รายการอ้างอิง

1. M A Uman, The Lightning Discharge, Academic Press, 1987.
2. IEC Publ No. 60-1 1989,High Voltage Test Techniques Part. 1 1991 , Geneva.
3. S Lester, M Darveniza, Zhou Yafei, Laboratory Studies of the Effects of Multiple lightning Currents on Low Voltage Zinc Oxide Varisters, IEEE Reg 10 Int Conf. (TENCON 92), Melbourne, Nov 1992, Pub No 92 CH3223-5, Vol 1.
4. MM Yaacob, RA Ghani, Voltage-Current Characteristics Of Metal Oxide Varisters For Low Voltage Telephone Lightning Protector Under The Application Of Multiple Lightning Impulse, IEEE Int Conf.Arlington, Virginia, June 7-10,1998.
5. M. Darveniza, C J Andrews, D.R. Mercer and T.M. Parnell, A Multipulse Lightning Impulse Generator, Sixth Int. Symp. On High Voltage Eng. (ISH89), New Orleans Aug/Sept 1989, paper 47.07, 5pp.
6. MM Yaacob et al, A Versatile Multiple Stroke Lightning Impulse Generator, UPEC'95. September 1995, London.
7. สำรวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2528.
8. พงศ์ภัทร อะสีติรัตน์. การพัฒนาเครื่องนับฟ้าผ่าซ้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
9. M S Naidu, V kamaraju. High Voltage Engineering.Second Edition.
10. MicroSim Pspice. Evaluation version 7.1. MicroSim Corporation. 1995.
11. Terman, F.E. Radio Engineering Handbook. McGraw-Hill. 1943 p.185
12. ศุภชัย บุศราทิจ. คู่มือภาษาซีสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS51พร้อมแผ่นโปรแกรม Micro-C51. บริษัท อีทีที จำกัด. 2543.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
อุปกรณ์สะกัดเสิร์จ

การเกิดแรงดันเกินขึ้นในระบบจะมีผลกระทบที่ทำให้การฉนวนของอุปกรณ์หรือของระบบเสียหายได้จึงจำเป็นต้องมีมาตรการป้องกัน การป้องกันขั้นต้นก็คือกันมิให้เสิร์จเข้ามาในระบบหรือขจัดให้หายไปก่อนๆ ที่จะเข้ามาถึงสถานีหรืออุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน และขั้นที่สองเมื่อเข้ามาแล้วก็ใช้วิธีลดผลกระทบหรือจำกัดขนาดแรงดันเกินให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่ออุปกรณ์และระบบไฟฟ้า

ก.1 อุปกรณ์สะกัดเสิร์จ

ลักษณะสมบัติพื้นฐานที่ต้องการของอุปกรณ์สะกัดเสิร์จคือ จะต้องไม่มีกระแสไหลผ่านที่แรงดันใช้งานปกติ ต้องเกิดสปาร์กหรือเบรกดาวน์ผ่านได้อย่างรวดเร็วที่สุดเมื่อมีแรงดันเกินเสิร์จวิ่งมาถึง และจะต้องสามารถตัดกระแสไหลตาม (Follow current) ได้หลังจากเกิดสปาร์กผ่านแล้ว การเกิดสปาร์กหรือเบรกดาวน์นี้จะมีลักษณะสมบัติเป็นไปตามหลักการของเส้นแรงดันเวลา ซึ่งควรจะต้องอยู่ต่ำกว่าระดับ BIL

อุปกรณ์สะกัดเสิร์จมีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ในสภาวะการทำงานปกติจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูง แต่ในขณะที่เกิดแรงดันเกินขึ้นในระบบไฟฟ้าจะอยู่ในสภาวะลัดวงจร ทำให้พลังงานจากเสิร์จไหลผ่านตัวมันทั้งหมดซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

1) Gas-discharge tubes (Crowbar)
2) อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Variable resistor)

อุปกรณ์นี้ติดตั้งขนานใกล้ที่สุดกับอุปกรณ์ที่ต้องการรับการป้องกัน ซึ่งอาจจะต่ออยู่อย่างถาวรก็ได้ วัตถุประสงค์ก็คือ ให้มั่นใจว่าในทุกกรณี แรงดันที่คร่อมอุปกรณ์รับการป้องกันต้องมีค่าไม่เกินค่ากำหนด

ก.2 อุปกรณ์สะกัดเสิร์จชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Transient Suppressors)

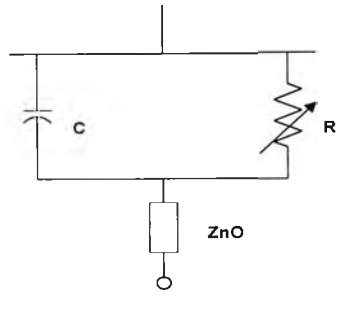
อุปกรณ์สะกัดเสิร์จชนิดสารกึ่งตัวนำ ที่รักษาค่าแรงดันคร่อมตัวอุปกรณ์ให้คงที่โดยเป็นตัวต้านทานที่ปรับค่าได้เมื่อเกิดแรงดันทรานเซียนต์ขึ้น คือ **Metal Oxide Varistors (MOVs)** เมทัลออกไซด์วาริสเตอร์ในที่นี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ค้นพบขึ้นใหม่ (ประมาณปี 1968) ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นจะทำด้วยสารกึ่งตัวนำออกไซด์โลหะได้แก่ Zinc Oxide (ZnO) เป็นวัสดุหลัก และผสมด้วยสารเจือออกไซด์ของ Bi_2O_3 และ CoO, MoO และ CrO_3 สารเจือที่เป็นผงเหล่านี้ใส่ผสมเพิ่มเติมแล้วอัดกดเป็นแผ่นบล็อกกลมด้วยแรงอัดประมาณ 30-50 MPa แล้วเผาที่ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ 1200 ^{o}C หลังจากเผาแล้วอนุภาคของ ZnO จะมีขนาดประมาณ 10 μm สิ่งเจือเติมเข้าไปจะทำให้ระดับพลังงานเปลี่ยน

ดังนั้นคุณสมบัติการนำไฟฟ้าและการฉนวนเปลี่ยนไปด้วย ออกไซด์เหล่านี้เป็นฉนวนจะเคลือบอนุภาคนำไฟฟ้าของ ZnO เป็นฟิล์มบางๆ การเคลือบด้วยฟิล์มบางๆ ของสารฉนวนออกไซด์ที่สำคัญได้แก่ Bi_2O_3 จะทำให้ได้ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นมีลักษณะของ I-U เป็น

$$I = KU^{\alpha}$$

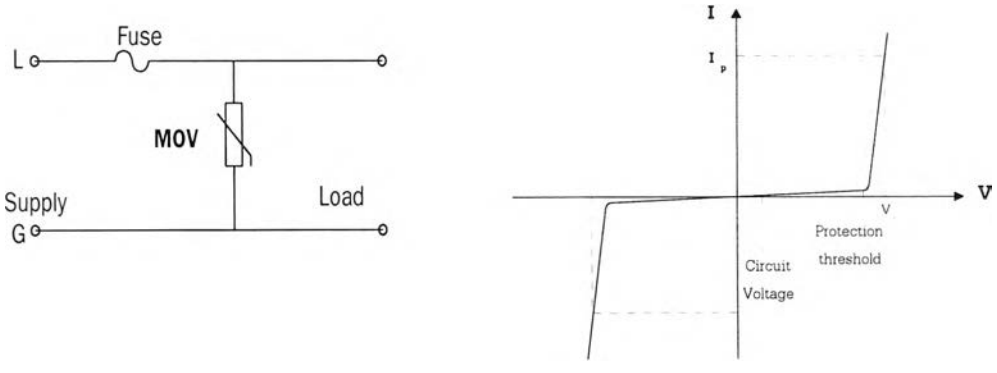
ค่าคงตัว α จะมีค่าประมาณ 35-50

สาร ZnO มีความต้านทานจำเพาะน้อย ในขณะที่สารเคลือบภายนอก ZnO จะมีความต้านทานจำเพาะสูงถึง 10^{10} Ω-cm และมีค่าเปอร์มิตติวิตีสูง 500-1000 จึงมีคุณสมบัติของตัวเก็บประจุ C ฉะนั้นแผ่นบล็อกความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น จึงเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลได้ดังรูป ก-1



