บทที่ 3
หลักการออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิด กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง การออกแบบวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำที่อาศัยหลักการสร้างกระแสอิมพัลส์จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาค่าขององค์ประกอบต่างๆที่ใช้ในวงจร และการพิจารณาเลือกวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ในการประกอบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำ

3.1 การออกแบบวงจรเบื้องต้นโดยใช้โปรแกรม PSPICE

ในเบื้องต้นกำหนดพิกัดความสามารถในการสร้างกระแสอิมพัลส์ของเครื่องคือ กระแสอิมพัลส์มาตรฐาน 8/20 μS มีค่ายอดสูงสุด (i_m) 5 kA

การเลือกค่าแรงดันอัดประจุอิมพัลส์ นั้นจะพิจารณาตามการใช้งานของตัววาริสเตอร์ (MOV) รายละเอียดในภาคผนวก ก ที่ใช้ป้องกันแรงดันเกินเสิร์จในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ วงจรวัด วงจรควบคุม มีค่า CLAMPING VOLTAGE ที่ใช้งานอยู่หลายค่าซึ่งไม่เกิน 1,000 V จึงเลือกค่าแรงดันอัดประจุอิมพัลส์ที่จะใช้งานเบื้องต้นคือ 1,000 V ดังนั้นการคำนวณหาค่าองค์ประกอบต่างๆที่ยังไม่ทราบค่าคือ ค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์ ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำ โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่กล่าวในตอนท้ายบทที่ 2 ดังนี้คือ

กำหนดให้ใช้ค่าแรงดันอัดประจุเบื้องต้น V คือ 1 kV จากความสัมพันธ์ $i_m = (VC)/14$

จะได้ค่าของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ $C = (14 \times i_m) / V = (14 \times 5) / 1 = 70\ \mu F$

พิจารณาค่าของตัวเก็บประจุที่จำหน่ายในท้องตลาด คือ 9.1 μF ดังนั้นต้องนำตัวเก็บประจุค่าดังกล่าวจำนวน 8 ตัว ต่อขนานกัน ได้ค่า $C = 8 \times 9.1 = 72.8\ \mu F$ แล้วนำมาคำนวณหาค่าแรงดันอัดประจุใหม่ $V = (14 \times 5)/72.8 = 0.9615$ kV

ค่าความเหนี่ยวนำ $L = 65/C = 65/72.8 = 0.89\ \mu H$

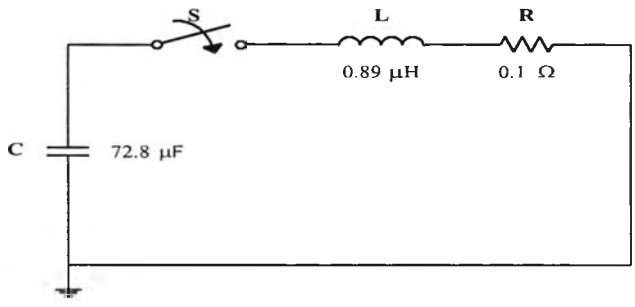
ค่าความต้านทาน $R = \alpha \times 2 \times L = 0.0535 \times 2 \times 0.89 = 0.095 \approx 0.1\ \Omega$

เมื่อคำนวณหาค่าส่วนประกอบต่างๆสำหรับวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ได้แล้ว จึงนำมาจำลอง (Simulation) โดยใช้โปรแกรม PSPICE [10] ซึ่งมีประสิทธิภาพดีทั้งยังสามารถใช้งานได้ง่ายเพื่อตรวจสอบความถูกต้องเบื้องต้นว่ารูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นนี้จะอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐาน IEC 60-1 [2] กำหนดหรือไม่ ก่อนการนำค่าองค์ประกอบดังกล่าวไปออกแบบและประกอบสร้างจริง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.1 วงจรที่ใช้จำลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์

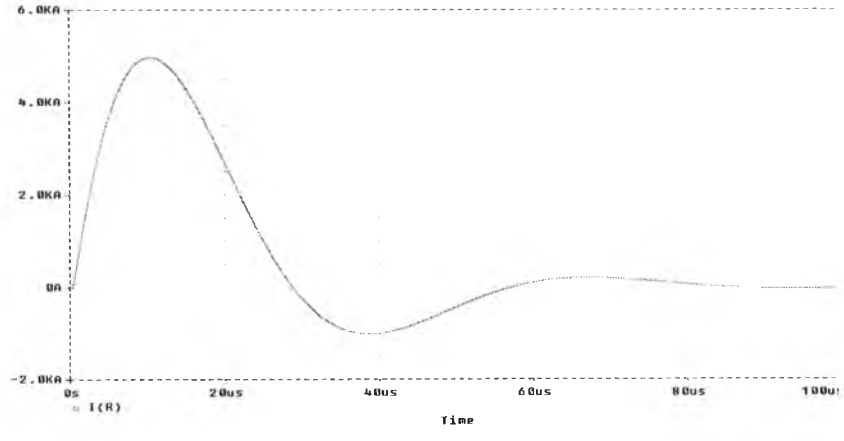
วงจรที่ใช้จำลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์แสดงดังรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 วงจรที่ใช้จำลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์

โดยที่สภาวะเริ่มต้นของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C คือ 72.8 μF มีค่าแรงดันอัดประจุ (Charging Voltage) คือ 961.5 V

3.1.2 ผลการ Simulation

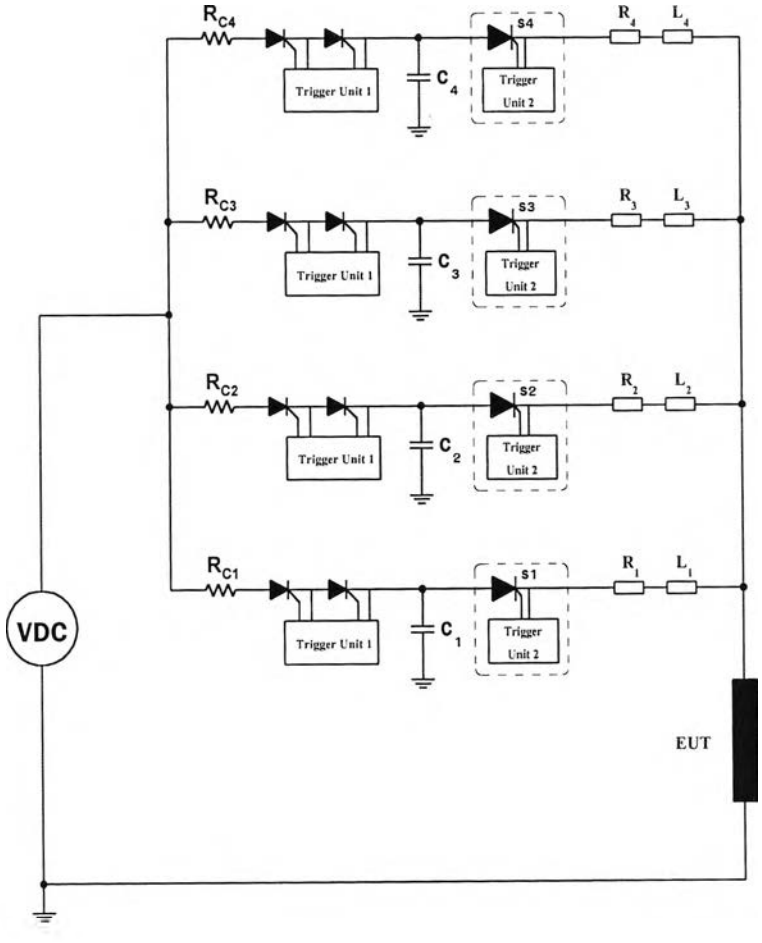


รูปที่ 3-2 ผลจำลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs

จากรูป จะได้ผลจำลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ มีค่าดังนี้คือ
ค่ายอดสูงสุด I(peak) = 4.97 kA
เวลาหน้าคลื่น/เวลาหลังคลื่น (T_1/T_2) คือ 7.62/20.56 μs
ซึ่งตรงตามมาตรฐาน [2] กำหนด

3.2 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำ

การสร้างกระแสอิมพัลส์สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการเป็นงานที่ท้าทายทั้งทางด้านเทคนิคและด้านเศรษฐศาสตร์ การออกแบบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำรูปคลื่น 8/20 μs พิกัดขนาดกระแสสูงสุด 5 kA ที่สามารถสร้างรูปคลื่นอิมพัลส์อย่างต่อเนื่อง 4 พัลส์ มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เพื่อใช้สำหรับอัดประจุและคายประจุผ่านวงจรสร้างรูปคลื่น (R-L) เพื่อจ่ายให้แก่อุปกรณ์ที่จะทดสอบ (EUT) คือ วาริสเตอร์ (MOV) ในการออกแบบส่วนองค์ประกอบความต้านทาน ความหนี่ยวนำ ไกสวิตช์ (อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทไทรีสเตอร์ SCR) การฉนวนและการรองรับต่างๆจะใช้วัสดุที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถหาซื้อหรือสั่งทำได้ภายในประเทศ วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำดังแสดงในรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-3 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำ

