs   |
|                                                     | H → L           |              |                                                                                                   | 0.05   | 0.15 | 0.5  |      |
| Switching Time Dispers on between ON and OFF        | tpHL-tpLH       |              |                                                                                                   | —      | —    | 0.45 |      |
| Output Rise Time                                    | t <sub>r</sub>  |              |                                                                                                   | —      | —    | —    |      |
| Output Fall Time                                    | t <sub>f</sub>  |              |                                                                                                   | —      | —    | —    |      |
| Common Mode Transient Immunity at High Level Output | CM <sub>H</sub> | 6            | V <sub>CE</sub> = 1000 V, I <sub>b</sub> = 3 mA<br>V <sub>OL</sub> = 30 V, T <sub>j</sub> = 25°C  | -15000 | —    | —    | V/μs |
| Common Mode Transient Immunity at Low Level Output  | CM <sub>L</sub> |              | V <sub>CE</sub> = 1000 V, I <sub>b</sub> = 0 mA<br>V <sub>OL</sub> = 30 V, T <sub>j</sub> = 25°C  | -5000  | —    | —    | V/μs |

Fig.1 I<sub>OL</sub> TEST CIRCUIT

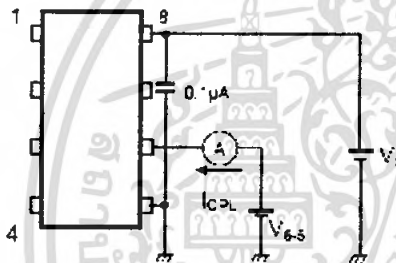


Fig.2 I<sub>OH</sub> TEST CIRCUIT

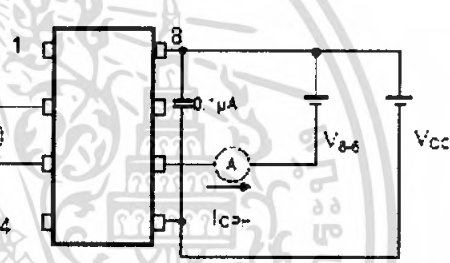


Fig.3 V<sub>OH</sub> TEST CIRCUIT

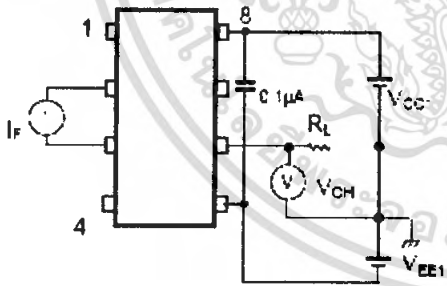


Fig.4 V<sub>OL</sub> TEST CIRCUIT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

Fig.5  $t_{pLH}$ ,  $t_{pHL}$ ,  $t_r$ ,  $t_f$  TEST CIRCUIT

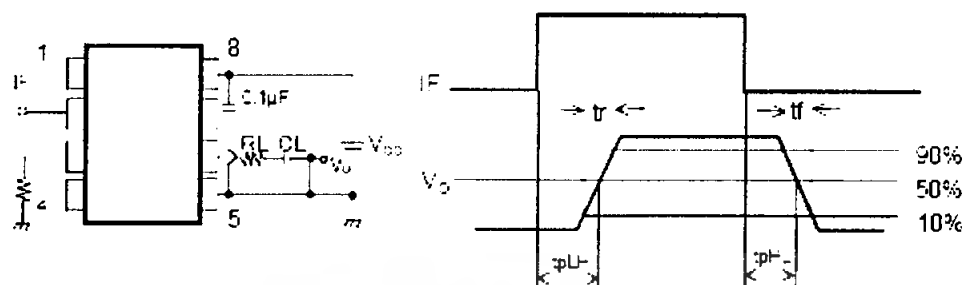
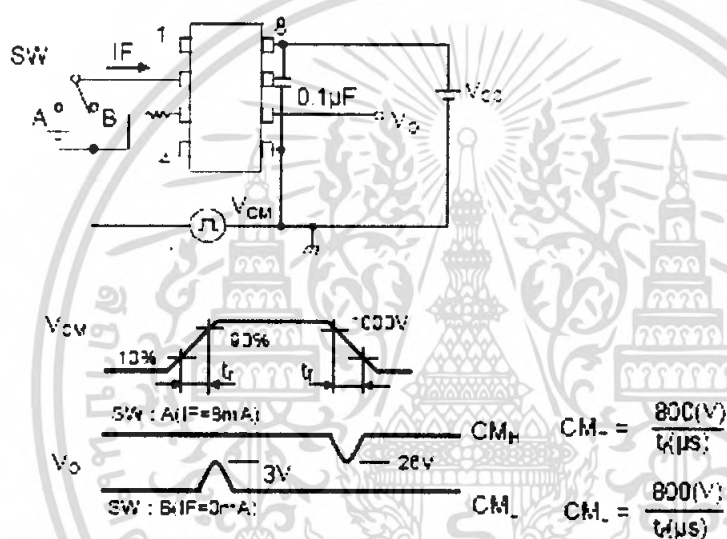


Fig.6  $CM_H$ ,  $CM_L$  TEST CIRCUIT



$CM_L$ ( $CM_H$ ): 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.

## ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

### RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

00C073-1B8-2

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

## ข้อมูลแสดงคุณสมบัติ ดิจิตอลมิเตอร์รุ่น PAXH



Model No. PAX-1  
Drawing No. PAX-1S  
Revised 0.1.1

## MODEL PAX – 1/8 DIN ANALOG INPUT PANEL METERS



- PROCESS VOLTAGE, CURRENT, TEMPERATURE, AND STRAIN GAGE INPUTS
- 5-DIGIT 0.56" RED SWGL-SMT READABLE DISPLAY
- VARIABLE INTENSITY DISPLAY
- 16 POINT SCALING FOR NON-LINEAR PROCESSES
- PROGRAMMABLE FUNCTION KEYS/USER INPUTS
- 9 DIGIT TOTALIZER (INTEGRATOR) WITH BATCHING
- OPTIONAL CUSTOM UNITS OVERLAY W/BACKLIGHT
- FOUR SETPOINT ALARM OUTPUTS (W/OPTION CARD)
- COMMUNICATION AND BUS CAPABILITIES (W/OPTION CARD)
- RETRANSMITTED ANALOG OUTPUT (W/OPTION CARD)
- GRAPHIC PROGRAMMING SOFTWARE
- NEMA 4X IP65 SEALED FRONT BEZEL

## GENERAL DESCRIPTION

The PAX Analog Panel Meter offers many features and performance capabilities to suit a wide range of industrial applications. Available in five different models to handle various analog inputs including DC Voltage, Current, AC Voltage, Current, Process Temperature, and Strain Gage Inputs. Refer to pages 4 through 5 for the details on the specific model. The optional plug-in output cards allow the operator to reconfigure the meter for process applications, while providing easy upgrades for future needs.

The meter employs a bright 0.56" LED display. The unit is available with a red backlight readable or a standard green LED. The intensity of display can be adjusted from dark room applications up to sunlight readable, making it ideal for viewing in bright light applications.

The meter provides a MAX and MIN reading memory with programmable capture time. The capture time is used to prevent detection of false max or min readings which may occur during start-up of measured process system.

The signal, totalizer (integrator) can be used to compute a time-averaged product. This can be used to provide a readout of totalized flow, calculate service intervals of motors or pumps, etc. The totalizer can also accommodate batch weighing operations.

The meter has four setpoint outputs implemented on Plug-in option cards. The Plug-in cards provide dual FORM-C relays (5A) and FORM-A (1A), as either quad sinking or quad sourcing open collector logic outputs. The setpoint alarms can be configured to suit a variety of control and alarm requirements.

Communication and Bus Capabilities are also available as option cards. These include RS-232, RS-485, Modbus, DeviceNet, and Profibus-DP. Remote values and setpoint alarm values can be controlled through the bus. Additionally, the meter has a feature that allows a remote computer to directly control the output of the meter. With an RS-232 or RS-485 card installed, it is possible to configure the meter using a Windows® based program. The configuration data can be saved to a file for later recall.

A basic DC output signal is available as an optional Plug-in card. The card provides either 12 mA or 10 V signals. The output can be scaled independent of the input range and can track either the input, setpoint, max or min readings.

Once the meter has been properly configured, the parameter list may be locked out from further modification in its setpoint or only the setpoint values can be made accessible.

The meter has been specifically designed for harsh industrial environments. With NEMA-4X/IP65 sealed bezel and extensive wiring of secure effects to CE requirements, the meter provides a tough, reliable application solution.

## SAFETY SUMMARY

All safety related regulations, local codes and instructions that appear in the literature of any equipment must be observed to ensure personal safety and to prevent damage to either the instrument or equipment connected to it. If equipment is used in a manner not specified by the manufacturer, the protection provided by the equipment may be impaired.

Do not use this meter to directly command motors, valves, or other actuators not equipped with safeguards. To do so can be potentially harmful to persons or equipment in the event of a fault to the unit.



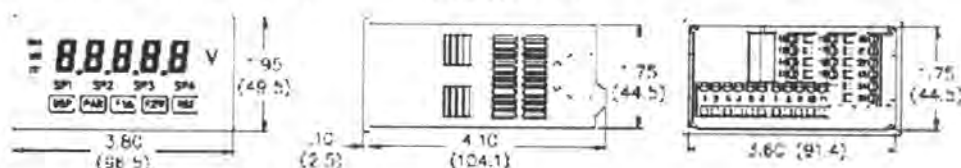
CAUTION: Risk of Damage  
Read, understand and follow the user's  
instructions and warnings of this unit.



CAUTION: Risk of Shock - W.A.S.

## DIMENSIONS In inches (mm)

Note: Recommended minimum clearance between the panel for mounting and installation is:  
2.1" (53.4) x 4.1" (104.1) x 1.5" (38.1)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

## ข้อมูลแสดงคุณสมบัติ ดิจิตอลมิเตอร์รุ่น PAXLA



Model No. PAXLA-8  
Drawing No. JN/722  
Effective 12/07

## MODEL PAXLA - PAX LITE DC VOLT/CURRENT/PROCESS METER



- 5 DIGIT 0.56" HIGH RED LED DISPLAY
- PROGRAMMABLE SCALING AND DECIMAL POINTS
- PROGRAMMABLE USER INPUT
- DUAL 5 AMP FORM C RELAY
- UNIVERSALLY POWERED
- NEMA 4X/IP65 SEALED FRONT BEZEL
- OPTIONAL CUSTOM UNIT OVERLAY W/ BACKLIGHT
- TENSURE AND MAX/MIN DISPLAY CAPTURE



## GENERAL DESCRIPTION

The PAXLA is a versatile meter available as a DC volt, current, or process meter with scaling and dual Form C relay output. The meter is programmed through the front panel buttons and the use of jumpers. The RST key will also function as a four panel display reset.

Once the front panel programming is complete, the buttons can be disabled by a user input setting. The meter has been specifically designed for harsh industrial environments. With a NEMA 4X/IP65 sealed bezel and extensive testing to meet CE requirements, the meter provides a rugged yet reliable application solution.

## SAFETY SUMMARY

All safety regulations, local codes and instructions that appear in this and corresponding literature, or on equipment, must be observed to ensure personal safety and to prevent damage to either the instrument or equipment connected to it. If equipment is used in a manner not specified by the manufacturer, the protection provided by the equipment may be impaired.



## ORDERING INFORMATION

| MODEL NO. | DESCRIPTION                                   | PART NUMBER |
|-----------|-----------------------------------------------|-------------|
| PAXLA     | DC Current/Process Meter w/ dual Relay Output | PAXLAC02    |
| PAXLBP    | Unit Label Kit/Accessory                      | PAXLBK13    |

## SPECIFICATIONS

1. DISPLAY: 5 digit, 0.56" (14.2mm) unidirectional Red LED (-55°C to 155°C)

## 2. POWER REQUIREMENTS

AC POWER: 50 to 250 VAC, 50/60 Hz, 10 VA

DC POWER: 21.6 to 230 VDC, 6 W

DC Out: -24 VDC @ 100 mA (input voltage is greater than 50 VDC VDC -24 VDC @ 100 mA (input voltage is less than 10 VDC

3. INPUT RANGES: Input Selectable  
D.C. Voltage: 200 mV, 2 V, 20 V, 200 V, 1 kV

| INPUT RANGE | ACCURACY @ 25 °C LESS THAN 85% RH | INPUT IMPEDANCE | MAX INPUT SIGNAL | RESOLUTION | TEMP. COEFFICIENT |
|-------------|-----------------------------------|-----------------|------------------|------------|-------------------|
| 200 mV      | 0.1% of scale                     | 1,000 V/Ω       | 75 VDC           | 10 μV      | 70 ppm/°C         |
| 2 V         | 0.1% of scale                     | 1,000 V/Ω       | 75 VDC           | 0.1 mV     | 70 ppm/°C         |
| 20 V        | 0.1% of scale                     | 1,000 V/Ω       | 250 VDC          | 1 mV       | 70 ppm/°C         |
| 200 V       | 0.1% of scale                     | 1,000 V/Ω       | 250 VDC          | 0.1 V      | 70 ppm/°C         |
| 1 kV        | 0.1% of scale                     | 818 KΩ          | 75 V             | 1 V        | 70 ppm/°C         |

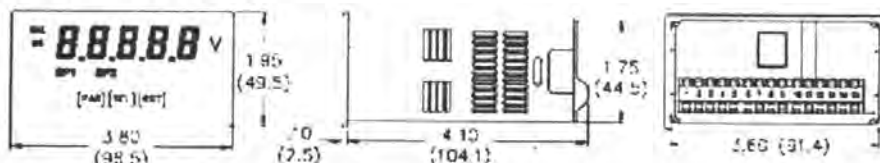
D.C. Current: 100 μA, 1 mA, 10 mA, 100 mA

| INPUT RANGE | ACCURACY @ 25 °C LESS THAN 85% RH | INPUT IMPEDANCE | MAX INPUT SIGNAL | RESOLUTION | TEMP. COEFFICIENT |
|-------------|-----------------------------------|-----------------|------------------|------------|-------------------|
| 100 μA      | 0.1% of scale                     | 1,111 Ω         | 5 mA             | 10 nA      | 70 ppm/°C         |
| 1 mA        | 0.1% of scale                     | 111 Ω           | 50 mA            | 0.1 μA     | 70 ppm/°C         |
| 10 mA       | 0.1% of scale                     | 11 Ω            | 50 mA            | 1 μA       | 70 ppm/°C         |
| 100 mA      | 0.1% of scale                     | 1 Ω             | 500 mA           | 10 μA      | 70 ppm/°C         |

D.C. Process: 4 to 20 mA, 1 to 5 VDC, 0.1 to 10 VDC

| INPUT RANGE | SELECT RANGE        |
|-------------|---------------------|
| 4-20 mA     | Use the 20 mA range |
| 1-5 VDC     | Use the 10 V range  |
| 1-10 VDC    | Use the 10 V range  |

## DIMENSIONS In inches (mm)



2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้