รูปที่ ก-1 วงจรสมมูลของแผ่นบล็อกสารออกไซด์โลหะ

อุปกรณ์ MOV ไม่มีความไวต่อผลกระทบของความเปรอะเปื้อนภายนอก โดยเมื่อใช้ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิด ZnO กระแสรั่วผ่านความต้านทานของตัวสะกัดเสิร์จที่แรงดันใช้งานมีค่าต่ำในหน่วยของ mA เท่านั้น เมื่อต่ออุปกรณ์นี้ระหว่างสายและจุดร่วม แสดงดังรูปที่ ก-2 ที่ระดับแรงดันใช้งานปกติอุปกรณ์จะมีคุณสมบัติเป็นค่าความต้านทานสูง แต่เมื่อเกิดแรงดันเสิร์จขึ้นในสาย AC หรือ DC ทำให้แรงดันเพิ่มสูงขึ้นเกินจุดทำงานของ MOV และค่าความต้านทานจะลดลงอย่างรวดเร็วส่งผลให้ระดับแรงดันทรานเซียนต์ลดลงมาอยู่ในระดับที่ยอมได้ ส่วนฟิวส์ที่ใช้ป้องกันภายนอกนั้นใช้เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดแก่ MOV ด้วยสาเหตุจากเสิร์จที่มีพลังงานสูงมาก

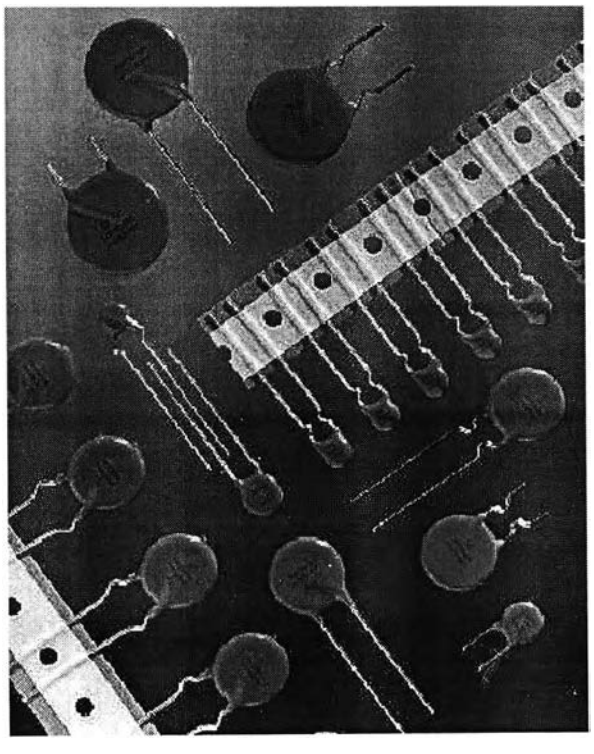


รูปที่ ก-2 ตัวสะกัดเสิร์จชนิดออกไซด์โลหะ (MOV)

ก.3 การเลือกใช้งาน MOV มีข้อพิจารณาดังนี้

1) ค่าพิกัดแรงดันที่สภาวะอยู่ตัว (Steady-State)
2) ค่าประมาณของพลังงานจากเสิร์จซึ่งอุปกรณ์ต้องรับ
3) ค่าสูงสุดของกระแสทรานเซียนต์ (Peak Transient Current)
4) ค่าการกระจายหายไปของพลังงานที่เป็นไปได้
5) การเลือกโมเดลให้ถูกต้องกับรูปแบบคุณลักษณะของ Voltage-Clamping ที่ต้องการ

ค่าพารามิเตอร์สำหรับ MOV คือ แรงดันสูงสุดขณะทำงาน (V_m) กระแสรั่วในสภาวะปกติ I_d แรงดันเบรกดาวน์ (V_n) ค่ากระแสสูงสุด (I_p) และ Clamping Voltage (V_c) ที่ค่ากระแสสูงสุด กรณีเกิดกระแสทรานเซียนต์ที่รุนแรงที่สุด ตัว MOV ยังจะต้องใช้งานได้โดยไม่เกิดความเสียหาย และลดค่าแรงดันเปิดวงจรสูงสุดให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยในการป้องกันอุปกรณ์ ตัวอย่างเช่น MOV มีค่า Camping Voltage คือ 1000 V ต่ออยู่กับวงจรแรงดันใช้งาน 240 V โดยที่รูปคลื่นเสิร์จ 0.5 μs ความถี่ 100 kHz พลังงาน 1.6 J มีค่าการดีสชาร์จของกระแส 200 A MOV รับพลังงาน 80 J ในการดีสชาร์จกระแสเสิร์จ 3 kA ด้วยความสามารถในการรองรับพลังงานของเสิร์จได้สูงและราคาถูก จึงได้นำมาใช้ในการป้องกันเป็นตัวสะกัดเสิร์จ



รูปที่ ก-3 ตัวอย่างลักษณะภายนอกของตัวสะกัดเสิร์จชนิดออกไซด์โลหะ (MOV)

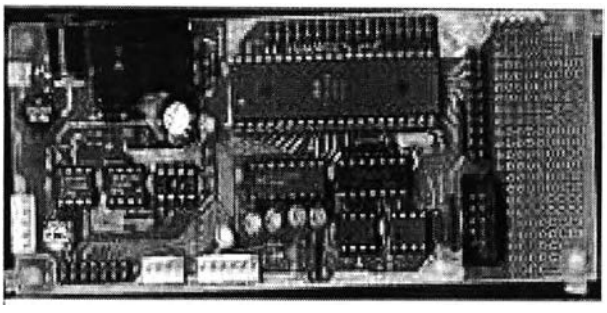
ภาคผนวก ข.
บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ CP-S8252 V1.0

จากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้เกิดการพัฒนาทางด้านไมโครโปรเซสเซอร์และไมโครคอมพิวเตอร์ขึ้น เมื่อกล่าวถึงระบบที่มีการควบคุม (Control System) เช่น การนำมาใช้งานในการควบคุมเครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่างๆ หรือกระทั่งหุ่นยนต์ ฯลฯ โดยที่จะรู้จักกันดีในชื่อของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ซึ่งตระกูลของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ได้รับความนิยมแพร่หลายอย่างมากคือไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ได้ถูกผลิตออกมามากมายหลายบริษัท เช่นไอซีที่ผลิตจากบริษัท ATMEL

ในปัจจุบันนั้นมีความสามารถในการทำงานแบบ Single Chip คือ ไอซีได้รับการบรรจุหน่วยความจำโปรแกรมไว้ภายในแบบแฟล็ช สามารถลบและเขียนใหม่ได้นับพันรอบทำให้ไม่ต้องพึ่งพาโปรแกรมมอนิเตอร์หรือดีบักเกอร์ของบริษัทใดบริษัทหนึ่ง เพราะผู้เขียนโปรแกรมสามารถเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานต่างๆได้ด้วยตัวเอง ทำให้ต้นทุนและเวลาในการพัฒนาระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ลดลงอย่างมากเนื่องจากไม่ต้องใช้เครื่องมือพัฒนาจำพวกอีมูเลเตอร์และเครื่องโปรแกรมอีพรอม ระบบมีขนาดเล็ก และราคาถูก ซึ่งด้วยเทคโนโลยี ความเหมาะสม