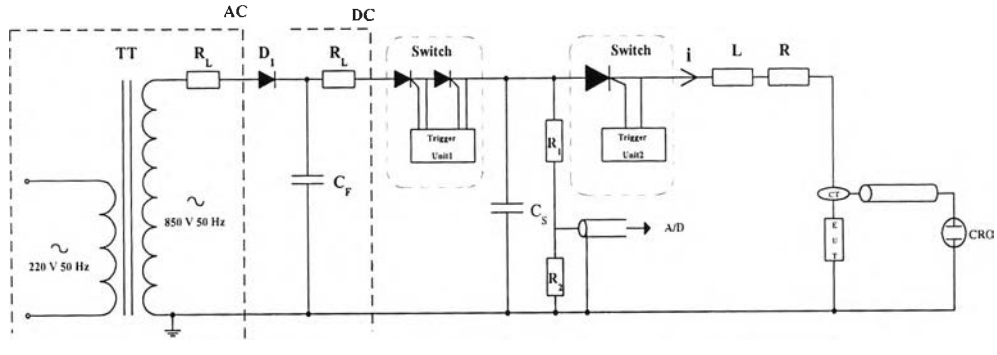
ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ทั้ง 4 ตัว (C_1-C_4) จะได้รับการอัดประจุไปพร้อมๆกันผ่านความต้านทานอัดประจุ (R_{C1}-R_{C4}) แยกกันของแต่ละตัว สวิตช์ S1-S4 เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทไทรีสเตอร์ (SCR) เป็นตัวสวิตช์เพื่อดีสชาร์จกระแสจากตัวเก็บประจุอิมพัลส์ผ่านความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ (R-L) ปรับรูปคลื่นเพื่อจ่ายให้แก่อุปกรณ์ทดสอบต่อไป วิธีควบคุมการลั่นไกตัวไทรีสเตอร์แต่ละตัวอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาต่างกันตามลำดับ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถสั่งการลั่นไก SCR ผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Trigger Unit) ได้ตามระยะเวลาที่ต้องการคือ 10-200 ms

3.3 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำ

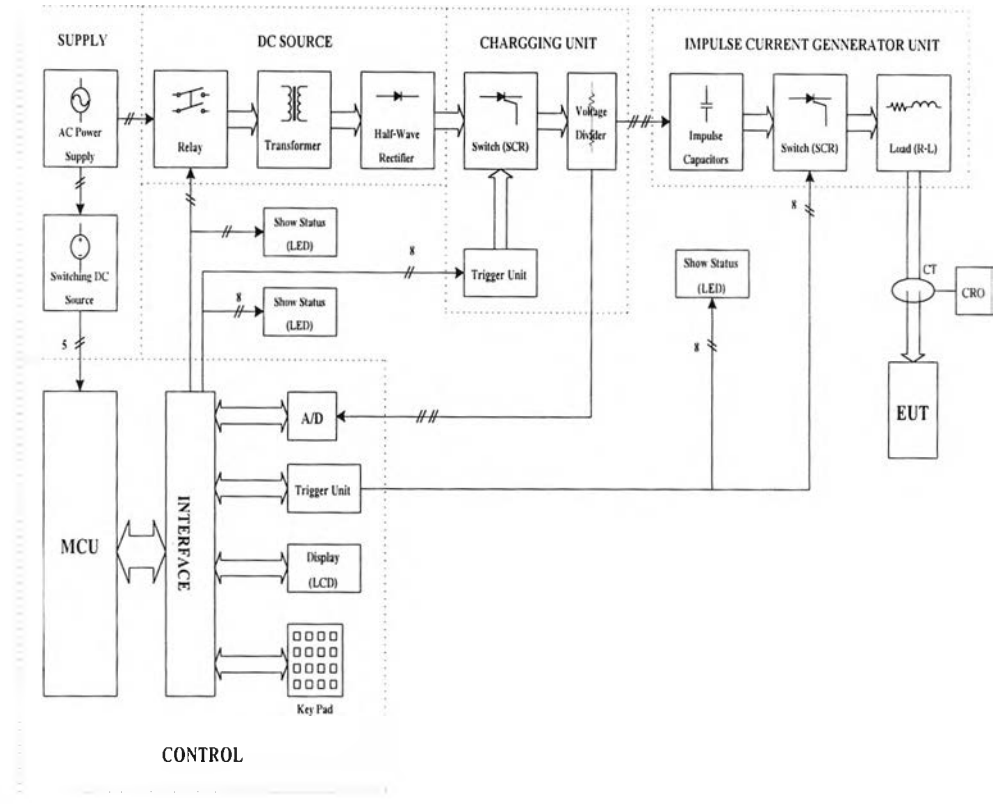
โครงสร้างหลักที่สำคัญของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำจะประกอบด้วยองค์ประกอบต่างๆ ซึ่งพิจารณาอยู่บนพื้นฐานทางด้านเทคนิคและราคาดังต่อไปนี้

1) วงจรควบคุม
2) แหล่งกำเนิดสวิตช์ซิ่งแรงดันกระแสตรง
3) แหล่งกำเนิดแรงดันกระแสตรงอัดประจุ
4) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์
5) ความต้านทานปรับรูปคลื่น
6) ตัวเหนี่ยวนำปรับรูปคลื่น
7) สวิตช์สารกึ่งตัวนำประเภทไทรีสเตอร์
8) การออกแบบโครงสร้างและการฉนวน

จากองค์ประกอบทั้งหมดสามารถแสดงรายละเอียดของวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำ 1 ขั้น ดังแสดงในรูปที่ 3-4 และแผนผังวงจรรวมแสดงโครงสร้างหลักและการทำงานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-4 รูปวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำ 1 ขั้น

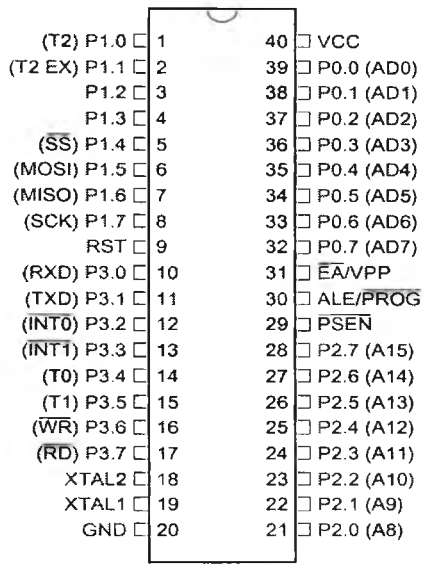


รูปที่ 3-5 แผนผังวงจรรวมโครงสร้างหลักและการทำงานของ
เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำ

3.3.1 วงจรควบคุม

วงจรนี้เป็นส่วนควบคุมหลักของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำทำหน้าที่ควบคุมการทำงานทั้งหมดของเครื่องให้ทำงานตามขั้นตอนที่ได้กำหนดไว้อย่างอัตโนมัติ เช่น การจ่ายแรงดันกระแสตรง 1,200 V เพื่ออัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ถึงระดับแรงดันที่ต้องการ และหน้าที่สำคัญอีกอย่างคือ ควบคุมการลั่นไกของไทรีสเตอร์ (SCR) เพื่อดีสชาร์จกระแสอิมพัลส์ได้อย่างต่อเนื่องเป็นจำนวนสูงสุด 4 อิมพัลส์ โดยมีระยะเวลาห่างกันของแต่ละอิมพัลส์ตามที่ได้กำหนด คือในช่วง 10-200 ms

ส่วนของวงจรควบคุมที่ได้ทำการศึกษาและพัฒนาเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น CP-S8252 V1.0 ของบริษัท อีทีที จำกัด ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล MCS-51 เบอร์ AT89S8252 ซึ่งมีหน่วยความจำภายในแบบแฟลช (Flash Memory) ของ Atmel Corporation เป็นชิพแบบดิพ 48 ขา ดังแสดงในรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 โมดูลแบบ DIP 40 ขา ของ AT 89S8252

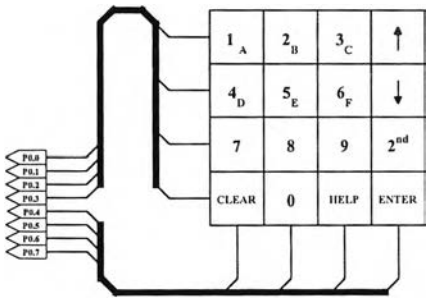
คุณสมบัติทางเทคนิคของไมโครคอนโทรลเลอร์ AT 89S8252 มีดังต่อไปนี้

- เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ซีพียูขนาด 8 บิต
- ภายในมีหน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบแฟลช ขนาด 8 กิโลไบต์ สามารถลบและเขียนใหม่ได้พันครั้ง
- หน่วยความจำข้อมูลพื้นฐานเป็นหน่วยความจำแบบแรมขนาด 256 ไบต์ และหน่วยความจำแบบอีอีพรอมขนาด 2 กิโลไบต์
- ขาพอร์ตเป็นแบบสองทิศทาง สามารถใช้งานเป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต
- มีวงจรสื่อสารอนุกรมแบบฟูลดูเพล็กซ์
- ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ขนาด 16 บิต จำนวน 3 ตัว
- สามารถรองรับแหล่งกำเนิดอินเตอร์รัปต์ได้ 6 ประเภท
- สามารถขยายหน่วยความจำภายนอกเพิ่มเติมได้สูงสุด 64 กิโลไบต์
- มีวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาอยู่ภายในชิป
- มีวงจรสื่อสารอนุกรมแบบ SPI
- มีวอตช์ด็อกไทเมอร์ในตัว

ซึ่งรายละเอียดและข้อมูลของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ CP-S8252 V1.0 กล่าวอยู่ในภาคผนวก ข

3.3.1.1 คีย์บอร์ด

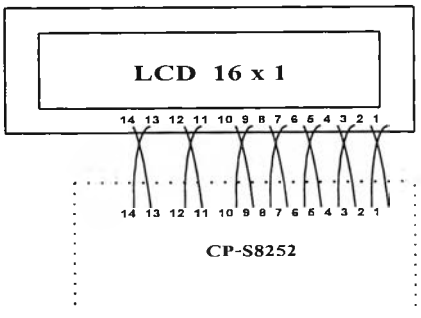
ใช้คีย์บอร์ดแบบเมตริกซ์ขนาด 4x4 ใช้ในการป้อนรหัสคำสั่ง และค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทำงานของเครื่อง โดยต่อเข้ากับพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่คอนเน็กเตอร์ 34 ขา บนบอร์ด CP-S8252 V 1.0 ดังแสดงในรูปที่ 3-7