ข้อดีต่างๆ ที่กล่าวมาของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 จึงมีแนวความคิดที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อให้เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำ มีระบบควบคุมการทำงานตามขั้นตอนที่ต้องการแบบอัตโนมัติเพื่อการใช้งานที่ง่าย สะดวกและรวดเร็ว

ฮาร์ดแวร์ที่เลือกใช้เป็นบอร์ดสำเร็จรูป รุ่น CP-S8252 ของบริษัท อีทีที จำกัด จุดที่สำคัญของบอร์ดดังกล่าวคือ ความสามารถของการดาวน์โหลดโปรแกรมควบคุมที่เขียนขึ้นเรียกว่า **การโปรแกรมในวงจร** หรือ **ในระบบ (In-system programming)** โดยใช้ลักษณะการติดต่อแบบ **SPI (Serial Peripheral Interface)** โปรแกรมลงไปในชิปได้โดยไม่ต้องพึ่งอุปกรณ์สำหรับโปรแกรมอื่นอีก ดังแสดงในรูปที่ ข-1



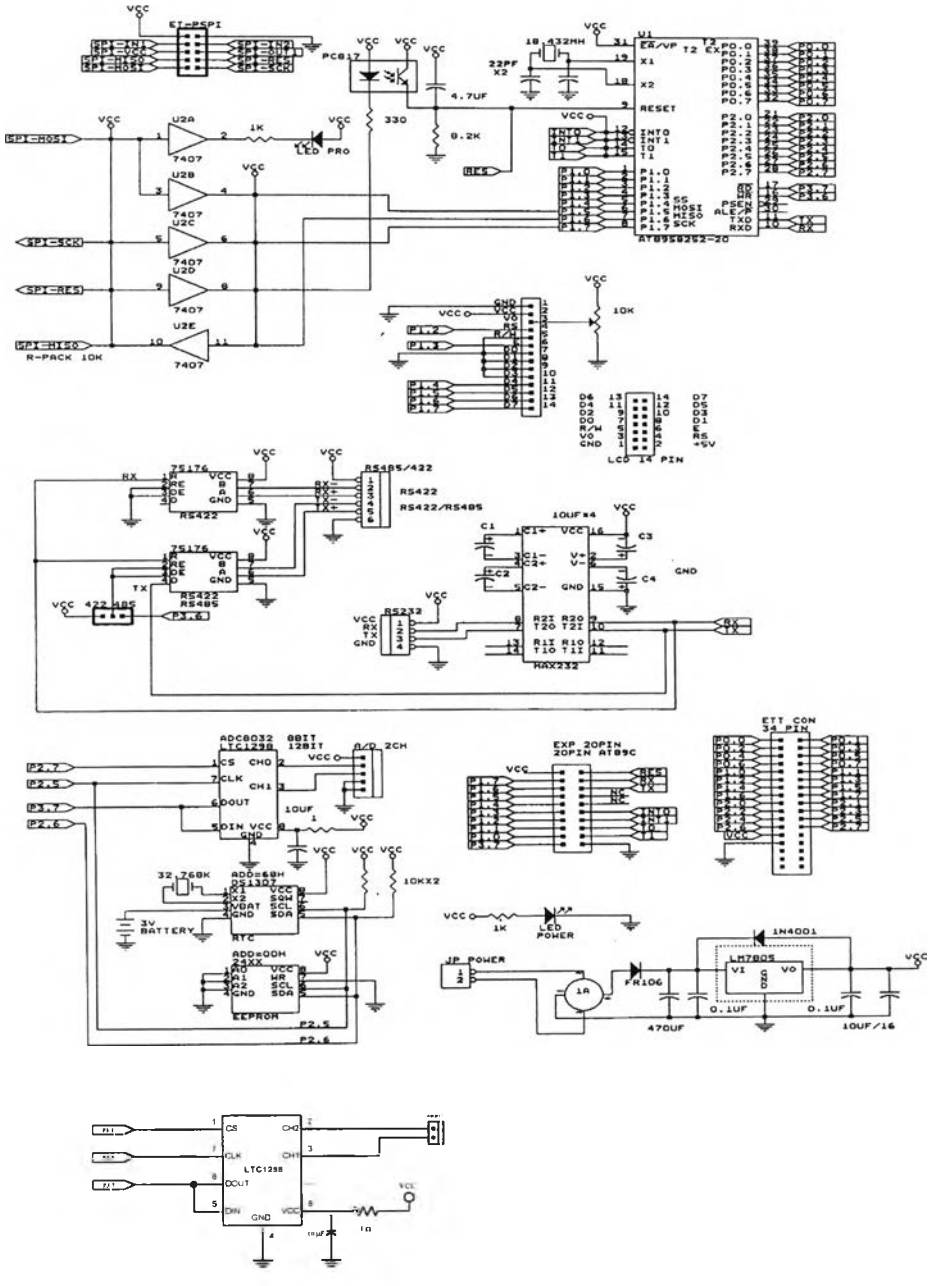
รูปที่ ข-1 ภาพถ่ายของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ CP-S8252 V1.0

คุณสมบัติของบอร์ด CP-S8252

- ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 เบอร์ AT89S8252
- มีหน่วย ET-SPI ทำหน้าที่เป็นหน่วยดาวน์โหลดข้อมูลลงไปในหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89S8252 ทำให้การพัฒนาโปรแกรมมีความสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายโดยไม่ต้องมีอุปกรณ์อื่นๆ มาช่วยพัฒนาโปรแกรม
- มีพอร์ตเชื่อมต่อแบบ 4 บิตกับจอแสดงผล LCD
- หน่วยแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล จำนวน 2 ช่องสัญญาณ 12 บิต
- RTC Unit เป็นระบบเวลาจริงที่สามารถต่อเพิ่มเติมลงบน CP-S8252 ได้ซึ่งบนบอร์ดได้จัดเตรียม Socket ไว้ให้เรียบร้อยแล้ว
- หน่วยความจำใช้เก็บข้อมูลถาวร (Eeprom Memory Unit) ถูกออกแบบให้ใช้หน่วยความจำแบบ Eeprom 24xx โดยกำหนดให้มีการติดต่อสื่อสารระหว่าง Eeprom กับ MCU กำหนดให้แอดเดรสของ Eeprom อยู่ที่ 00H
- หน่วยการสื่อสารแบบ RS232 โดยการใช้ PORT SERIAL ของ MCU และเปลี่ยนระดับสัญญาณแรงดันเป็นมาตรฐาน RS232

- หน่วยสื่อสารแบบ RS422 และ RS485 ซึ่งเป็นการสื่อสารระยะไกล การสื่อสารแบบ RS422 จะเป็นการสื่อสารแบบ FULL DUPLEX โดยจะต้องเพิ่ม OPTION RS422 ลงใน CP-S8252 โดยการเพิ่ม IC#75176
- การเชื่อมต่อแบบ 34 pin ได้ออกแบบให้ใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกที่เป็นมาตรฐาน 72IOZ80 ซึ่งจะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ I/O ของบริษัท อีทีที จำกัด หรือสามารถใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นได้แต่ต้องพิจารณาเรื่องขาสัญญาณและไฟด้วย
- การเชื่อมต่อแบบ 20 pin นอกจากถูกออกแบบให้ใช้งานในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกทั่วไปแล้วยังออกแบบให้ใช้งานเป็น Emulate ของ MCU (AT89C1051, AT89C2051,AT894051) ขนาดเล็กได้ โดยไม่ต้องหาชุด Emulate ของ MCU เหล่านั้น
- หน่วยจ่ายและรักษาแรงดันและกระแสให้กับอุปกรณ์บนบอร์ดควบคุม (Control Board) ทั้งหมดโดยจะรักษาระดับแรงดันต้านเอาท์พุตไว้ที่ 5 VDC ที่กระแสสูงสุด 1 A

ซึ่งวงจรของบอร์ด CP-S8252 ดังแสดงในรูปที่ ข-2



รูปที่ ข-2 วงจรของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ CP-S8252 V1.0

ภาคผนวก ค.

เอสซีอาร์ (Silicon Controlled Rectifier : SCR)

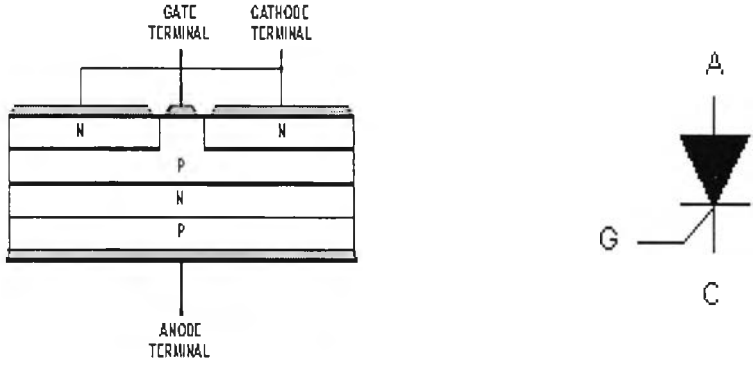
ไทรีสเตอร์ (Thyristor) หมายถึงสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้าง ประกอบด้วยชั้นสารกึ่งตัวนำ P และ N วางเรียงสลับกันสี่ชั้น ถ้ามีขั้วภายนอก 2 ขั้ว จะเรียกว่า ไดโอดช็อคลีย์ (Schockley) ถ้ามี 3 ขั้วจะเรียกว่า SCR ซึ่งย่อมาจาก Silicon Controlled Rectifier ถ้ามีขั้วต่อจากสารกึ่งตัวนำทั้งสี่ชั้น จะเรียกว่า SCS หรือ Silicon Controlled Switch และอาจทำการสวิตช์ได้ 1 หรือ 2 ทางก็ได้ ไทรีสเตอร์ที่นำกระแสทางเดียวได้แก่ SCR (Silicon Controlled Rectifier) GTO (Gate Turn Off Thyristor) LASCR (Light Activeated SCR) และไทรีสเตอร์ที่นำกระแสได้สองทางได้แก่ TRIAC (Triode AC Switch)

SCR เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่จัดอยู่ในตระกูลไทรีสเตอร์ (Thyristor) ได้ถูกพัฒนาขึ้นในปลายปี ค.ศ. 1957 โดยมีทีมวิศวกรของบริษัท General Electric และได้ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในวงการของอุตสาหกรรมมากที่สุดแม้ว่า TRIAC จะได้รับความนิยมอยู่ไม่น้อย แต่ในบางกรณีเราก็นิยมใช้ SCR สองตัวกลับหางกัน ซึ่งแม้ว่าจะยุ่งยากกว่าบ้างแต่ก็มีสมรรถนะดีกว่า TRIAC หนึ่งตัว

ค.1 โครงสร้างภายในและสัญลักษณ์

เอสซีอาร์ ทำหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ในทิศทางเดียว มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา การทำงานมีความเชื่อถือได้สูงเมื่อใช้ระบบป้องกันที่เหมาะสม เอสซีอาร์เป็นสวิตช์ที่มีความต้านทานสูงแม้ในขณะได้รับแรงดันไปข้างหน้า (Forward Voltage) จนกว่าจะมีสัญญาณจุดชนวนเกตที่เหมาะสมป้อนให้กับขาเกตของเอสซีอาร์ ก็จะเริ่มนำกระแสได้และค้างสภาวะการทำงาน (Latching) คือนำกระแสต่อไปนี้ได้โดยลำพังในสภาวะนี้ เอสซีอาร์จะมีความต้านทานภายในต่ำมาก

เอสซีอาร์จะประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำซิลิกอน ชนิด P,N,P,N เรียงสลับกัน 4 ชั้น ดังรูปที่ ค-1 จึงมี 3 รอยต่อ และมีขั้วสำหรับต่อวงจรภายนอก 3 ขั้ว คือขั้ว แอโนด (Anode : A) ขั้วแคโทด (Cathode : k) และขาเกต (Gate ; G)



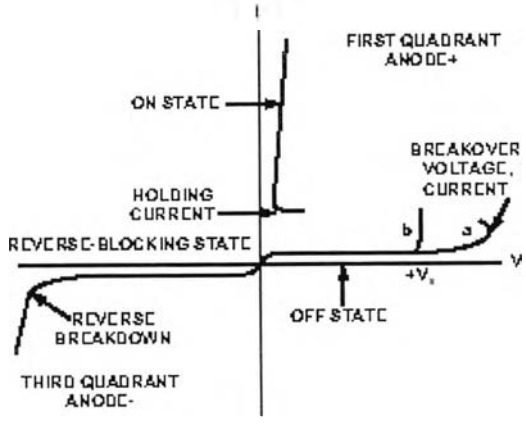
ก) โครงสร้าง (ข) สัญลักษณ์

รูปที่ ค-1 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ SCR

ค.2 คุณลักษณะแรงดันและกระแสของ SCR

SCR มีลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ ค-2 ซึ่งสามารถแบ่งสภาวะการทำงานได้ 3 สภาวะ คือ

1. สภาวะปิดกั้นแรงดันย้อนกลับ (Reverse Blocking)
2. สภาวะปิดกั้นแรงดันไปหน้า (Forward Blocking)
3. สภาวะนำกระแสไปหน้า (Forward Conduction)



รูปที่ ค-2 ลักษณะสมบัติ กระแส-แรงดัน ของ SCR

กล่าวคือ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดเป็นลบ SCR จะไม่นำกระแส แต่จะมีกระแสรั่วไหล (I_R) เพียงเล็กน้อย ทำให้อุณหภูมิของรอยต่อสูงขึ้นเป็นผลให้กระแสรั่วไหลสูงขึ้นเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ดังนั้นค่ากระแสสูงสุดภายใต้สภาวะไบแอสย้อนกลับจะถูกกำหนดโดยผู้ผลิต เพื่อจำกัดผลของความร้อนภายใน และในช่วงไบแอสย้อนกลับนี้เมื่อป้อนแรงดันสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดเกิดการพังทะลุที่แรงดัน Reverse Breakdown ลักษณะการพังทะลุจะเหมือนกับการพังทะลุของไดโอดธรรมดา กระแสจะไหลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งสามารถทำให้ SCR เสียหายได้เนื่องจากอุณหภูมิบริเวณรอยต่อสูงเกินค่าที่กำหนด

แต่ถ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดเป็นบวกและให้กระแสเกตเป็นศูนย์ ในตอนแรก SCR ก็จะยังไม่นำกระแสเช่นกัน ต่อเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแอโนด มีค่าถึง Forward Breakdown Voltage หรือ V_{BO} แล้วกระแสก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดก็จะลดลงต่ำกว่า V_{BO} เข้าสู่สภาวะนำกระแสได้ ซึ่งมีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแส โดยประมาณ 1-1.5 V ขณะเมื่อเอสซีอาร์เริ่มนำกระแสถ้าหากมีกระแสแอโนดสูงกว่าค่ากระแสค้าง (Latching Current : I_L) เอสซีอาร์ก็จะสามารถคงค้างสภาวะการนำกระแสต่อไปได้ โดยมิต้องอาศัยกระแสเกตอีก เมื่อเอสซีอาร์นำกระแสเต็มที่แล้ว ถ้ากระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ลดลงต่ำกว่ากระแสยึด (Holding Current : I_H) ของเอสซีอาร์แล้ว เอสซีอาร์ก็จะหยุดนำกระแสได้เอง