รูปที่ 3-7 วงจรการเชื่อมต่อคีย์บอร์ดกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

3.3.1.2 ส่วนแสดงผล

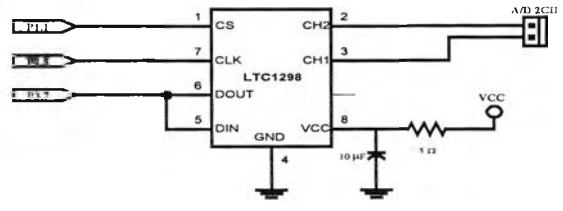
ส่วนแสดงผลเป็นแบบผลึกเหลวหรือ LCD โมดูล ขนาด 16x1 ตัวอักษร (Character LCD) ควบคุมการทำงานจอ LCD แบบ 4 บิต เพื่อประหยัดพอร์ตการใช้งาน การต่อใช้งานจะต้องพิจารณาเรื่องตำแหน่งขาของพอร์ต LCD บนบอร์ด (ขาสัญญาณบนบอร์ด CP-S8252 จะสลับกับขาสัญญาณที่อยู่บน LCD) ดังแสดงในรูปที่ 3-8



รูปที่ 3-8 วงจรการเชื่อมต่อ LCD กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

3.3.1.3 ส่วนแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล

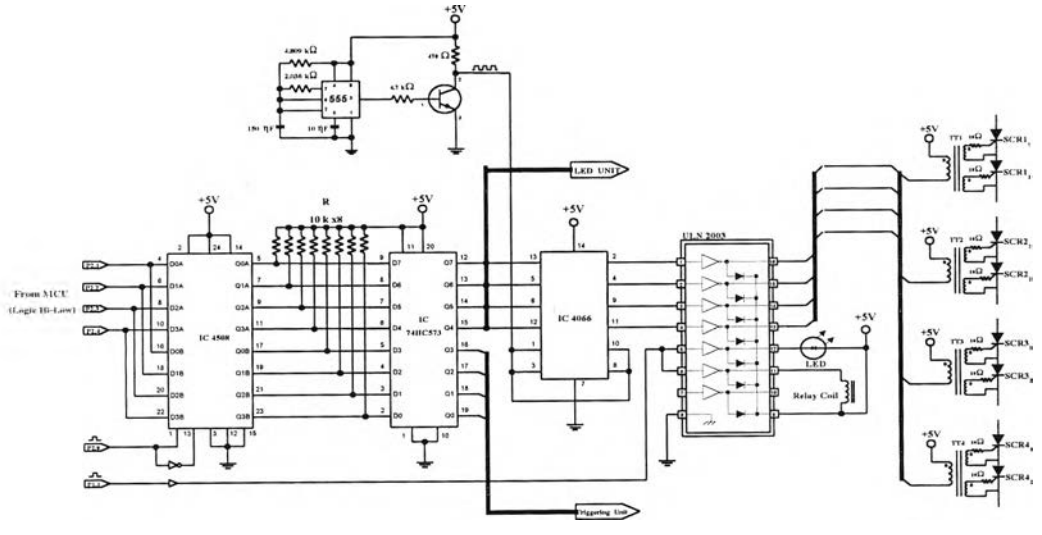
หน่วยแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล (ADC) ใช้อุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณ คือ ไอซีเบอร์ LTC1298 เป็น ADC แบบ Serial ADC จำนวน 2 ช่องสัญญาณ 12 บิต ซึ่งบนบอร์ด CP-S8252 ได้จัดเตรียมไว้เรียบร้อยแล้ว แต่สัญญาณอนาลอกซึ่งก็คือระดับแรงดันอัดประจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_1-C_4) ที่ได้จากโวลเตจดิไวเดอร์พิกัดแรงดันในช่วง 0-5 V นั้นมีจำนวน 4 สัญญาณ จึงจำเป็นต้องต่อวงจรของไอซีเบอร์ LTC1298 เพิ่มขึ้นอีก 1 ตัว รวมได้ ADC จำนวน 4 ช่องสัญญาณตามต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3-9



รูปที่ 3-9 วงจรการเชื่อมต่อ LTC1298 กับบอร์ด CP-S8252

3.3.1.4 วงจรควบคุมการอัดประจุ

วงจรควบคุมการอัดประจุหรือ (Trigger Unit 1) ประกอบด้วยวงจรในการสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่ 1 kHz และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3-10



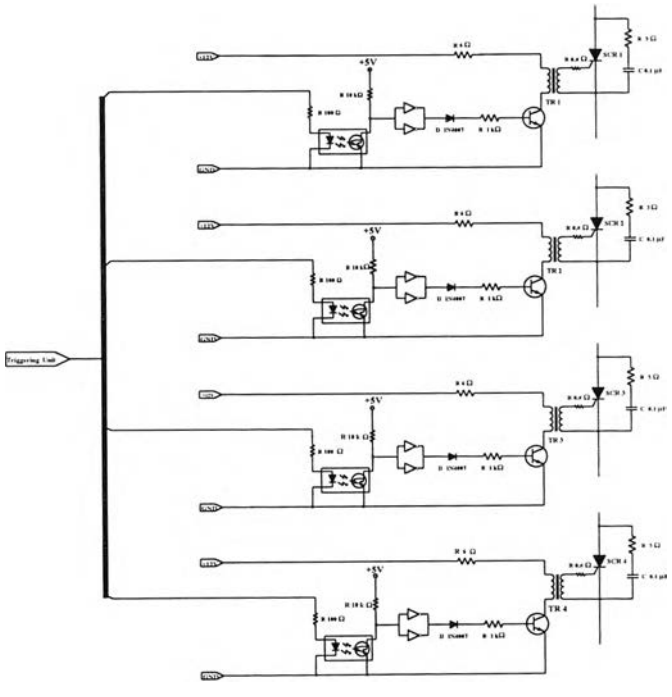
รูปที่ 3-10 วงจรควบคุมการอัดประจุ

วงจรกำเนิดความถี่ใช้ไอซี เบอร์ 555 เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่ 1 kHz ป้อนให้กับไอซีเบอร์ 4066 ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์จ่ายพัลส์ให้ไอซีเบอร์ ULN 2003 ที่เชื่อมต่อกับหม้อแปลงแยกส่วน (Isolated Transformer) เพื่อสร้างสัญญาณลั่นไกตัวไทรีสเตอร์ (SCR_1-SCR_4) และจ่ายแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_1-C_4) ได้อย่างต่อเนื่องจนถึงระดับแรงดันที่ต้องการ แยกเป็นอิสระจากกันได้ทั้ง 4 ชุด ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยที่ไอซีเบอร์ 4066 จะทำงานเมื่อได้รับสัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านไอซีเบอร์ 4085 และไอซีเบอร์ 74HC573 เป็นลอจิก High

ไอซีเบอร์ 4085 จะเชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จำนวน 4 พอร์ตเพื่อเป็นการประหยัดพอร์ตใช้งาน แต่สามารถใช้กับวงจรควบคุมการอัดประจุและวงจรการลั่นไกตัวไทรีสเตอร์ (SCR) โดยแยกออกจากกันด้วยสัญญาณควบคุมจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ขา 1 ของไอซีเป็นลอจิก High สำหรับวงจรควบคุมการอัดประจุ และลอจิก Low สำหรับวงจรการลั่นไกตัวไทรีสเตอร์ (SCR)

3.3.1.5 วงจรควบคุมการลั่นไกตัวไทรีสเตอร์ (SCR)

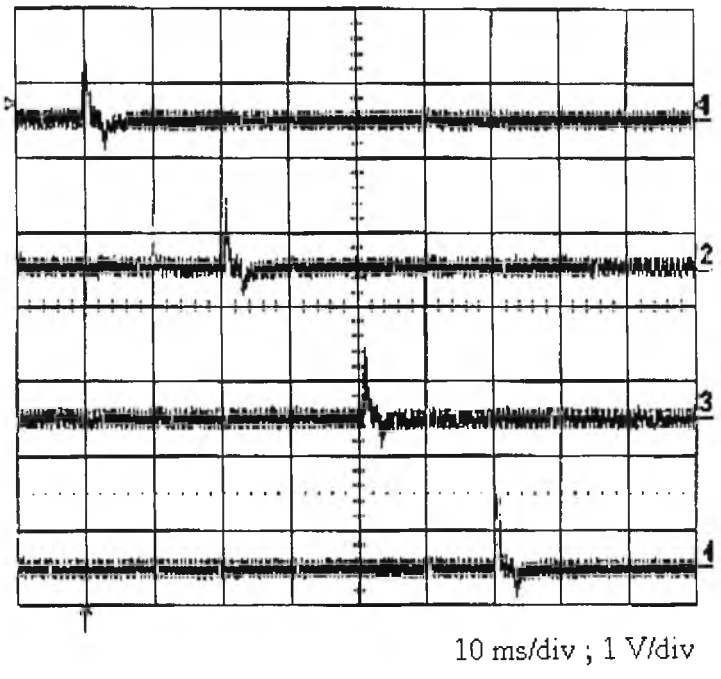
วงจรควบคุมการลั่นไกตัวไทรีสเตอร์ (SCR) หรือ (Trigger Unit 2) จะประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3-11



รูปที่ 3-11 วงจรควบคุมการลั่นไกตัวไทรีสเตอร์ (SCR)