เนื่องจากเมื่อเอสซีอาร์นำกระแสแล้ว จะมีพาหะส่วนเกินอยู่ในเอสซีอาร์จำนวนมาก ดังนั้นเพื่อให้เอสซีอาร์เข้าสู่สถานะปิดกั้นกระแสโดยสมบูรณ์ จะต้องรอให้พาหะส่วนเกินนี้สลายตัวหมดไปเสียก่อน เวลาที่ต้องการเรียกว่า Turn-off time ดังนั้นการลดกระแสที่ขั้วแอโนดให้ต่ำกว่า I_H แล้วทำให้แรงดันที่ขั้วแอโนดเป็นบวกใหม่ภายในเวลาน้อยกว่า Turn-off time เอสซีอาร์จะไม่สามารถปิดกั้นกระแสได้

ค.3 ขีดจำกัดของเอสซีอาร์

เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกใช้เอสซีอาร์ได้อย่างเหมาะสม ผู้ผลิตจะบอกขีดจำกัดต่างๆของเอสซีอาร์ มาให้ซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

1) แรงดันไฟฟ้าแอโนด มักบอกมาในรูปของย่านแรงดันไฟฟ้าใช้งาน เช่น 500-1300 V ซึ่งถ้าใช้เกินค่าสูงสุดที่กำหนดให้ ก็จะทำให้เกิดการ Breakdown ทางด้านแรงดันแอโนดเป็นลบ หรือเกิดการ Breakover ทางด้านแรงดันแอโนดเป็นบวกเมื่อ $I_G = 0$ ได้

2) กระแสแอโนด เมื่อมีกระแสแอโนดไหลผ่านเอสซีอาร์ จะเกิดพลังงานสูญเสียขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสแอโนดและแรงดันแอโนด พลังงานสูญเสียนี้จะอยู่ในรูปของความร้อนซึ่งถ้าความร้อนมีมากเกินไปก็จะทำให้เอสซีอาร์เสียหายได้ ดังนั้นขีดจำกัดด้านกระแสแอโนดของเอสซีอาร์จึงขึ้นกับรูปแบบของกระแสแอโนดเองด้วย ตัวอย่างเช่น เอสซีอาร์ของ GE รุ่น C380 $I_{T(RMS)}$ = 380 A หมายความว่ากระแส rms สูงสุดของ Half wave = 380 A ; $I_{T(AV)}$ ที่มุมนำกระแส 180° อุณหภูมิ case 80° C = 235 A หมายความว่าเมื่อเราสามารถรักษาอุณหภูมิของ case ให้เท่ากับ 80° C ได้ เอสซีอาร์ก็จะทนกระแสซึ่งมีมุมนำกระแส 180° ได้ โดยกระแสมีค่าเฉลี่ยไม่เกิน 235 A

3) อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสแอโนด ในขณะที่จุดชนวนเอสซีอาร์กระแสเกตจะทำให้เอสซีอาร์เริ่มนำกระแสได้โดยที่พื้นที่การนำกระแสจะอยู่บริเวณใกล้ขั้ว เกต และจะแผ่ยื่นไปเต็มเนื้อที่เอสซีอาร์ในภายหลัง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าถ้ากระแสจำนวนมากแม้จะน้อยกว่าค่ากระแสสูงสุดก็ตามไหลผ่านเอสซีอาร์ทันที ที่เริ่มจุดชนวน (di/dt ค่าสูง) ความหนาแน่นของกระแสแอโนดซึ่งไหลผ่านพื้นที่นำกระแสตอนเริ่มแรกจะมีค่าสูงมาก และทำให้เกิดความร้อนเฉพาะจุดขึ้น ถ้ามีค่ามากเกินไปก็จะทำให้เอสซีอาร์เสียหายได้ ดังนั้นผู้ผลิตจึงกำหนดค่า di/dt สูงสุดไว้ด้วย (หน่วยเป็น A/μs)

4) อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันแอโนด การเปลี่ยนแปลงแรงดันแอโนดเป็นบวกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วขณะที่เอสซีอาร์ไม่นำกระแส อาจทำให้เอสซีอาร์นำกระแสได้ ดังนั้นผู้ผลิตจึงกำหนดค่า dv/dt สูงสุดไว้ด้วย (หน่วยเป็น V/μs) ผู้ออกแบบวงจรสามารถจำกัดค่า dv/dt ที่เกิดกับเอสซีอาร์ได้โดยใช้วงจร Snubber ต่อคร่อมขั้วของเอสซีอาร์

5) พิกัดกระแสเสิร์จสูงสุด คืออัตราของกระแสที่กำหนดในเงื่อนไขที่ผิดปกติ เช่น เมื่อเกิดการลัดวงจรจะมีกระแสไหลในวงจรสูงกว่าตอนปกติมาก โดยทั่วไปพิกัดนี้จะมีค่าประมาณ 15 เท่าของกระแสโหลด

ค.4 กรรมวิธีการนำกระแสของเอสซีอาร์

1) ป้อนกระแสเกต (Gate Current)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการควบคุมให้เอสซีอาร์นำกระแสโดยทั่วไป เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกให้กับขาเกตเมื่อเทียบกับขั้วแคโทดแล้ว มีกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ (ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด) สูงกว่ากระแสค้างแล้วสามารถตัดกระแสเกตออกไปได้โดยเอสซีอาร์ยังคงนำกระแสต่อไป แต่ถ้าตัดกระแสเกตออกโดยที่กระแสไหลผ่านเอสซีอาร์มีค่าต่ำกว่ากระแสค้างแล้วเอสซีอาร์ก็จะไม่สามารถนำกระแสต่อไปได้ ดังนั้นสัญญาณเกตจะต้องมีความกว้างพอที่จะทำให้กระแสไหลผ่านเอสซีอาร์สูงกว่ากระแสค้างก่อนที่จะตัดกระแสออก

2) ใช้แสง

เอสซีอาร์แบบที่ใช้แสงจุดชนวนเกตมีชื่อเรียกว่า LASCR (Light Activated SCR)

3) ใช้แรงดันไฟฟ้าสูง

ขณะที่เพิ่มแรงดันไปหน้า (Forward Voltage) ให้สูงขึ้นจนมากพอที่จะทำให้บริเวณรอยต่อเกิดเบรกดาวน์แล้ว เอสซีอาร์จะเปลี่ยนไปยังสภาวะการนำกระแสได้โดยไม่ต้องมีกระแสเกต สภาวะนี้เป็นสภาวะที่ควรหลีกเลี่ยงโดยทั่วไปแรงดันเบรกโอเวอร์ไปหน้าจะมีค่ามากกว่าแรงดันเบรกดาวน์ย้อนกลับ

ค.5 วิธีการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์ (Commutation)

เมื่อเอสซีอาร์อยู่ในสภาวะนำกระแสเต็มที่แล้ว โดยมีกระแสแอโนดสูงกว่ากระแสยึดแล้วการตัดกระแสเกตออกจะไม่ทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสได้ การทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสมีวิธีดังนี้คือ

1) วิธีธรรมชาติ (Natural Commutation)

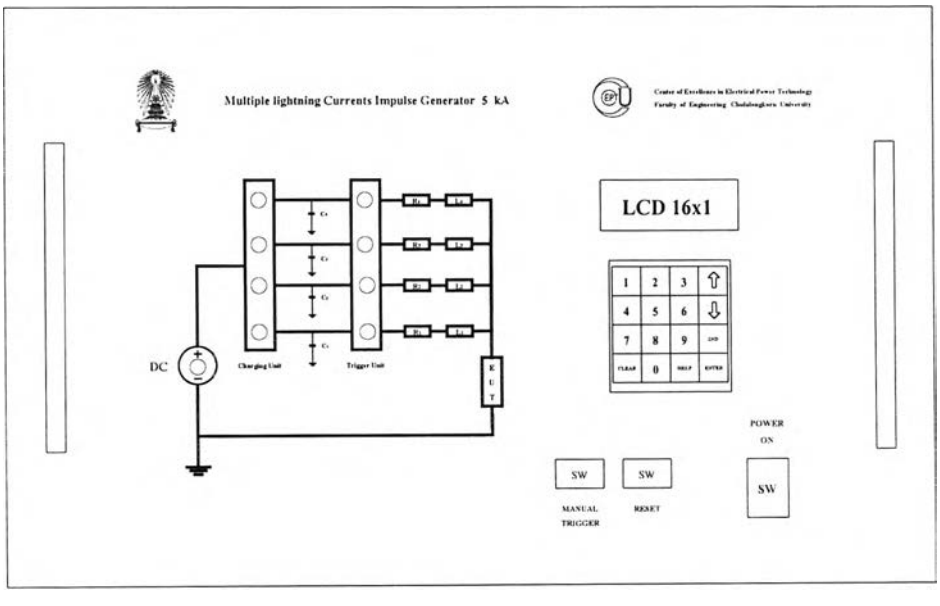
เช่น ในกรณีที่เอสซีอาร์ต่ออยู่ในวงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับกระแสจะลดลงสู่ศูนย์ทุกๆรอบคลื่นในช่วงบวก และเอสซีอาร์จะได้รับแรงดันย้อนกลับในทุกๆรอบคลื่น ถ้าช่วงเวลาที่ได้รับแรงดันย้อนกลับไปจนถึงเวลาที่รอบคลื่นช่วงบวกกลับมาอีกครั้งนานกว่า Turn-off Time ของเอสซีอาร์ก็จะทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสได้ ส่วนกรณีใช้เอสซีอาร์ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรงได้รับแรงดันไปหน้าจากแหล่งจ่ายตลอดเวลา การลดกระแสเอสซีอาร์ลดลงต่ำกว่ากระแสยึดอย่างง่ายทำได้โดยการเปิดสวิตช์วงจรหรือแบ่งกระแสจากเอสซีอาร์ผ่านวงจรขนาน

2) วิธีบังคับ

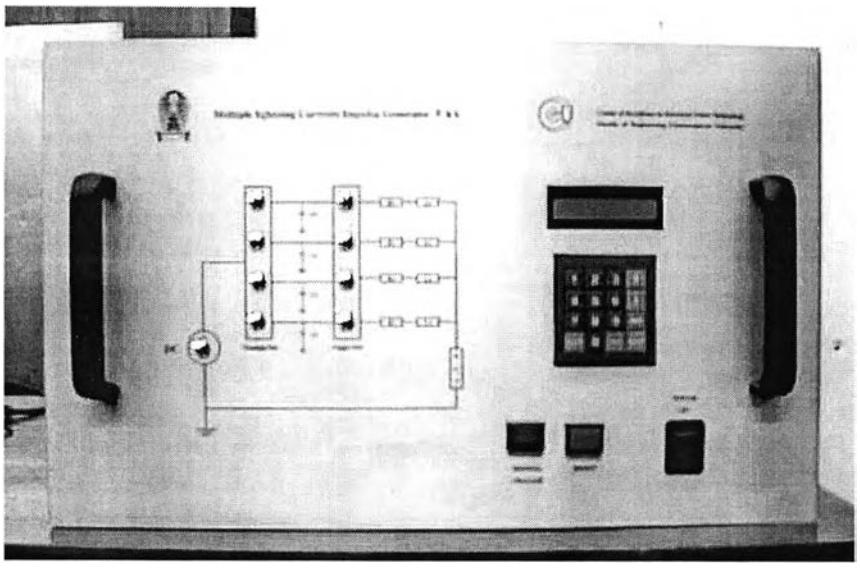
การควบคุมให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแส โดยใช้อุปกรณ์ภายนอกที่ไม่ได้เป็นทางไหลผ่านของกระแสโหลดตามปกติ เรียกว่า วิธีบังคับ เป็นการทำให้กระแสไหลลดลงสู่ศูนย์ โดยทั่วไปจะใช้ตัวเก็บประจุจ่ายแรงดันย้อนกลับให้แก่เอสซีอาร์ เช่น วงจรชอปเปอร์ (Choppers Circuit)

ภาคผนวก ง.
การใช้งานเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำ

เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมานี้ ใช้การควบคุมการทำงานทั้งหมดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยรับคำสั่งผ่านทาง คีย์บอร์ดแบบเมตริกซ์ขนาด 4x4 และสวิตช์แบบกดติดปล่อยดับ มีการแสดงผลด้วยจอ LCD แบบ 16x1 พร้อมทั้ง LED สีแดงที่บอกสถานะภาพการทำงานของเครื่องขณะนั้น ดังแสดงในรูปที่ ง-1



รูปที่ ง-1 แผนผังด้านหน้าของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำ



รูปที่ ง-2 ภาพถ่ายด้านหน้าของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำ

ง.1 หน้าที่ของปุ่มบนแผงหน้าปัดเครื่อง

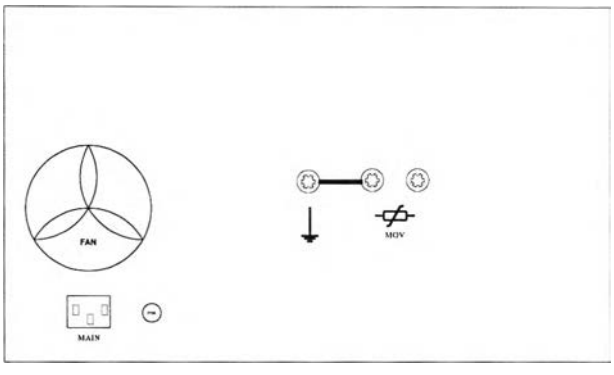
1) AC POWER SW. เป็นสวิตช์เปิด-ปิด แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับให้กับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตช์ชิ่ง (Switching DC Supply Unit) และวงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 1,200 V (DC Supply unit)

2) RESET SW. เป็นสวิตช์แบบกดติดปล่อยดับเพื่อรีเซตการทำงานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในกรณีที่โปรแกรมการทำงานผิดพลาด หรือต้องการใช้งานใหม่อีกครั้งหนึ่งหลังจากได้สั่งจบการทำงาน

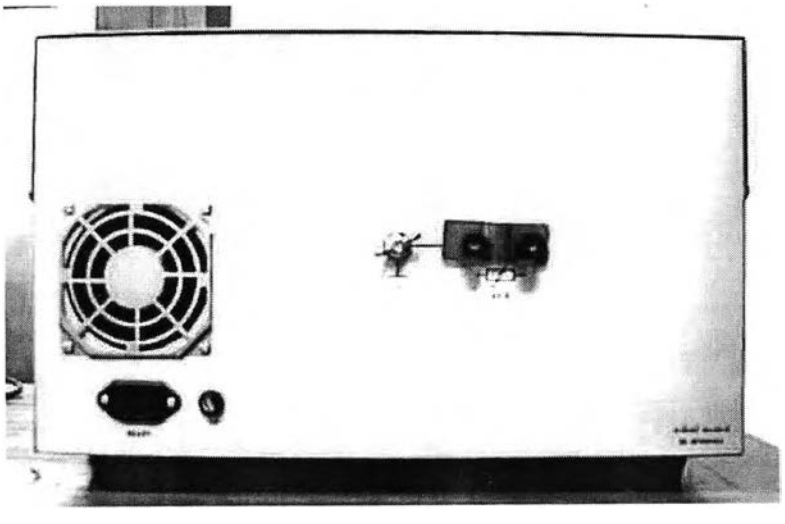
3) MANUAL TRIGGER SW. เป็นสวิตช์แบบกดติดปล่อยดับ โดยการป้อนลอจิกให้ไมโครคอนโทรลเลอร์รับรู้เพื่อสั่งให้วงจรสั่นไกของไทรีสเตอร์ (SCR) ทำงานเพื่อดีสชาร์จกระแสอิมพัลส์จ่ายให้กับอุปกรณ์ที่ทดสอบ (MOV) ต่อไป