สัญญาณควบคุมการสั่นไกตัวไทรีสเตอร์ (SCR) จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านไอซีเลือกการทำงานดังที่กล่าวมาแล้วนั้น เป็นสัญญาณพัลส์ที่สั่งให้ตัวเชื่อมโยงทางแสง (Optocoupler) ทำงาน โดยใช้ลอจิก Low เมื่อผ่านไอซี Inverter เปลี่ยนสถานะเป็นลอจิก High จะจ่ายกระแสไบแอสให้แก่ขาเบสของตัวทรานซิสเตอร์ทำการสวิตช์หม้อแปลงแยกส่วน (Isolated Transformer) เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์สั่นไกตัวไทรีสเตอร์ในการดีสชาร์จกระแสอิมพัลส์จากตัวเก็บประจุอิมพัลส์จ่ายให้แก่โหลดด้วยระยะเวลาห่างกันของแต่ละอิมพัลส์ตามที่ต้องการ

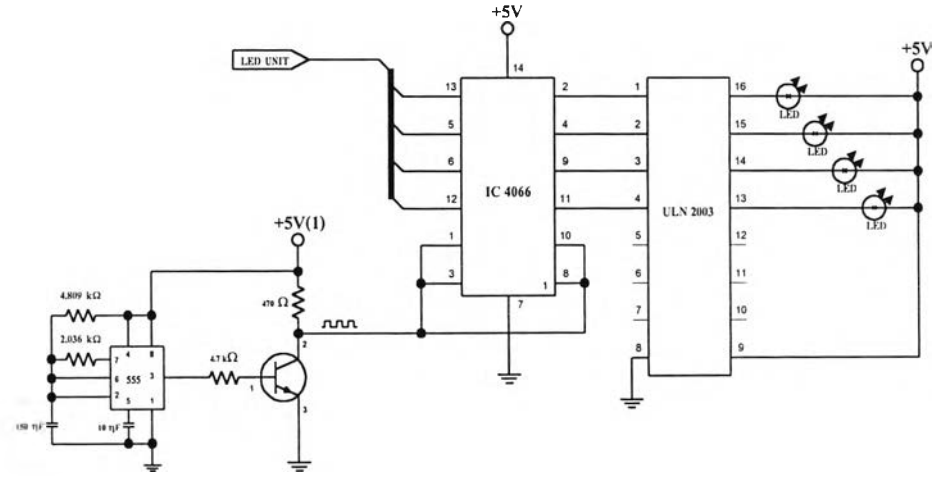
รูปที่ 3-12 แสดงให้เห็นสัญญาณควบคุมการสั่นไกตัวไทรีสเตอร์ (SCR1-SCR4) จำนวน 4 อิมพัลส์ และมีช่วงระยะเวลาห่างกันของแต่ละอิมพัลส์คือ 20 ms



รูปที่ 3-12 สัญญาณควบคุมการสั่นไกไทรีสเตอร์ (SCR1-SCR4)

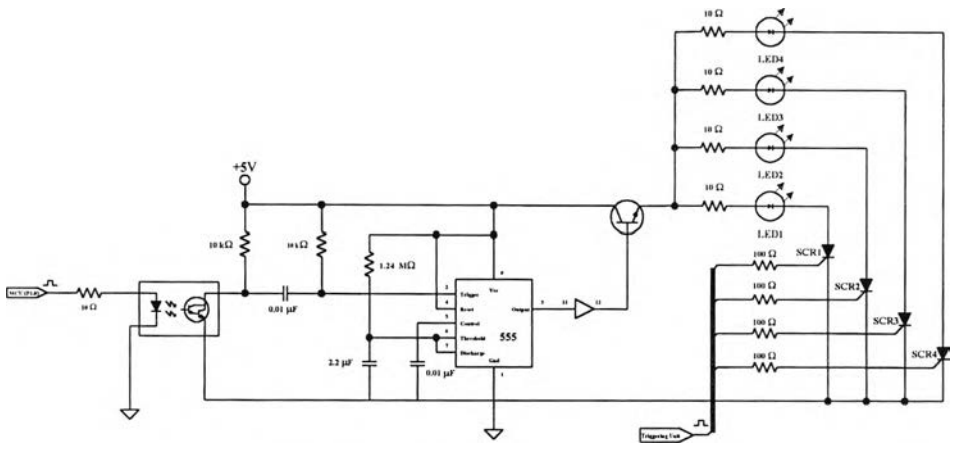
3.3.1.6 วงจรแสดงสถานะการทำงานด้วย LED

วงจรแสดงสถานะการทำงานด้วย LED นั้น แบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ วงจรแสดงสถานะขณะเครื่องทำการอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_1-C_4) และวงจรแสดงสถานะการลั่นไกตัวไทรีสเตอร์ (SCR1-SCR4) ออกแบบวงจรดังแสดงในรูปที่ 3-13



รูปที่ 3-13 ก) วงจรแสดงสถานะขณะเครื่องทำการอัดประจุ

วงจรรูปที่ 3-13 ก) นี้ใช้ไอซีเบอร์ 555 เป็นตัวกำเนิดพัลส์ความถี่ 1 Hz ต่อเข้ากับตัวทรานซิสเตอร์เพื่อจ่ายพัลส์ให้กับไอซีเบอร์ 4066 ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์เมื่อได้รับสัญญาณควบคุมเป็นลอจิก High (ที่ต่อร่วมมาจากสัญญาณควบคุมการอัดประจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์) และจ่ายพัลส์ให้กับไอซีเบอร์ ULN 2003 ขับหลอด LED ให้กระพริบด้วยความถี่ 1 Hz เพื่อแสดงสถานะว่าเครื่องกำลังทำการอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุอิมพัลส์อยู่และตรงตามจำนวนชุดที่ต้องการหรือไม่



รูปที่ 3-13 ข) วงจรแสดงสถานะการลั่นไกตัวไทรีสเตอร์(SCR_1-SCR_4)

วงจรรูปที่ 3-13 ข) ออกแบบใช้ไอซีเบอร์ 555 ทำงานเป็นตัวตั้งเวลา โดยเริ่มจับเวลาจากการที่มีพัลส์ควบคุมการลั่นไกตัวไทรีสเตอร์ (SCR) เพื่อดีสชาร์จกระแสอิมพัลส์ในชุดแรกป้อนให้ตัวเชื่อมโยงทางแสง (Optocoupler) ทำงานและจ่ายสัญญาณพัลส์เข้าที่ขา 2 ของ ไอซีเบอร์ 555 ทำให้เปลี่ยนสถานะลอจิกจาก Low เป็น High เป็นระยะเวลา 3 วินาที เพื่อไบแอสกระแสให้ตัวทรานซิสเตอร์ทำงานป้อนแรงดัน +5V ในขณะเดียวกันสัญญาณพัลส์ข้างต้นก็จะทำให้เกิดการลั่นไกของตัวไทรีสเตอร์ (SCR1) แล้วหลอด LED1 ก็จะสว่างขึ้น ในทำนองเดียวกันเมื่อมีพัลส์ควบคุมการดีสชาร์จกระแสอิมพัลส์ในชุดถัดมา หลอด LED2-LED4 ก็จะสว่างขึ้นเรียงตามลำดับกันไปเมื่อนับเวลาตั้งแต่หลอด LED1 ติดสว่างขึ้นเป็นระยะเวลา 3 วินาทีแล้วหลอด LED ที่สว่างอยู่ก็จะดับลงทั้งหมด

การออกแบบให้มีการสว่างของหลอด LED นี้เป็นการบ่งบอกถึงสถานะการสั่งลั่นไกไทรีสเตอร์ (SCR) เพื่อดีสชาร์จกระแสอิมพัลส์ ว่าทำงานถูกต้องเสร็จเรียบร้อยแล้วหรือไม่

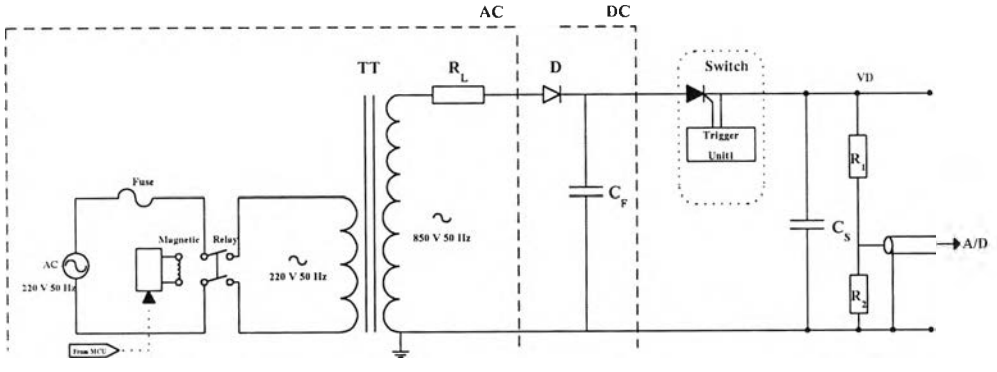
3.3.2 แหล่งกำเนิดสวิตช์ชิ่งแรงดันกระแสตรง

แหล่งกำเนิดสวิตช์ชิ่งแรงดันกระแสตรงนี้ปกติจะใช้งานอยู่ในเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล พิจารณาแล้วว่ามีคุณสมบัติต่างๆ ป้องกันสัญญาณรบกวนและระบบป้องกันการลัดวงจรที่ดีจึงได้นำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อจ่ายแรงดันกระแสตรง +5 V และ +12 V ให้กับวงจรควบคุมและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น รวมทั้งบอร์ด CP-S8252 V1.0 ด้วย

3.3.3 แหล่งกำเนิดแรงดันกระแสตรงอัดประจุ

แหล่งกำเนิดแรงดันกระแสตรงเป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่งของการสร้างกระแสอิมพัลส์ด้วยเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำ โดยทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 1,200 V อัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ แรงดันกระแสตรงที่สร้างขึ้นได้นี้เกิดจากการเปลี่ยนแรงดันกระแสสลับความถี่ 50 Hz เป็นแรงดันกระแสตรงโดยใช้วงจรเร็กติฟายเออร์ครึ่งคลื่น คือเรียงกระแสเพียงครึ่งหนึ่งของคลื่นที่ป้อนเข้าไปผ่านไดโอดแรงสูงที่ต่อไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3-14

Magnetic Relay ปกติเปิด สามารถควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ให้ปิดวงจรจ่ายแรงดันกระแสสลับ 220 V 50 Hz จากแหล่งกำเนิดให้หม้อแปลง (TT) เป็นตัวแปลงแรงดันกระแสสลับให้สูงขึ้นเป็น 850 V 50 Hz แล้วต่อผ่านไดโอดแรงสูง D ทำหน้าที่เรียงกระแสเพียงครึ่งคลื่นบวกและมีตัวเก็บประจุแรงสูง C_F เป็นตัวกรองคลื่นแรงดัน ก็จะได้แรงดันกระแสตรงที่ปลายขั้วทั้งสองคือ 1,200 V ความต้านทาน R_L มีไว้พื่อจำกัดกระแสในการอัดประจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์



รูปที่ 3-14 วงจรแหล่งกำเนิดแรงดันกระแสตรงอัดประจุ

TT คือ หม้อแปลงกระแสสลับ

R_L คือ ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

D คือ ไดโอดแรงสูง

C_F คือ ตัวเก็บประจุกรองกระแส

C_S คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์

VD คือ โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานวัดแรงดันกระแสตรง

3.3.3.1 หม้อแปลงกระแสสลับ

หม้อแปลงใช้เป็นตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับ 50 Hz ป้อนให้กับวงจรเร็กติฟายเออร์แปรเป็นแรงดันสูงกระแสตรงให้ได้ 1,200 V-DC ไต้ออกแบบและสั่งซื้อ โดยกำหนดให้มีพิกัดขนาด 100 VA 220 V/850 V 50 Hz ซึ่งหม้อแปลงดังกล่าวสามารถจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับค่ายอดได้ถึง $850\sqrt{2}$ และกระแสสลับได้ถึง 118 mA

3.3.3.2 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปจะมีการกำหนดจำนวนครั้งของการเกิดดีสชาร์จของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ต่อนาที เช่น 3 ครั้งต่อนาที เพราะการใช้เครื่องกำเนิดให้ดีสชาร์จด้วยอัตราเร็วมากเกินไปจะทำให้เกิดผลเสียต่อองค์ประกอบต่างๆของเครื่องกำเนิดได้เช่น วงจรเร็กติฟายเออร์ (ไดโอดแรงสูง และตัวเก็บประจุกรองกระแส) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ ตัวเหนี่ยวนำและความต้านทานปรับรูปคลื่น เพราะการ ดีสชาร์จเป็นสภาวะทรานเซียนต์ มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันและกระแสอย่างรวดเร็ว นั่นก็คือ เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการฉนวนขององค์ประกอบเครื่องกำเนิดในต้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าหรือความเครียดสนามไฟฟ้าซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานขององค์ประกอบสั้นลง การดีสชาร์จเร็วก็หมายถึงการชาร์จหรือการอัดประจุเร็วด้วยเช่นกัน ฉะนั้นจึงต้องไม่ใช้เครื่องกำเนิดให้ดีสชาร์จถี่จนเกินไปโดยไม่มีการเว้นช่วง การจำกัดอัตราการอัดประจุอาจทำได้โดยใช้ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ R_L ซึ่งต่ออนุกรมคั่นอยู่ระหว่างตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s ให้มีค่าสูงมากพอเพื่อให้กระแสอัดประจุมีค่าต่ำ นอกจากต้องเลือกค่าความต้านทานและพิกัดแรงดันแล้วยังต้องคำนึงถึงค่ากำลังไฟฟ้าของการอัดประจุด้วยนั่นคือความต้านทาน R_L ต้องทนกระแส อัดประจุสูงสุดได้ เมื่อพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำขณะอัดประจุที่ต่ออยู่ในลักษณะขนานกันจำนวน 4 ชุด ด้วยแรงดัน U_o และความต้านทานจำกัดกระแสต่ออนุกรมอยู่ทุกตัวซึ่งมีความจุไฟฟ้า

$$C_s = 4 \times C_s = 4 \times 72.8 = 291.2 \ \mu F$$

พิกัดกระแสของตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงกำหนดด้วยค่ากระแสพิกัดของไดโอด I_o = 50 mA ฉะนั้นอัตราการเพิ่มแรงดันอัดประจุหาได้จากสมการคือ $i = C_s \Delta U_o / \Delta t$ นั่นคือ กำหนดเงื่อนไขให้เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำดีสชาร์จได้ไม่เกิน 3 ครั้งต่อนาที จึงเลือกอัตราการอัดประจุด้วยการเพิ่มขึ้นของแรงดันให้ได้ค่าตามต้องการ คือ U_o = 961.5 V ในเวลา 20 วินาที หรือ 48 V/s และกำหนดให้อัดประจุด้วยกระแส 10 mA จะได้ความต้านทาน $R_L = u/I = 48 / 10 \times 10^{-3} = 4.8 \ k\Omega$

ดังนั้นความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ R_L คือ 4.8 kΩ นอกจากความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุจะต้องมีค่าโอห์มสูงแล้ว ยังต้องคำนึงถึงความคงทนต่อแรงดันอัดประจุ 1,200 V และมีกำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะไม่ทำให้อุณหภูมิสูงเกินไปเมื่อเวลาใช้งาน เนื่องจากความต้านทาน R_L ไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับค่าความเหนี่ยวนำ จึงเลือกใช้ความต้านทานสำเร็จรูปแบบเส้นลวดพัน (Wire Wound) หุ้มด้วยเซรามิกส์ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยม มีปลายขั้วเส้นลวดสำหรับต่อกันทั้งสองปลาย จึงออกแบบให้ความต้านทานย่อยหุ้มเซรามิกส์ต่ออนุกรมและเพื่อให้ความต้านทานย่อยแต่ละตัวรับแรงดันไม่เกิน 1 kV ใช้ความต้านทานย่อยจำนวนไม่น้อยกว่า 2 ตัว ต่ออนุกรมกัน

สมมติให้กระแสอัดประจุเฉลี่ยไม่เกิน 10 mA ที่แรงดัน 1,200 V ฉะนั้นกำลังไฟฟ้าอัดประจุที่ความต้าน R_L จะต้องรับได้ คือ $P = UI = 1{,}200 \times 10 \times 10^{-3} = 12$ W เพื่อให้ค่าความต้านทานและกำลังไฟฟ้าตามที่ต้องการ จึงเลือกค่าความต้านทาน 2.4 kΩ 10 W 5% มาต่ออนุกรม 2 ตัว ได้ความต้านทาน 4.8 kΩ และมีกำลังไฟฟ้าของความต้านทาน R_L เป็น $10 \times 2 = 20$ W

3.3.3.3 ไดโอดแรงสูง

ค่าที่กำหนดของไดโอดแรงสูงที่สำคัญคือ แรงดันกลับทาง แรงดันคร่อมไดโอดขณะกระแสกลับทางมีค่าประมาณ 2 เท่าของแรงดันกระแสตรงใช้งานและกระแสอัดประจุที่ไหลผ่านไดโอด ในที่นี้แรงดันสูงกระแสตรงใช้งานคือ 1,200 V กระแสอัดประจุ 10 mA

จึงพิจารณาหาซื้อไดโอดและพบว่ามีไดโอดสำเร็จรูปที่มีขนาดแรงดันกลับทางสูงมากพอที่จะนำมาใช้งานในโครงการนี้ได้ เป็นไดโอดแบบซิลิกอนที่ใช้งานในเตาไมโครเวฟซึ่งมีขนาดแรงดัน ที่กำหนดคือ 15 kV กระแสเฉลี่ยเมื่อไดโอดนำกระแสเท่ากับ 50 mA

3.3.3.4 ตัวเก็บประจุกรองกระแส

ตัวเก็บประจุกรองกระแส ในวงจรเร็กติฟายเออร์รูปที่ 3-14 ช่วยทำให้คลื่นแรงดันกระแสตรงเรียบมากขึ้นโดยช่วยคายประจุให้กับโหลดในช่วงที่ไดโอดไม่นำกระแส นั่นคือแฟกเตอร์ระลอกจะลดน้อยลง แต่เนื่องจากแรงดันสูงกระแสตรงที่สร้างขึ้นนี้จะนำไปอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิด ฉะนั้นเรื่องรูปคลื่นกระแสตรงไม่เรียบมากน้อยจึงไม่เป็นปัญหาที่ต้องนำมาพิจารณา แต่ให้สามารถสร้างแรงดันกระแสตรงได้สูงพอที่จะอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์จนกระทั่งได้แรงดันอัดประจุกระแสตรงได้ตามที่ต้องการ ตัวเก็บประจุกรองกระแสของวงจรเร็กติฟายเออร์ ในที่นี้จะมีขนาดความจุไฟฟ้าคือ 0.1 μF 2 kV-DC

3.3.3.5 โวลเตจดิไวเดอร์วัดแรงดันสูงกระแสตรง

แรงดันสูงกระแสตรงที่สร้างขึ้น โดยทั่วไปจะวัดด้วยโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน ซึ่งประกอบด้วยความต้านทานภาคแรงสูง R_1 และความต้านทานภาคแรงต่ำ R_2 มีอัตราส่วนแรงดัน $a = (R_1 + R_2) / R_2$ แรงดันสูงกระแสตรงที่ต้องการวัดสูงสุดเท่ากับ 1,200 V ฉะนั้นโวลเตจดิไวเดอร์จะต้องวัดแรงดันได้สูงถึง 1,200 V