4) KEYPAD เป็นคีย์บอร์ดแบบเมตริกซ์ ขนาด 4x4 ให้ผู้ใช้กดป้อนข้อมูลตามเมนูขั้นตอนการทำงานของเครื่อง โดยจะแสดงข้อความให้เห็นที่หน้าจอ LCD

ง.2 รายละเอียดของแผนผังด้านหลังเครื่อง



รูปที่ ง-3 แผนผังด้านหลังของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำ

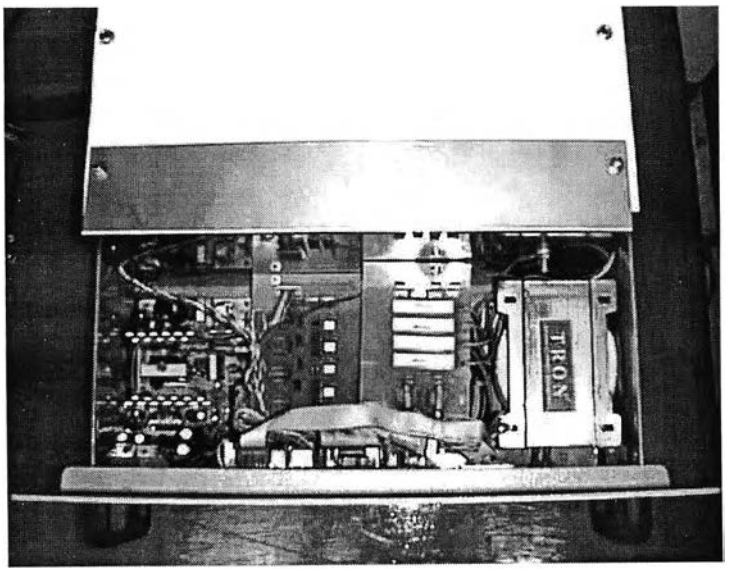


รูปที่ ง-4 ภาพถ่ายด้านหลังของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำ

1) MAIN ใช้สำหรับต่อสายเพื่อรับไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V 50 Hz จากระบบไฟฟ้าแบบมีสายกราวน์ด้วย หรือทำการเชื่อมต่อกราวน์เข้ากับระบบด้วยแผ่นทองแดง สายไฟตัวนำอื่นๆ ที่ขั้วต่อซึ่งมีสัญลักษณ์กราวน์

2) FUSE ใช้เป็นตัวป้องกันในกรณีเกิดการลัดวงจรของระบบไฟฟ้า

3) ขั้วต่อ 2 ขั้ว ใช้สำหรับยึดขาของอุปกรณ์ที่จะทดสอบ คือ เมทัลออกไซด์วาริสเตอร์ (MOV) หรืออุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินประเภทอื่น



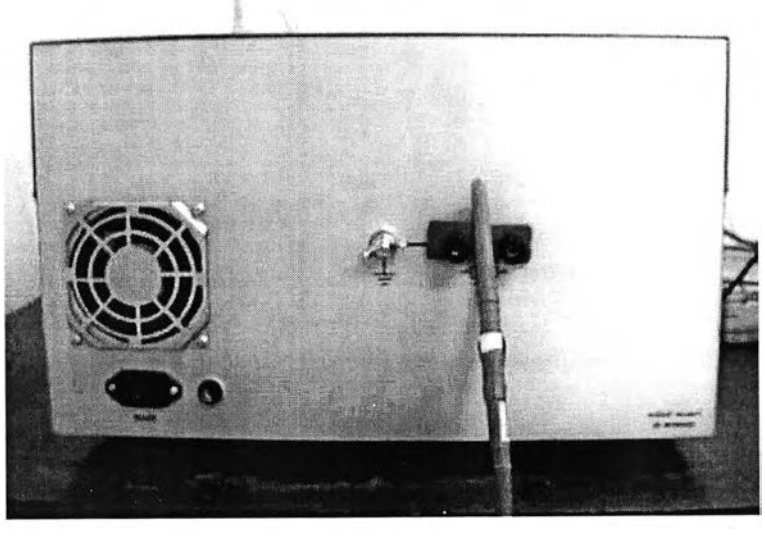
รูปที่ ง-5 ภาพถ่ายด้านในของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำ

ง.3 ข้อแนะนำในการใช้งาน (Operating instruction)

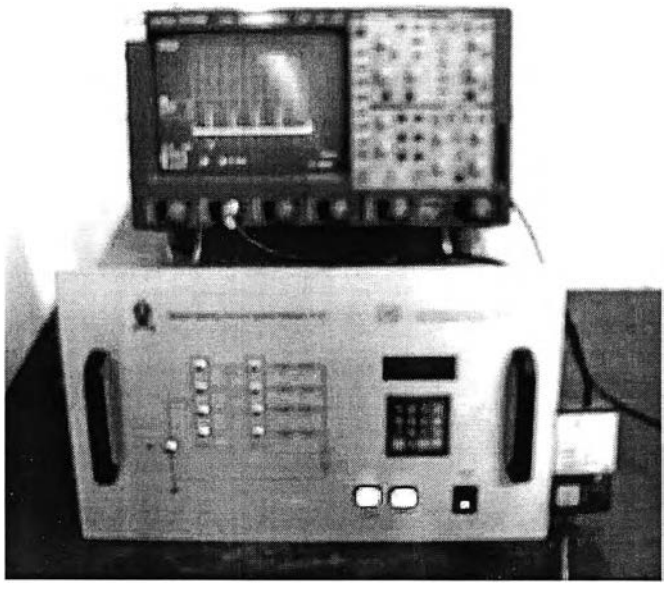
1) ต่อสายไฟแบบปลั๊ก 3 ขา เข้าที่ช่อง MAIN เชื่อมต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V 50 Hz

2) กรณีใช้งานในห้องปฏิบัติการที่มีระบบกราวน์ที่ดี ควรเชื่อมต่อเข้ากับขั้วต่อกราวน์ทางด้านหลังเครื่องด้วย

3) กรณีต้องการบันทึกรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำที่สร้างได้จากเครื่องกำเนิดด้วยอุปกรณ์วัดกระแส (Current Waveform Transducer) ต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวคล้องไว้กับแผ่นทองแดงที่เชื่อมต่อระหว่างขั้วต่อไบดิ่งโพสทั้ง 2 ขั้ว แสดงดังรูปที่ ง-6 แล้วเชื่อมต่อสายสัญญาณเข้ากับดิจิตอลออสซิลโลสโคปเพื่อบันทึกรูปคลื่นดังกล่าว แสดงดังรูปที่ ง-7