การออกแบบเลือกขนาดความต้านทาน จะใช้เงื่อนไขที่ว่าแรงดันทางภาคแรงต่ำที่จะป้อนให้กับวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล (ADC) นั้นจะรับค่าแรงดันในช่วง 0-5 V เพื่อให้ได้แรงดันดังกล่าวจึงใช้อัตราส่วนแรงดัน 1:240 ในที่นี้ใช้ความต้านทานทำด้วยคาร์บอนฟิล์มขนาด 25 MΩ 1 W เป็นความต้านทานภาคแรงสูง R_1 ส่วนภาคแรงต่ำ R_2 ใช้ความต้านทานขนาด 104.6 kΩ และกระแสไหลผ่านโวลเตจดิไวเดอร์เพียง 47.8 μA

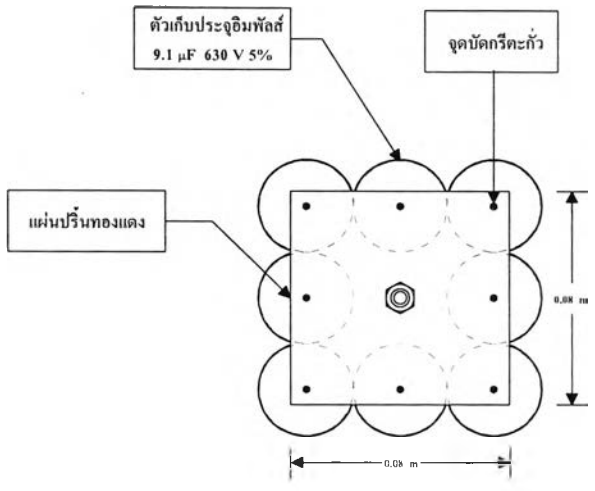
3.3.4 ตัวเก็บประจุอิมพัลส์

เงื่อนไขเบื้องต้นที่กำหนดไว้ คือ ค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์ = 72.8 μF และพิกัดแรงดันอัดประจุ = 961.5 V จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดเมทัลไลซ์ โพลีโพรไพลีน (Metalized Polypropylene) ขนาดตัวละ 9.1 μF 630 V 5% มาต่อขนานกันจำนวน 8 ตัว ได้ค่าความจุไฟฟ้าคือ

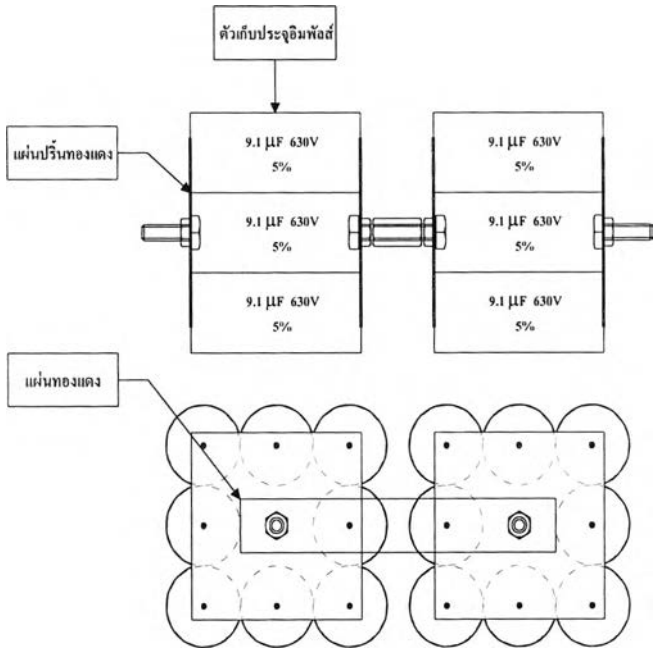
$$C_s = 8 \times 9.1 = 72.8 \ \mu F$$

แต่เมื่อพิจารณาถึงค่าพิกัดแรงดันอัดประจุ คือ 961.5 V จึงไม่สามารถนำองค์ประกอบตัวเก็บประจุอิมพัลส์ที่มีพิกัด 72.8 μF 630 V มาใช้งานได้ทันที ต้องมีการปรับเปลี่ยนเพื่อให้สามารถใช้งานที่แรงดันอัดประจุ 961.5 V ได้โดยการนำองค์ประกอบตัวเก็บประจุอิมพัลส์ที่มีพิกัด 72.8 μF 630 V อีกหนึ่งชุดมาต่ออนุกรมกัน ฉะนั้นแรงดันที่สามารถใช้งานได้คือ 1,260 V แต่ค่าความจุไฟฟ้าจะลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง คือ 36.4 μF จึงต้องนำองค์ประกอบตัวเก็บประจุอิมพัลส์พิกัดดังกล่าวอีกชุดหนึ่งมาต่อขนานเพิ่มเข้าไปก็จะได้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ที่มีพิกัดคือ 72.8 μF 1,260 V เพื่อใช้งานได้ตามต้องการ

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะมีการเชื่อมต่อกันของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ในแบบอนุกรมและแบบขนานจึงนำมาออกแบบเพื่อประกอบตัวเก็บประจุอิมพัลส์ย่อยๆให้มีลักษณะเป็นโมดูลซึ่งมีพิกัด 72.8 μF 630 V โดยนำมายึดบนแผ่นปริ้นทองแดงในลักษณะขนานกันมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3-15 ก)



รูปที่ 3-15 ก) โครงสร้างตัวเก็บประจุอิมพัลส์แบบโมดูล



รูปที่ 3-15 ข) โครงสร้างการเชื่อมต่อโมดูลตัวเก็บประจุอิมพัลส์

รูปที่ 3-15 ข) จะแสดงถึงโครงสร้างการเชื่อมต่อแบบขนานของแต่ละโมดูลเพื่อเพิ่มความจุไฟฟ้าด้วยแผ่นทองแดง และการเชื่อมต่อแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มพิกัดแรงดันใช้งานด้วยน็อตทองเหลือง

3.3.5 ความต้านทานปรับรูปคลื่น

การออกแบบองค์ประกอบความต้านทานที่ใช้ในการปรับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs ใช้ลวดความต้านทานพันบนกระบอกพีวีซี ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดี เช่น เป็นฉนวนแข็ง และเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ภายในประเทศ ราคาประหยัด หาซื้อได้ง่าย ไม่ดูดความชื้น ฯลฯ

ค่าความต้านทานตามที่ได้คำนวณหาไว้ก่อนหน้านี้ คือ 0.1 Ω ในที่นี้เลือกใช้เส้นลวดความต้านทาน Ni-Fe-Cr เพราะในทางอุตสาหกรรมจะใช้ลวดนี้พันเป็นขดลวดความร้อนในเครื่องทำความร้อน เนื่องจากมีคุณสมบัติในการทนความร้อนได้สูงและใช้งานอย่างต่อเนื่องได้เป็นเวลานาน แต่ปัจจัยที่สำคัญที่สุดของความต้านทานนี้คือ ความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อมีกระแสอิมพัลส์ไหลผ่านหากลวดที่ใช้ทนความร้อนดังกล่าวไม่ได้ก็จะขาดหรือหากไม่ได้รับการออกแบบที่ดีก็จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ การระบายความร้อนจะต้องพิจารณาถึงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของตัวต้านทานเมื่อกระแสไหลผ่านกำหนดด้วยความคงทนต่อความร้อนของท่อพีวีซีมีอุณหภูมิใช้งาน 60°C ซึ่งเป็นค่าขีดจำกัดของอุณหภูมิเมื่อใช้เส้นลวดพันบนท่อพีวีซีทำเป็นองค์ประกอบความต้านทานตามต้องการ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ΔT อาจคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta T = W/mc \qquad (3.1)$$

เมื่อ W คือ พลังงานที่เกิดจากกระแสไหลผ่านความต้านทานนั้นๆเป็น J
m คือ มวลของเส้นลวดความต้านทานเป็น kg
c คือ ความจุความร้อนจำเพาะ = 0.46 $\frac{kJ}{kg°c}$

การคำนวณจะคิดในกรณีที่เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำ ในแต่ละชุดที่ได้ออกแบบสร้างไว้สามารถจ่ายพลังงานสูงสุดได้ดังสมการ

$$W = \frac{1}{2}CV^2 \qquad (3.2)$$

เมื่อ C คือ ค่าเก็บประจุอิมพัลส์ = 72.8 μF
V คือ ค่าแรงดันอัดประจุอิมพัลส์ = 961.5 V

เมื่อแทนค่าในสมการดังกล่าว จะได้ค่า W = 34 J จากเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้นยอมให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นได้ (ΔT) 50°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ท่อพีวีซียังสามารถคงทนต่อความร้อนได้ เราสามารถหาค่า m จาก

$$m = \frac{W}{c.\Delta T} \qquad (3.3)$$

$$m = \frac{0.034kJ}{0.46\frac{kJ}{kg.°C}50°C} \approx 1.5\ g$$

เนื่องจากเส้นลวดความต้านทานที่จะใช้เป็นเส้นลวดความต้านทาน Ni-Fe-Cr ซึ่งใช้งานกันอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีความหนาแน่น 8.2 g/cm^3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm พื้นที่หน้าตัด 0.5026 mm^2 และค่าความต้านทานต่อเมตร 2.1 Ω/m ดังนั้นจากมวลของเส้นลวด 1.5 g สามารถเปลี่ยนเป็นปริมาตรดังสมการ

$$D = \frac{m}{V} \qquad (3.4)$$

จะได้ปริมาตรของเส้นลวดมีค่าเท่ากับ 0.18 cm^2 และคำนวณหาเป็นความยาวของเส้นลวดได้ดังสมการ

$$V = A*l \qquad (3.5)$$

เมื่อแทนค่าตามสมการจะได้ความยาวของเส้นลวดต้านทานมีค่าเท่ากับ 0.3581 m พันเส้นลวดต้านทาน Ni-Fe-Cr บนกระบอกฉนวนพีวีซี หลังจากที่พันเส้นลวดต้านทานเสร็จก็จะใช้เทปพันสายไฟพันหุ้มไว้เพื่อทำหน้าที่ป้องกันความเปรอะเปื้อนและฝุ่นละอองที่จะเข้ามาที่ขดลวด

กระบอกพีวีซีที่เลือกใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.018 m มีความยาว 0.08 m เมื่อพันเส้นลวดความต้านทานบนท่อพีวีซีในแต่ละรอบจะได้ความยาวดังสมการ คือ

ความยาวเส้นลวด = $2\pi r$ = 2 x π x 0.009 = 0.0565 m

เมื่อเลือกพันเส้นลวดต้านทาน 2.5 รอบจะได้ความยาวเส้นลวด = 2.5 x 0.0565 = 0.1413m และคำนวณหาค่าความต้านทาน = 2.1 x 0.14125 = 0.3 Ω ดังนั้นเพื่อให้ได้ความต้านทานและความยาวตามต้องการจึงใช้เส้นลวดจำนวน 3 เส้นๆละ 0.14125 m คิดเป็นความยาวรวม คือ 3 x 0.14125 = 0.424 m มาต่อขนานกันจะได้ความต้านทาน = 0.3/3 = 0.1 Ω ตามต้องการ ซึ่งในการประกอบสร้างจริงจะทำทั้งหมดเป็นจำนวน 4 ชุด เพื่อเป็นโหลดในวงจรของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำแยกอิสระจากกันทั้ง 4 ชุด

3.3.6 ตัวเหนี่ยวนำปรับรูปคลื่น

ตัวเหนี่ยวนำ L ที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้ใช้เส้นลวดทองแดงหุ้มฉนวน พันบนกระบอกฉนวนพีวีซีเดียวกับที่ใช้พันลวดความต้านทานโดยปลายเชื่อมต่อแล้วพันเรียงต่อกันไป ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 0.018 m ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำ L โดยประมาณสามารถคำนวณได้จากสมการ [11]

$$L = r^2N^2/(23r+25l) \ \mu H \qquad (3.6)$$

เมื่อ r เป็นรัศมีของกระบอกฉนวนพีวีซี มีหน่วยเป็นเซนติเมตร N เป็นจำนวนรอบ และ l เป็นความยาวของกระบอกฉนวนพีวีซีในส่วนที่มีเส้นลวดพันอยู่

ในทางปฏิบัติจะทำการพันความต้านทานบนกระบอกพีวีซีให้เสร็จเรียบร้อยเสียก่อนแล้วจึงนำมาวัดค่าจริงด้วย RLC มิเตอร์ จะได้ค่าความต้านทานมีค่าใกล้เคียงกับค่าความต้านทานที่ต้องการ แต่จะมีค่าความเหนี่ยวนำรวมเข้ามาด้วยคือประมาณ 0.49 μH ดังนั้นการคำนวณแทนค่าความเหนี่ยวนำ L ในสมการข้างต้นต้องนำส่วนต่างของค่าที่วัดได้จริงกับค่าที่ใช้งานในวงจรและได้คำนวณไว้แล้วในบทที่ 2 คือ 0.89 – 0.49 = 0.4 μH

แทนค่า l = 0.01 m , r = 0.009 m จะได้ N = 4.7 รอบ

เมื่อพันลวดทองแดงหุ้มฉนวนโดยที่ปลายข้างหนึ่งเชื่อมต่อกับลวดความต้านทานบนท่อพีวีซีพร้อมทั้งยึดปลายขั้วทั้งสองเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำมาวัดค่าจริงด้วย RLC มิเตอร์อีกครั้งหนึ่งจะพบว่าค่าความต้านทานมีค่าใกล้เคียงตามที่ต้องการ ส่วนค่าความเหนี่ยวนำมีความคลาดเคลื่อนเกินจากค่าที่ต้องการไปบ้างจึงต้องมีการปรับค่าดังกล่าวโดยการตัดเส้นลวดทองแดงหุ้มฉนวนให้มีความยาวสั้นลงแล้วนำไปวัดอีกครั้งหนึ่งหรือทำขบวนการนี้ซ้ำอีกจนกว่าจะได้ค่าความเหนี่ยวนำตรงกับค่าที่ต้องการคือ 0.89 μH

3.3.7 สวิตช์สารกึ่งตัวนำประเภทไทรีสเตอร์

ในปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในวงจรกำลังได้ก้าวหน้าไปมากสามารถผลิตไทรีสเตอร์ (Thyristor) กำลังสูงทั้งแรงดันและกระแส ชนิด 3 ขั้ว หรือที่เรียกว่า SCR ซึ่งย่อมาจาก Silicon Controlled Rectifier แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค มีการใช้กันอย่างแพร่หลายจึงเหมาะที่จะเลือกนำมาใช้ในการสวิตช์เพื่อดีสชาร์จกระแสจากตัวเก็บประจุอิมพัลส์ เนื่องจากสามารถสั่งการสวิตช์ได้ อย่างเที่ยงตรงและรวดเร็ว

ไทรีสเตอร์ (SCR) นั้นสามารถควบคุมการสวิตช์ได้โดยใช้พัลส์ในการกระตุ้นซึ่งมาจากวงจรลั่นไกอิเล็กทรอนิกส์ที่เชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ CP-S8252 และจะส่งสัญญาณควบคุมเป็นสัญญาณพัลส์ทำให้วงจรลั่นไกตัวไทรีสเตอร์ทำงานอย่างต่อเนื่องตามลำดับด้วยระยะเวลาห่างกันของแต่ละอิมพัลส์ชุดที่ 1-4 ในช่วงเวลาที่ต้องการ คือ 10-200 ms

การเลือกค่าที่กำหนดของไทรีสเตอร์ (SCR) ที่สำคัญคือ ค่าแรงดันใช้งานต้องสามารถใช้งานในระบบได้คือแรงดันกระแสตรง 1,200 V และสามารถที่จะดีสชาร์จกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs ซึ่งมีค่ายอดสูงสุด 5 kA นั่นคือ SCR ที่เลือกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ต้องมีพิกัดแรงดันใช้งานมากกว่าหรือเท่ากับ 1,200 V และมีพิกัดการทนต่อกระแสอิมพัลส์ได้มากกว่า 5 kA ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ของบริษัท International Rectifier เป็น Phase Control Thyristors รุ่น ST330C16L0 โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างดังตารางที่ 3.1

Parameters		ST330C..C	Units
$I_{T(AV)}$		720	A
	@ T_{hs}	55	°C
$I_{T(RMS)}$		1420	A
	@ T_{hs}	25	°C
I_{TSM}	@ 50Hz	9000	A
	@ 60Hz	9420	A
I^2t	@ 50Hz	405	KA^2s
	@ 60Hz	370	KA^2s
V_{DRM}/V_{RRM}		400 to 1600	V
t_q	typical	100	μs
T_J		- 40 to 125	°C

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของไทรีสเตอร์แบบควบคุมเฟส รุ่น ST330C16L0

3.3.8 การออกแบบโครงสร้างและการฉนวน

เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำที่ได้ออกแบบและประกอบสร้างขึ้นนั้นเป็นส่วนประกอบต่างๆบรรจุอยู่ในกล่องโลหะพ่นสีซึ่งมีอากาศเป็นฉนวนภายนอก ดังนั้นมิติภายนอก ความสูง ความกว้าง ของการฉนวนจึงกำหนดด้วยความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของอากาศ ซึ่งค่าแรงดันที่ใช้อัดประจุอิมพัลส์ตามที่คำนวณไว้จะใช้งานไม่เกิน 1,200 V ดังนั้นการติดตั้งองค์ประกอบต่างๆซึ่งมีระยะห่างพอสมควร จึงมีความปลอดภัยจากการฉนวนทุกประการ และจะต้องสามารถรับแรงกลที่เกิดจากน้ำหนักส่วนประกอบได้

ฉนวนแข็งภายนอกเป็นเพียงตัวยึด หรือรับแรงกลเท่านั้น วัสดุที่เหมาะจะใช้เป็นฉนวนภายนอกและเป็นผลิตภัณฑ์ภายในประเทศ ราคาประหยัด หาซื้อได้ง่าย ในปัจจุบันได้แก่ ท่อฉนวนพีวีซี ไมลาร์ฟิล์ม แผ่นพลาสติกอะคลีลิค เป็นต้น ในการออกแบบใช้แผ่นพลาสติกใสอะคลีลิค เพราะมีข้อดีคือ ความแข็งแรง น้ำหนักเบา ตัดเป็นชิ้นงานได้ง่าย และมีราคาถูก ความหนาที่ใช้พอประมาณคือ 5 mm ก็สามารถรับน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบต่างๆได้

3.4 โปรแกรมควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

แนวคิดในการออกแบบโปรแกรมคือ ต้องการให้เครื่องกำเนิดมีลักษณะที่สามารถให้ผู้ใช้ทุกระดับสามารถใช้งานได้มีลำดับขั้นตอนการทำงานง่ายๆ อุปกรณ์แสดงผลจอ LCD จะแสดงข้อความให้ผู้ใช้เครื่องกำเนิดนี้ป้อนข้อมูลตามต้องการผ่านทางคีย์บอร์ดแบบเมตริกซ์ขนาด 4 X 4 แล้วไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะนำข้อมูลต่างๆไปทำงานตามที่ได้ออกแบบไว้ต่อไป

กล่าวถึงภาษาหลักที่ใช้สำหรับเขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ยังคงเป็นภาษาแอสเซมบลีและตัวภาษาแอสเซมบลีนั้นเมื่อเขียนจำนวนบรรทัดเพิ่มมากขึ้นจะเกิดปัญหาคือ การตรวจสอบความถูกต้องหรือค้นหาจุดที่ผิดพลาดก็ทำได้ยากมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ทางผู้วิจัยจึงพิจารณาทางเลือกในปัจจุบันที่ได้มีการพัฒนาใช้งานภาษาซีมาใช้โปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ซึ่งขึ้นชื่อว่า ไม่ขึ้นตรงกับระบบฮาร์ดแวร์และระบบปฏิบัติการและมีโครงสร้างในการเขียนที่ง่ายต่อการตรวจสอบการทำงานและลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ ในส่วนตัวแปลภาษาซี สำหรับ MCS-51 เลือกใช้ Micro-C [12]

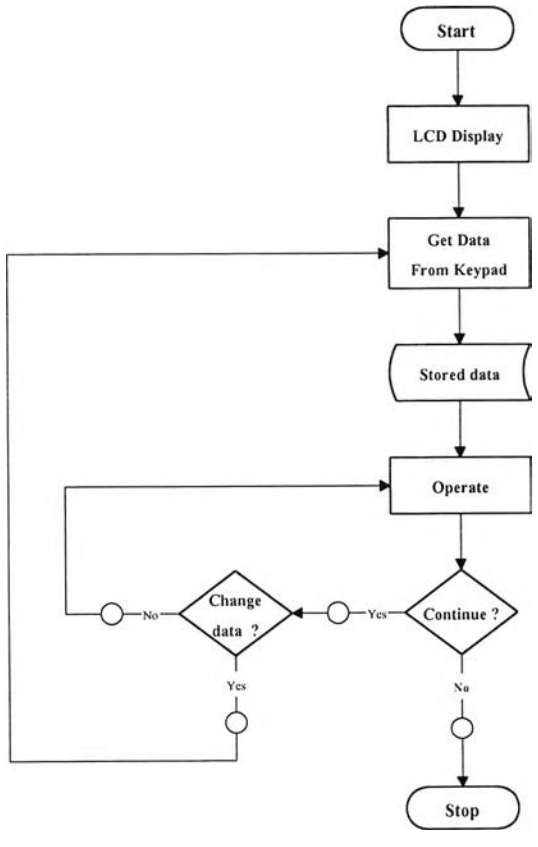
โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้โดยมีองค์ประกอบของไฟล์ต่างๆ ดังนี้

1) ไฟล์ MULTIPULSE.C เป็นไฟล์โปรแกรมภาษาซีที่ใช้ควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้งหมด

2) ไฟล์ MULTIPULSE.HEX เป็นไฟล์ที่ได้จากการคอมไพล์โปรแกรมด้วย Micro-C โดยสั่งการดังนี้คือ cc51 MULTIPULSE -picof m=t

เมื่อได้ Hex file จากการคอมไพล์ที่ชื่อ MULTIPULSE.HEX มาแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็เป็นการนำไปดาวน์โหลดโปรแกรมไปเก็บไว้ในชิพของไมโครคอนโทรลเลอร์บนบอร์ด CP-S8252 ให้เรียบร้อย และสามารถทำงานได้ตามโปรแกรมควบคุมทันที

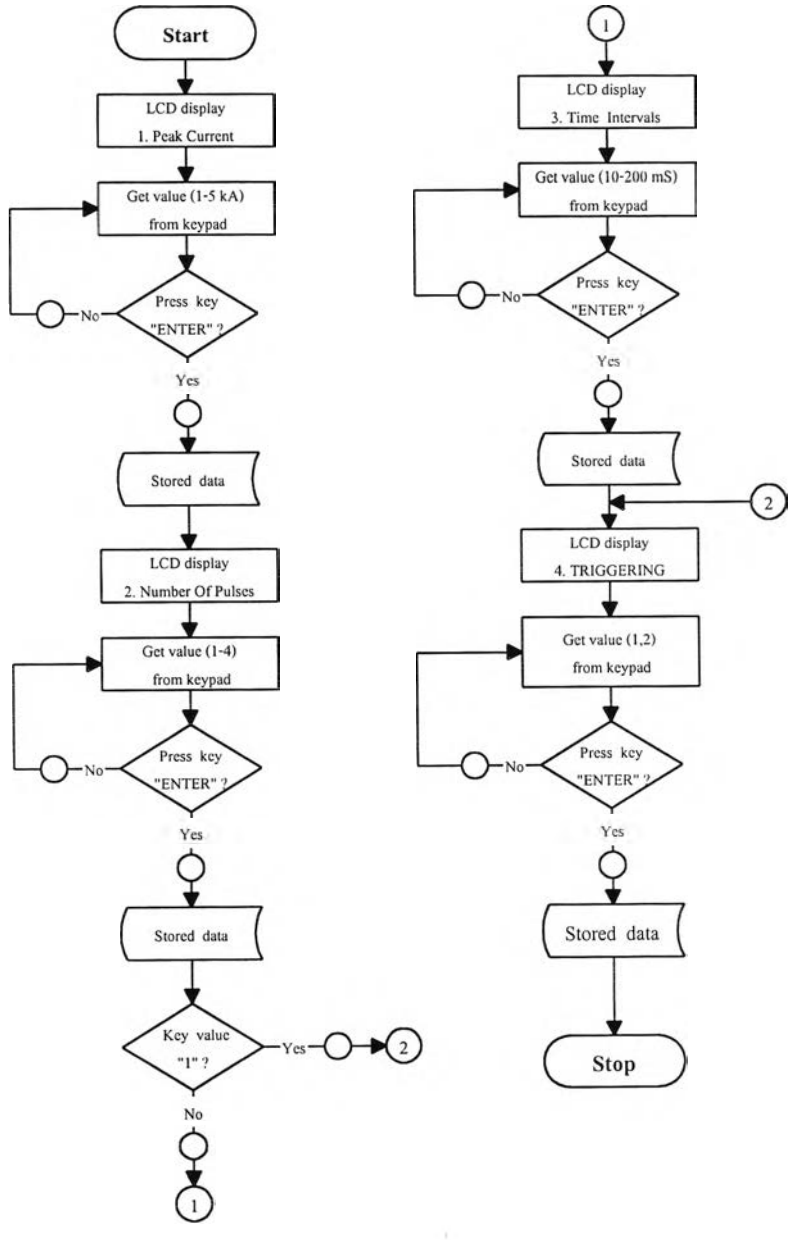
โครงสร้างโปรแกรมคำสั่งให้เครื่องทำงานสัมพันธ์กับฮาร์ดแวร์ โดยกำหนดแผนภาพการทำงานของโปรแกรมหลัก ดังแสดงในรูปที่ 3-16



รูปที่ 3-16 แผนภาพโปรแกรมหลักควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

3.4.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุมเพื่อรับข้อมูล

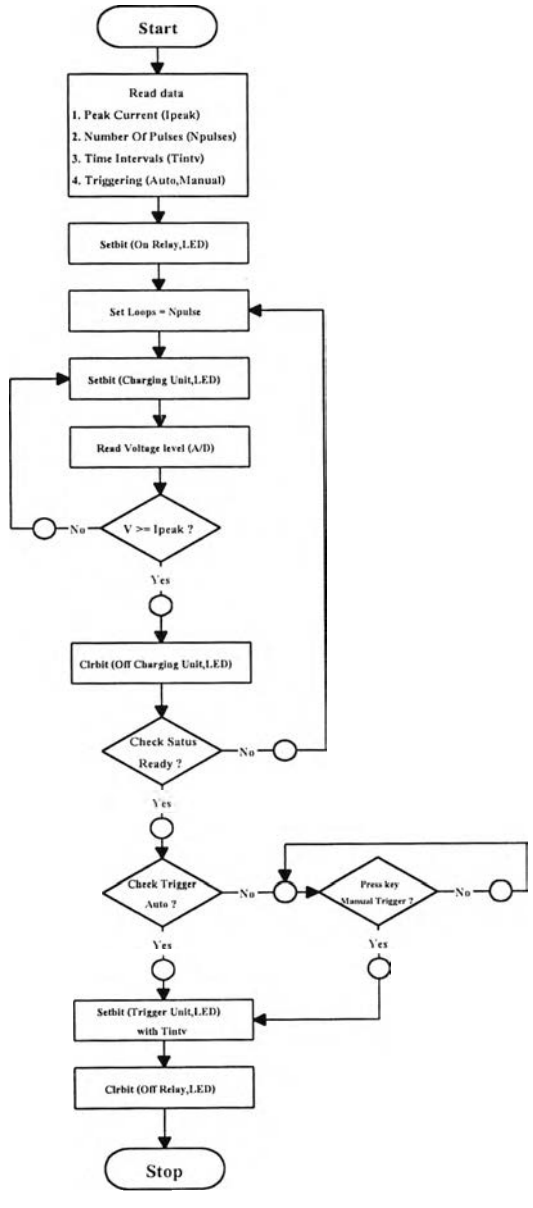
รูปที่ 3-17 เป็นแผนภาพแสดงถึงลำดับขั้นตอนการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อที่จะรับข้อมูลที่ต้องการต่าง ๆจากผู้ใช้โดยผ่านทางคีย์บอร์ดแบบเมตริกซ์ขนาด 4x4 ทางหน้าปัดของเครื่องตามขั้นตอนที่ได้แสดงข้อความแนะนำทางจอแสดงผล LCD



รูปที่ 3-17 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุมเพื่อรับข้อมูล

3.4.2 ขั้นตอนการสั่งงานของโปรแกรมควบคุม

รูปที่ 3-18 แสดงให้เห็นลำดับขั้นตอนการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์หลังจากได้รับข้อมูลที่ต้องการจากผู้ใช้เสร็จเรียบร้อยแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะนำข้อมูลดังกล่าวมาสั่งการควบคุมด้วยสถานะลอจิกต่างๆให้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เชื่อมต่ออยู่ให้ทำงานตามลำดับได้อย่างถูกต้องตามที่ได้ออกแบบโปรแกรม



รูปที่ 3-18 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการสั่งงานของโปรแกรมควบคุม