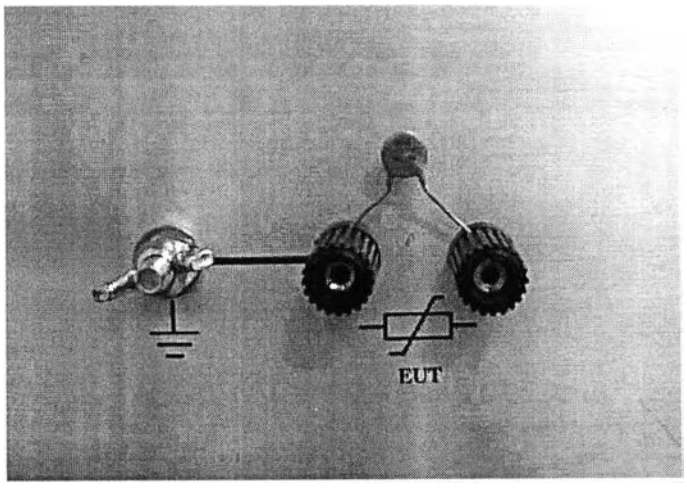


รูปที่ ง-6 ภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์วัดกระแสเพื่อบันทึกรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำทางด้านหลังของเครื่องกำเนิด



รูปที่ ง-7 ภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อบันทึกรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซ้ำ

4) ในการใช้งานจริงเพื่อทดสอบกับอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าหรือตัวสะกัดเสิร์จ โดยการยึดขาตัว MOV ที่ขั้วต่อทั้ง 2 ขั้ว ให้แน่น ดังแสดงในรูปที่ ง-8



รูปที่ ง-8 ภาพถ่ายการยึด MOV ที่ขั้วต่อทางด้านหลังของเครื่องกำเนิด

5) ตรวจสอบการเชื่อมต่อดังกล่าวข้างต้นให้เรียบร้อย แล้วเปิดสวิตช์ POWER ที่ด้านหน้าเครื่องจะมีหลอดไฟสีแดงบนตัวสวิตช์สว่างขึ้น พร้อมทั้งจอ LCD จะปรากฏข้อความตามลำดับดังนี้

A MULTIPLE LIGHTNING CURRENTS IMPULSE GENERATOR V1.0

START PROGRAM >>

------MENU------

1. Peak Current

Ipeak(1-5kA):_

เมื่อข้อความปรากฏถึงขั้นนี้จะมีเคอร์เซอร์กระพริบรอ ให้กดสวิตช์ตัวเลข 1-5 ที่คีย์บอร์ดและกด **ENTER** ซึ่งหมายถึงค่าสูงสุดของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน 8/20 μs ตามที่ต้องการมีค่าตั้งแต่ 1 kA ถึง 5kA
หน้าจอ LCD จะปรากฏข้อความ

2. Number Of Pulses

Npulses(1-4):_

เมื่อข้อความปรากฏถึงขั้นนี้จะมีเคอร์เซอร์กระพริบรอ ให้กดสวิตช์ตัวเลข 1-4 ที่คีย์บอร์ดและกด **ENTER** ซึ่งหมายถึงการกำหนดจำนวนอิมพัลส์ที่ต่อเนื่องกัน ถ้ากดเลข 1 คือ ต้องการอิมพัลส์เดี่ยว จะข้ามขั้นตอนที่ 3 นี้ไปขั้นตอนที่ 4 ถ้าไม่ใช่หน้าจอ LCD จะปรากฏข้อความ

3. Time Intervals

RANGE(10-200)ms:

Tintv(1-2)ms:_

เมื่อข้อความปรากฏถึงขั้นนี้ก็จะมีเคอร์เซอร์กระพริบรอ ให้กดสวิตช์ตัวเลขในช่วงที่กำหนดคือ 10-200 เรียงตามลำดับ และกด **ENTER** ซึ่งหมายถึงการกำหนดช่วงเวลาห่างกันของรูปคลื่นอิมพัลส์แรกกับรูปคลื่นอิมพัลส์ถัดมา ถ้าข้างต้นกำหนดจำนวนอิมพัลส์คือ 3 หรือ 4 หน้าจอ LCD จะปรากฏข้อความ

Tintv(2-3)ms:

Tintv(3-4)ms:

ให้ปฏิบัติตามเหมือนดังข้างต้นที่กล่าวมาจนจบ หน้าจอ LCD จะปรากฏข้อความ

4. TRIGGER :

A:AUTO , B:MANUAL

TRIGGER:_

เมื่อถึงขั้นนี้จะมีเคอร์เซอร์กระพริบรอ ให้กดสวิตช์เลือกตัวเลขระหว่าง 1 คือ AUTO และ 2 คือ MANUAL และกด **ENTER** ซึ่งหมายถึงการกำหนดวิธีการสั่งสั่นไก SCR ให้ดีสชาร์จกระแสอิมพัลส์เมื่อแรงดันอัดประจุมีค่าเท่ากับค่าแรงดันที่กำหนดไว้ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าสูงสุดของรูปคลื่นโดยทันที ในกรณีเลือกแบบ AUTO และถ้าเลือกแบบ MANUAL การทำงานข้างต้นจะรอจนกว่ามีการกดสวิตช์ **MANUAL TRIGGER**
ขั้นต่อไป หน้าจอ LCD จะปรากฏข้อความ

CHARGING: 1-4 set

Please Wait !!

CHARGING VOLTAGE

และจะปรากฏตัวเลขวิ่งแสดงถึงระดับแรงดันอัดประจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ เช่น

125 V 123V 124V 123V

การทำงานในขั้นนี้จะใช้เวลาชั่วขณะหนึ่ง จนกระทั่งระดับแรงดันอัดประจุสูงถึงค่าที่ตั้งไว้ระบบจะหยุดการอัดประจุ แล้วสั่งสั่นไก SCR โดยอัตโนมัติ กรณีที่กำหนดแบบ AUTO หากข้างต้นกำหนดเป็นแบบ MANUAL
หน้าจอ LCD จะปรากฏข้อความ

TRIG !! PRESS

<MANUAL TRIGGER>

ให้กดสวิตช์ **MANUAL TRIGGER** บนหน้าปัดของเครื่อง แล้วหน้าจอ LCD จะปรากฏข้อความ

RESTART PROGRAM?

YES Press <ENTER>

NO Press <CLEAR>

หมายถึง ระบบจะถามผู้ใช้ว่าต้องการที่จะทำงานต่อหรือไม่ กรณีต้องการหยุดการทำงานแล้ว ให้กดสวิตช์ **CLEAR** บนคีย์บอร์ด แล้วหน้าจอ LCD จะปรากฏข้อความ

******END*******

กรณีต้องการที่จะทำงานต่อให้กดสวิตช์ ENTER บนคีย์บอร์ด หน้าจอ LCD จะปรากฏข้อความ

CHANGE PARAMETER

YES Press <ENTER>

NO Press <CLEAR>

หมายถึง ระบบจะถามผู้ใช้ว่าต้องการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นอิมพัลส์หรือไม่ ถ้ากรณีที่ต้องการให้กดสวิตช์ **ENTER** บนคีย์บอร์ด ระบบจะทำงานวนกลับไปแสดงเมนูการรับค่าต่างๆ ตามลำดับ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น หากในกรณีไม่ต้องการเปลี่ยนแปลงค่าใดๆ ให้กดสวิตช์ **CLEAR** บนคีย์บอร์ด

ระบบจะทำงานในขั้นตอนการการอัดแรงดันให้แก่ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ตามลำดับต่อไปอีกครั้ง โดยใช้ค่าพารามิเตอร์เดิมก่อนหน้านี้ที่ระบบรับแล้วเก็บค่าไว้

ประวัติผู้เขียน

นายอานันทร์ หยงสตาร์ เกิดวันที่ 25 กันยายน พ.ศ. 2517 ที่เขตพญาไท กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2539 และได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ. 2540 โดยระหว่างการศึกษาในระดับปริญญามหาบัณฑิตได้รับทุนการศึกษาจากศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย