การออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 7.5kVA
ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

นายสิน เตียพิริยะกิจ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1388-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 7.5KVA REGULATED CHARGING UNIT OF IMPLUSE VOLTAGE GENERATOR UNIT BY USING MICROCONTROLLER

Mr.Sinn Thearpiriyakij

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1388-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 7.5kVA ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์
โดย	นายสิน เตียพิริยะกิจ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…………………………………………….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…………………………………………… ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ไชยะ แช่มช้อย)

…………………………………………... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)

……………………………………………กรรมการ

(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นายสิน เตียพิริยะกิจ : การออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 7.5kVA ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์. (DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 7.5kVA REGULATED CHARGING UNIT OF IMPLUSE VOLTAGE GENERATOR UNIT BY USING MICROCONTROLLER.) อ.ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์, จำนวนหน้า 94 หน้า. ISBN 974-03-1388-4.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นรายงานการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 7.5kVA เพื่อใช้ควบคุมแรงดันอัดประจุแบบอัตโนมัติ ช่วยผู้ปฏิบัติงานการทดสอบที่เกี่ยวกับการสร้างแรงดันอิมพัลส์ทดสอบความคงทนอยู่ได้ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่อแรงดันอิมพัลส์ตามที่มาตรฐานอุตสาหกรรมกำหนด การทดสอบสมรรถนะของเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุทำได้โดยการสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุสามารถควบคุมแรงดันอัดประจุได้ตามที่ออกแบบไว้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

4270592021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS : REGULATED CHARGING / IMPLUSE VOLTAGE GENERATOR

SINN THEARPIRIYAKIJ : DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 7.5KVA REGULATED CHARGING UNIT OF IMPLUSE VOLTAGE GENEARTOR UNIT BY USING MICROCONTROLLER. THESIS ADVISOR : KOMSON PETCHARAKS Dr.Sc.Techn, 94 pp. ISBN 974-03-1388-4.

This thesis deals with the design and construction of a 7.5kVA automatically regulated charging unit of impluse voltage genarator unit by using microcontroller. The aim of this equipment is to use for helping operator during impluse test of highvoltage apparatus according to international standard highvoltage testing. It's performance was tested by generating standard impluse voltage. The tested result shows that it can control the specified charging voltage.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical Engineering Student's signature ....

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

Academic year 2001 Co-advisor's signature ....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากอาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้แนวทางศึกษาวิจัย ,การแก้ปัญหาและแก้ไขข้อบกพร่องจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ อาจารย์ ไชยะ แช่มช้อย และ อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์ ที่ช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ คุณณรงค์ ทองฉิม ที่ให้คำแนะนำการออกแบบวงจรกรองเลือกใช้ออปแอมป์ คุณถาวร เอื้อดี ที่ให้คำแนะนำการใช้อุปกรณ์วัดและอุปกรณ์ทดสอบของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และคุณพัชราภา เลาหกุล ที่ช่วยเป็นกำลังใจที่ดีเยี่ยมและช่วยจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์ ตลอดจนพี่ๆและผองเพื่อนในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านที่เป็นกำลังใจและช่วยกันฝ่าฟันจนประสบผลสำเร็จ รวมทั้งบัณฑิตวิทยาลัยที่มอบทุนอุดหนุนโครงการวิจัยหรือค้นคว้าเพื่อทำวิทยานิพนธ์ประจำภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2544 ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ท้ายสุดข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่น้องของข้าพเจ้า ผู้เป็นกำลังใจและสนับสนุนในทุกๆด้านตลอดมา จนประสบผลสำเร็จ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

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

บทที่

1. บทนำ......1
    1.1 บทนำทั่วไป......1
    1.2 ที่มาของปัญหา......1
    1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต......2
    1.4 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์......2
    1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ......2
2. หลักการและทฤษฎี......3
    2.1 การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง......3
    2.2 หลักการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ......4
        2.2.1 การควบคุมเฟสเดียวแบบเต็มรูปคลื่น (Single-phase full-wave control)......5
    2.3 หลักการทำงานของไทริสเตอร์......9
        2.3.1 โครงสร้าง......9
        2.3.2 กลไกการเริ่มนำไฟฟ้า......9
        2.3.3 ลักษณะสมบัติของไทริสเตอร์......11
        2.3.4 วิธีการทำให้ไทริสเตอร์เริ่มนำไฟฟ้า......14
        2.3.5 วิธีการทำให้ไทริสเตอร์หยุดนำไฟฟ้า......14
        2.3.6 ลักษณะสมบัติของเกต......15
        2.3.7 วงจรป้องกันไทริสเตอร์......17
    2.4 การควบคุมมุมจุดชนวนเกตของไทริสเตอร์......19

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3. การออกแบบและสร้าง	21
3.1 การออกแบบและสร้างชุดควบคุมมุมเฟส	22
3.1.1การออกแบบและการเลือกใช้อุปกรณ์	22
3.1.2 การออกแบบวงจรควบคุมมุมเฟส	28
3.2 การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์	30
3.2.1 การออกแบบวงจรวัดแรงดันอัดประจุ	31
3.2.2 การออกแบบวงจรวัดกระแสอัดประจุ	32
3.2.3 การออกแบบวงจรจ่ายแรงดันควบคุมมุมจุดชนวน	33
3.3 การออกแบบชุดคำสั่งควบคุม	34
3.3.1 ชุดคำสั่งป้อนแรงดันอัดประจุ	34
3.3.2 ชุดคำสั่งควบคุมแรงดันอัดประจุ	36
3.3.3 ชุดคำสั่งจบการอัดประจุ	38
3.3.4 ชุดคำสั่งขัดจังหวะการควบคุมอัดประจุ	39
4. การทดสอบและวิเคราะห์ผล	40
4.1 การทดสอบวงจรควบคุมแต่ละส่วน	40
4.1.1 การทดสอบวงจรวัดแรงดันอัดประจุ	40
4.1.2 การทดสอบวงจรวัดกระแสอัดประจุ	42
4.1.3 การทดสอบวงจรจ่ายแรงดันควบคุมมุมจุดชนวน	43
4.1.4 การทดสอบวงจรควบคุมมุมเฟส	45
4.2 การทดลองใช้งานจริง	48
4.2.1 การทดสอบจับเวลาสัญญาณลั่นไก	48
4.2.2 การทดสอบการตั้งค่าแรงดันสูงกระแสตรง	50
4.2.3 การทดสอบสร้างแรงดันอิมพัลส์	51
5. สรุปและข้อเสนอแนะ	53
5.1 สรุป	53
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	53
รายการอ้างอิง	55
ภาคผนวก	56

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ หน้า

ภาคผนวก ก ... 57

ภาคผนวก ข ... 64

ภาคผนวก ค ... 70

ภาคผนวก ง ... 77

ภาคผนวก จ ... 80

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ... 94

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรวัดแรงดันอัดประจุ... 41
4.2 ผลการทดสอบวงจรวัดกระแสอัดประจุ 43
4.3 ผลการทดสอบวงจรควบคุมมุมจุดชนวน.. 44
4.4 ผลการทดสอบวงจรควบคุมมุมเฟส 47
4.5 ผลการทดสอบจับเวลาสัญญาณลั่นไก.. 49
ก.1 ผลการทดสอบจับเวลาสัญญาณลั่นไก 57
ก.2 ผลการวัดแรงดันอัดประจุ... 59

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นมีตัวเก็บประจุกรองกระแส 3

2.2 วงจรเรียงกระแสแบบแรงดันสองเท่า 3

2.3 วงจรควบคุมเฟสเดียวแบบเต็มรูปคลื่น สำหรับโหลด RL 5

2.4 ค่า γ ของวงจรรูปที่ 2.3(a) 7

2.5 แสดงค่า I_N เทียบกับมุมจุดชนวน(α) 7

2.6 แสดงค่า I_{RN} เทียบกับมุมจุดชนวน(α) 8

2.7 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไทริสเตอร์ 9

2.8 การแทนโครงสร้างของไทริสเตอร์ด้วยทรานซิสเตอร์2ตัว 9

2.9 ลักษณะสมบัติของไทริสเตอร์ในสภาพอยู่ตัว 11

2.10 ลักษณะสมบัติของไทริสเตอร์ในช่วงเปลี่ยนสภาพ 12

2.11 แสดงลักษณะของเกตชนิดต่างๆ 13

2.12 แสดงลักษณะตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นตามรอยต่อของไทริสเตอร์ 13

2.13 ลักษณะสมบัติของเกตไทริสเตอร์ 15

2.14 การปรับค่าของสัญญาณจุดชนวนต่ออุณหภูมิ 16

2.15 ขนาดความกว้างต่ำสุดของสัญญาณจุดชนวนเกต 17

2.16 วงจรป้องกันเสิร์จสำหรับไทริสเตอร์ 18

2.17 โครงสร้างภายในของวงจรรวม TCA785 19

3.1 วงจรเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุ 21

3.2 ไทริสเตอร์ติดตั้งบนชุดระบายความร้อน 23

3.3 ชุดวงจรสนับเบอร์ 23

3.4 วงจรการต่อสำหรับการคำนวนค่า Z_1 24

3.5 อิมพิแดนซ์ควบคุมกระแสอัดประจุ 26

3.6 ดีแมกนิไตซิ่งอิมพิแดนซ์ 27

3.7 วงจรควบคุมมุมเฟสที่ประกอบเสร็จ 28

3.8 วงจรวงจรควบคุมมุมเฟส 29

3.9 ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ 30

3.10 ชุดหน้าสัมผัสควบคุมและชุดรับสัญญาณดิจิตอล 30

3.11 วงจรวัดแรงดันแรงดันอัดประจุ 31

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.12 วงจรวัดแรงดันแรงดันอัดประจุที่ประกอบเสร็จ 31

3.13 วงจรวัดกระแสอัดประจุ 32

3.14 วงจรวัดกระแสอัดประจุที่ประกอบเสร็จ 32

3.15 วงจ่ายแรงดันควบคุมมุมจุดชนวน 33

3.16 วงจ่ายแรงดันควบคุมมุมจุดชนวนที่ประกอบเสร็จ 33

3.17 แผนผังขั้นตอนการทำงานของชุดคำสั่งป้อนค่าแรงดันอัดประจุ 35

3.18 แผนผังขั้นตอนการทำงานของชุดคำสั่งควบคุมแรงดันอัดประจุ 37

3.19 แผนผังขั้นตอนการทำงานของชุดคำสั่งจบการอัดประจุ 38

3.20 แผนผังขั้นตอนการทำงานของชุดคำสั่งขัดจังหวะการควบคุมอัดประจุ 39

4.1 การทดสอบวงจรวัดแรงดันอัดประจุ 40

4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันขาเข้ากับแรงดันขาออกวงจรวัดแรงดันอัดประจุ 41

4.3 การทดสอบวงจรวัดกระแสอัดประจุ 42

4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสขาเข้ากับแรงดันขาออกวงจรวัดกระแส 42

4.5 การทดสอบวงจรจ่ายแรงดันควบคุมมุมจุดชนวน 43

4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันขาเข้ากับแรงดันขาออกวงจรควบคุมมุมจุดชนวน 44

4.8 แรงดันกระแสตรงคร่อม C เท่ากับ 48kV. 46

4.9 แรงดันและกระแสที่ป้อนเข้าหม้อแปลงทดสอบที่ระดับแรงดันอัดประจุเท่ากับ 48kV. 46

4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันควบคุมกับค่าแรงดันตกคร่อม C 47

4.11 การต่อวงจรควบคุมแรงดันอัดประจุ 48

4.12 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดต่อเวลาที่ตั้งค่า 49

4.13 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดต่อแรงดันที่ตั้ง 50

4.14 วงจรทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 μs 51

4.15 การทดสอบสร้างแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 μs 52

ก.1 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 6kV 60

ก.2 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 7kV 60

ก.3 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 8kV 60

ก.4 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 9kV 61

ก.5 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 15kV 61

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

ก.6 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 20kV.. 61
ก.7 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 25kV.. 62
ก.8 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 30kV.. 62
ก.9 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 35kV.. 62
ก.10 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 40kV.. 63
ก.11 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 45kV.. 63
ก.12 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 50kV.. 63

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

การฉนวนของอุปกรณ์ในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ามีโอกาสที่จะได้รับแรงดันเกินอิมพัลส์ที่อาจเกิดจากฟ้าผ่า (Lightning impluse) และเกิดจากการทำงานของสวิตช์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Switching Impluse) ดังนั้นจึงมีการกำหนดให้มีการทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยแรงดันอิมพัลส์ [1] ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่างๆ เช่น สวิตช์เกียร์ ลูกถ้วยฉนวน หม้อแปลงวัดแรงดัน หม้อแปลงวัดกระแส เคเบิล และวัสดุฉนวนอื่นๆ การทดสอบมีอยู่ 2 แบบคือ การทดสอบแบบทำลาย (Destructive test) และ การทดสอบแบบไม่ทำลายหรือคงอยู่ได้ (Withstand voltage test) ที่เรียกว่า BIL test (Basic Impluse Insulation Level test) การทดสอบนี้มีการกำหนดค่าแรงดันที่จะใช้ในการทดสอบให้สอดคล้องกับระดับแรงดันที่ใช้งานตามปกติของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่จะทำการทดสอบ ในการทดสอบจะใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เป็นแหล่งกำเนิดแรงดันทดสอบโดยรับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่สามารถปรับค่าแรงดันได้ วิธีการปรับค่าแรงดันที่นิยมใช้กันมานานคือ การใช้หม้อแปลงออโต (Auto transformer) หรือ วาริแอก (Variac) ปรับขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก 0-220V. ป้อนให้แก่หม้อแปลงทดสอบเพื่อปรับขนาดแรงดันให้สูงขึ้นด้วยมือ แล้วจ่ายผ่านไปยังวงจรเรียงกระแสตามลำดับ ในปัจจุบันเทคโนโลยีของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและไมโครคอนโทรลเลอร์มีการพัฒนาก้าวหน้าไปมากกระทั่งสามารถใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถรับกระแสได้สูงมาใช้เป็นสวิตช์ควบคุมได้ดังนั้นเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่จะทำการออกแบบและสร้างขึ้นจึงใช้หลักการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังประเภท ไทริสเตอร์ หรือ เอสซีอาร์ (Thyristor , Silicon Controlled Rectifier) ที่มีพิกัดกระแสสูงทำหน้าที่ควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้าโดยการควบคุมการนำกระแสของ ไทริสเตอร์ แทนการใช้การเปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวดโดยการเปลี่ยนจุดต่อขดลวดของหม้อแปลงออโต

1.2 ที่มาของปัญหา

ในการปรับแรงดันที่จ่ายให้แก่หม้อแปลงทดสอบโดยใช้หม้อแปลงออโตปรับค่าแรงดันจาก 0-220V. ก่อนป้อนให้แก่หม้อแปลงทดสอบ วิธีการดังกล่าวต้องใช้กำลังคนในการปรับ

จุดต่อของขดลวดหรือใช้มอเตอร์ขับเคลื่อน ซึ่งต้องใช้กำลังค่อนข้างสูงและต้องคอยระวังระยะเวลาในการเพิ่มขนาดแรงดันเพื่อไม่ให้เกิดปัญหากระแสเกินที่หม้อแปลงออโตและหม้อแปลงกระแสสลับ เมื่อได้ขนาดแรงดันอัดประจุตามที่ต้องการต้องทำการปลดวงจรอัดประจุออกก่อนที่จะทำการทริกเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อป้องกันกระแสเกินที่จะเกิดขึ้นในวงจรอัดประจุและป้องกันการเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันทดสอบ ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทดสอบจึงทำการออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุที่ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต

ปี พ.ศ.2533 นายจิระชัย ทองทิพยา และ นายธรรมศักดิ์ แจ่มศรี [2] ได้ออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุเข้าวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ด้วยเอสซีอาร์ ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งสามารถปรับแรงดันกระแสสลับขนาด 0-220V. ที่ความถี่ 50 Hz กำลังไฟฟ้า 7.5 kVA โดยสามารถควบคุมโดยวิธีใช้คนควบคุมการปรับแรงดัน และใช้ขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาดต่ำๆในการควบคุมมุมการจุดชนวนของเอสซีอาร์เพื่อควบคุมมุมเฟสของรูปคลื่นแรงดันที่ทุกๆไซเกิลที่จะจ่ายให้หม้อแปลงทดสอบ ซึ่งวิธีการดังกล่าวยังต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานควบคุมแรงดันอัดประจุ และควบคุมระยะเวลาในการปรับขนาดแรงดันดังกล่าวเพื่อป้องกันไม่ให้ปัญหากระแสเกินที่อาจเกิดขึ้นได้

1.4 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์

1) ออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 7.5kVA. ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

2) ทดสอบการทำงานของเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 7.5 kVA. ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สร้างขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ใช้เครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อจ่ายให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สำหรับทำการศึกษาและทดสอบด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงเรื่องการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

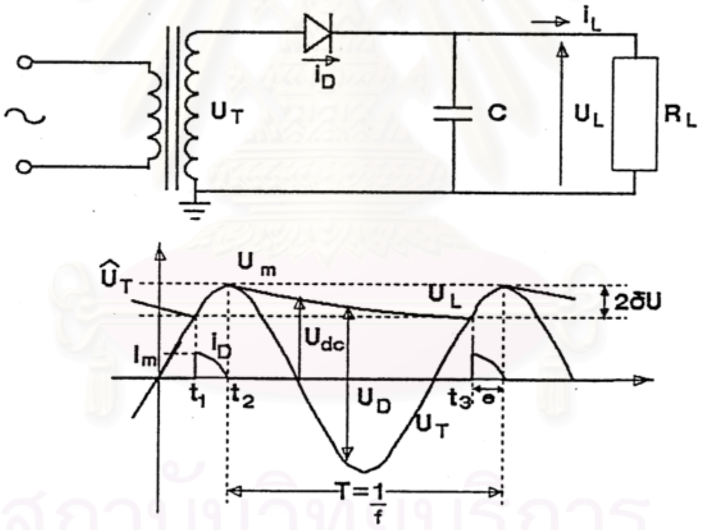
2) เป็นต้นแบบของการพัฒนาออกแบบสร้างเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุ ที่จะนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับการทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงตามที่มาตรฐานอุตสาหกรรมกำหนด และลดการนำเข้าเครื่องมือทดสอบจากต่างประเทศ

บทที่ 2

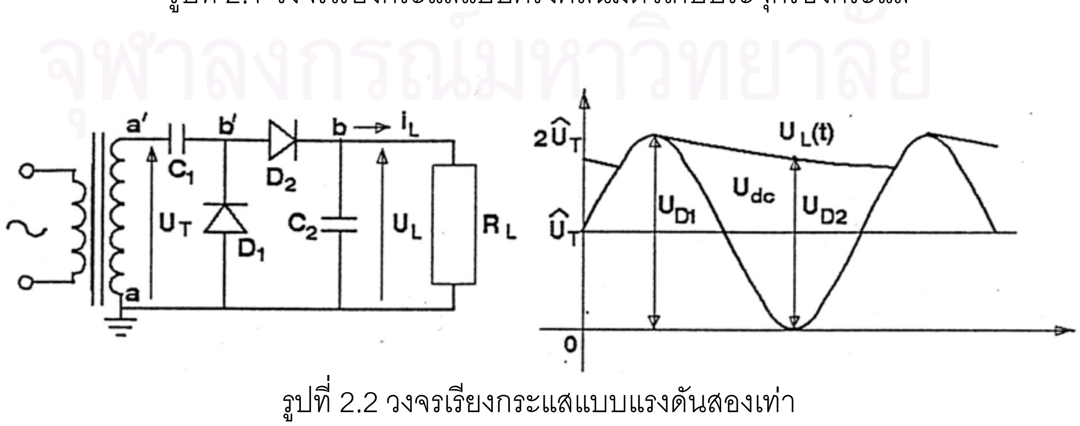
หลักการและทฤษฎี

2.1 การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง

การสร้างแรงดันสูงสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ จะใช้วิธีแปลงจากแรงดันสูงกระแสสลับด้วยวงจรเรียงกระแสที่มีไดโอดเป็นตัวเรียงกระแส โดยทั่วไปจะเป็นแบบครึ่งคลื่น และมีตัวเก็บประจุกรองซึ่งจะทำหน้าที่อัดประจุในช่วงไดโอดนำกระแสและจะคายประจุหรือดีสชาร์จ ให้กับโหลดในช่วงที่ไดโอดไม่นำกระแส ดังรูปที่ 2.1 ในกรณีที่ต้องการสร้างแรงดันสูงกระแสตรงที่มีขนาดสูงกว่า 100 kV ก็จะใช้วงจรเรียงกระแสแบบแรงดันสองเท่าดังรูปที่ 2.2 เมื่อต้องการใช้แรงดันสูงกระแสตรงสูงขึ้นไปอีก (มากกว่า 200 kV ก็จะใช้วงจรเรียงกระแสแบบแรงดันสองเท่ามาต่อแบบขั้นบันไดหลายๆ ขั้น)[3]



รูปที่ 2.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นมีตัวเก็บประจุกรองกระแส



รูปที่ 2.2 วงจรเรียงกระแสแบบแรงดันสองเท่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แรงดันกระแสตรงที่ได้จากการเรียงกระแสจากแรงดันสูงกระแสสลับ โดยใช้ไดโอดเรียงกระแส และมีตัวเก็บประจุกรองกระแสเพื่อให้คลื่นเรียบ แต่คลื่นที่ได้ก็ยังเป็นระลอก แรงดันระลอก (ripple voltage) อาจคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\delta U = \frac{I_d}{2fc} \tag{2.1}$$

เมื่อ I_d คือกระแสที่จ่ายให้กับโหลด ความเรียบของแรงดันกระแสตรงกำหนดด้วยแฟกเตอร์ระลอก (ripple factor) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$r = \frac{\delta U}{U_{dc}} \tag{2.2}$$

โดย U_{dc} คือแรงดันเฉลี่ยของแรงดันกระแสตรง

ในกรณีของแรงดันกระแสตรง ที่ได้จากวงจรเรียงกระแสแบบแรงดันสองเท่าในรูปที่ 2.2 จะคำนวณได้จาก

$$U_{dc} = 2U_T - \frac{2I_{dc}}{3fc} \tag{2.3}$$

เมื่อ U_T คือแรงดันค่ายอดด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงตัวจ่าย

2.2 หลักการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

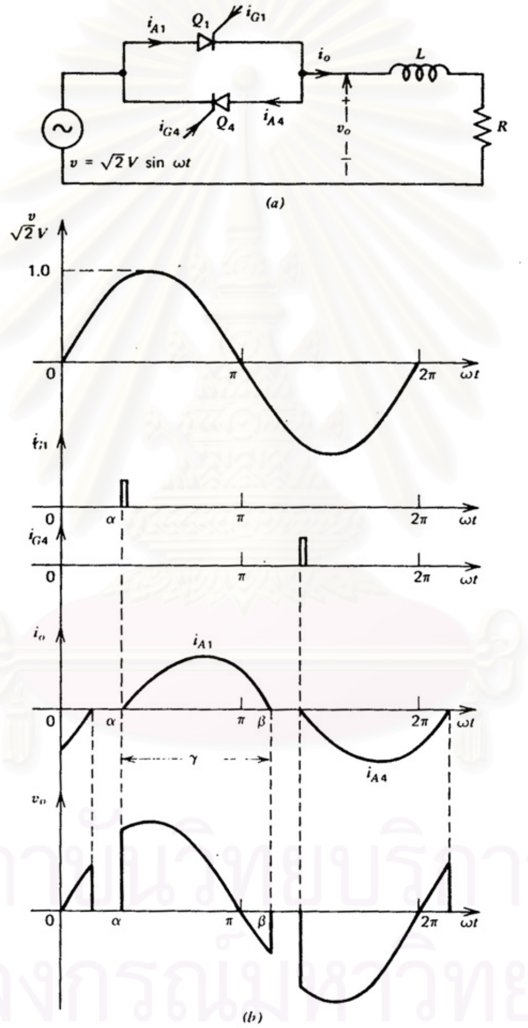
การควบคุมไฟฟ้ากระแสสลับคือการเปลี่ยนค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดัน (V_{rms}) ที่จ่ายให้แก่โหลดโดยใช้ไทริสเตอร์ควบคุมโดยทั่วไปมี 2 วิธีคือ [4]

1) การควบคุมการเปิด-ปิดวงจร (On-off control) ไทริสเตอร์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์สำหรับต่อแหล่งจ่ายไฟให้แก่โหลดในบางคาบของแหล่งจ่ายไฟ และจะปลดโหลดออกเมื่อถึงคาบเวลาที่เหมาะสม ไทริสเตอร์ในการควบคุมแบบนี้จะทำหน้าที่เสมือนสวิตช์ความเร็วสูง

2) การควบคุมมุมเฟส (Phase control) ไทริสเตอร์จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์ที่สามารถควบคุมการต่อโหลดเข้ากับแหล่งจ่ายไฟโดยสามารถเลือกมุมเฟสของรูปคลื่นแรงดันแหล่งจ่ายที่จะต่อโหลดเข้าได้ในแต่ละคาบของรูปคลื่นแรงดัน

วงจรเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุที่จะออกแบบและสร้างจะใช้หลักการควบคุมมุมเฟส โดยโหลดของวงจรเป็นหม้อแปลงทดสอบซึ่งพิจารณาเป็นโหลดแบบค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำ

2.2.1 **การควบคุมเฟสเดียวแบบเต็มรูปคลื่น** (Single-phase full-wave control)



รูปที่ 2.3 วงจรควบคุมเฟสเดียวแบบเต็มรูปคลื่น สำหรับโหลด RL

จากรูปที่ 2.3(a) แสดงวงจรควบคุมแหล่งจ่ายไฟสำหรับโหลดแบบความต้านทานและความเหนี่ยวนำ โดยไทริสเตอร์ทั้ง2ตัวจะไม่นำกระแสพร้อมกัน สมมติให้ไทริสเตอร์ Q_1 ถูกจุดชนวนให้นำกระแสในช่วงครึ่งบวกและมีกระแสโหลดไหล เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำของโหลดจะทำให้กระแสโหลดที่ผ่านไทริสเตอร์ Q_1 (I_{A1}) มีค่าเป็นศูนย์ที่ $\omega t=\beta$ ซึ่งจะทำให้ไทริสเตอร์ Q_1หยุดนำ

กระแส ดังนั้นค่ามุมนำกระแส (Conduction angle,γ) มีค่าเท่ากับ $\beta-\alpha$ และค่าแรงดัน v_O สามารถหาได้จากสมการ

$$v_O = v_L + v_R \tag{2.4}$$

หรือ

$$\sqrt{2}V\sin(\omega t) = L\frac{di_{A1}}{dt} + Ri_{A1} \tag{2.5}$$

ซึ่งสามารถแก้สมการหาผลตอบได้ดังนี้

$$i_{A1} = \frac{\sqrt{2}}{Z}V\sin(\omega t - \phi) + Ae^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \tag{2.6}$$

โดยที่ $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ และ $\phi = \tan^{-1}\frac{\omega L}{R}$

จากสมการที่ 2.6 สมมติให้สภาพเริ่มต้น $\omega t = \alpha$, $i_{A1} = 0$ จะได้ว่า

$$A = -\frac{\sqrt{2}}{Z}V\sin(\alpha - \phi)e^{\left(\frac{\alpha R}{\omega L}\right)} \tag{2.7}$$

แทนค่า A ลงในสมการที่ 2.6 จะได้

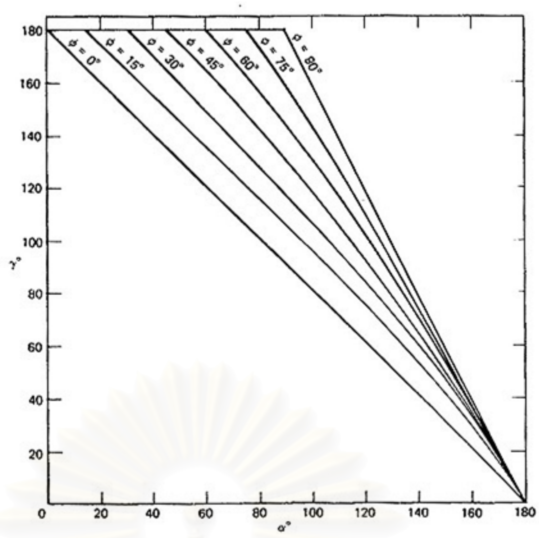
$$i_{A1} = \frac{\sqrt{2}}{Z}V\left[\sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi)e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega} - t\right)}\right] \tag{2.8}$$

ที่ $\omega t = \beta$, $i_{A1} = 0$ แทนค่าลงในสมการที่ 2.8 จะได้

$$\sin(\beta - \phi) = \sin(\alpha - \phi)e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha - \beta}{\omega}\right)} \tag{2.9}$$

มุม β จะเรียกว่ามุมหยุดนำกระแสสามารถหาได้โดย Iteration method เมื่อหามุม β ได้แล้ว จะสามารถหาค่ามุมนำกระแสได้จาก $\gamma = \beta - \alpha \le 180°$ ค่า γ สามารถนำมาแสดงได้ดังรูปที่ 2.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 ค่า γ ของวงจรรูปที่ 2.3(a)

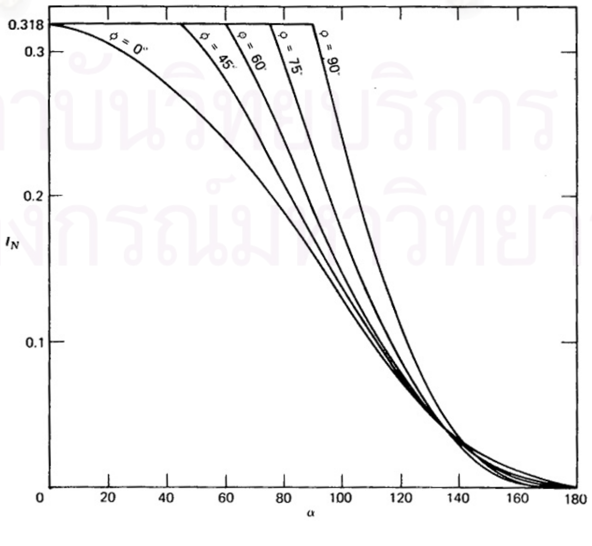
จากสมการที่ 2.8 สามารถหาค่ากระแสโหลดเฉลี่ยได้ดังนี้

กำหนดให้ I_N = ค่ากระแสเฉลี่ยที่ผ่านไทริสเตอร์ Q_1 เทียบหนึ่งหน่วย

I_{O1} =ค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านไทริสเตอร์ Q_1

$$I_N = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma}\left[\sin(\omega t-\phi)-\sin(\alpha-\phi)e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega}-t\right)}\right]d(\omega t) \qquad (2.10)$$

$$I_O = \frac{\sqrt{2}V}{Z}\cdot I_N \qquad (2.11)$$



รูปที่ 2.5 แสดงค่า I_N เทียบกับมุมจุดชนวน(α)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

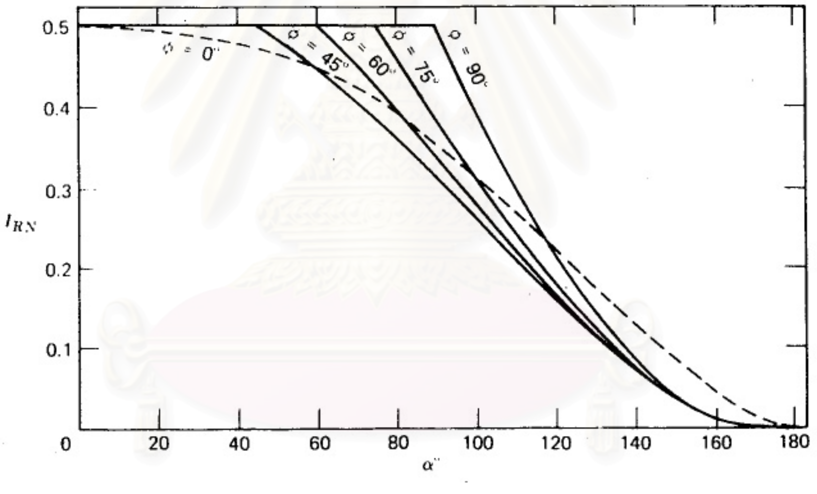
กำหนดให้ I_{RN} = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสโหลดเทียบค่าหนึ่งหน่วย

$I_{O,rms}$ = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสโหลด

ดังนั้น
$$I_{RN} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma}\left[\sin(\omega t-\phi)-\sin(\alpha-\phi)e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega}-t\right)}\right]^2 d(\omega t)} \qquad (2.12)$$

ดังนั้นค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสโหลดคือ

$$I_{o,rms} = \frac{\sqrt{2}V}{Z}\cdot I_{RN} \qquad (2.13)$$



รูปที่ 2.6 แสดงค่า I_{RN} เทียบกับมุมจุดชนวน(α)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

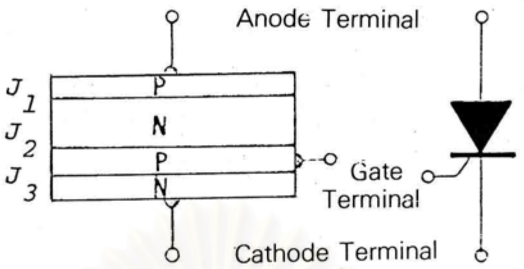
จากรูปที่ 2.3(b) สามารถหาค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของ v_O ได้ดังนี้

$$V_O = \sqrt{\left[\frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma}\left(\sqrt{2}\cdot V\cdot\sin\omega t\right)^2\cdot d(\omega t)\right]} \qquad (2.14)$$

$$V_O = \sqrt{2}\cdot V\cdot\sqrt{\left\{\frac{1}{2\pi}\left[\gamma+\frac{1}{2}\sin 2\alpha-\frac{1}{2}\sin 2(\alpha+\gamma)\right]\right\}} \qquad (2.15)$$

2.3 หลักการทำงานของไทริสเตอร์

2.3.1 โครงสร้าง

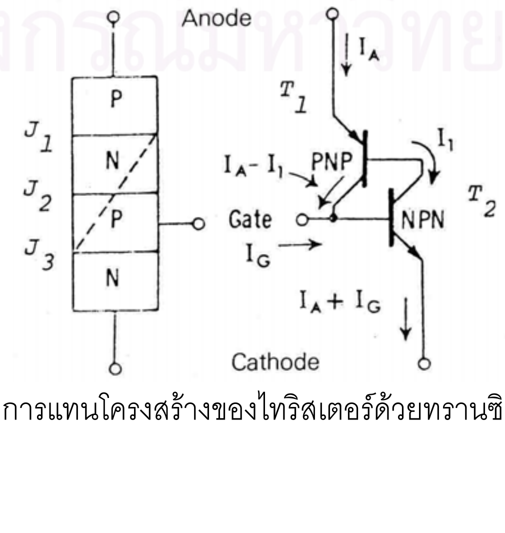


รูปที่ 2.7 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไทริสเตอร์

ไทริสเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์พีเอ็นพีเอ็น 4 ชั้น ซึ่งสามารถกั้นแรงดันได้ทั้งสองทิศทาง และมีรอยต่อพีเอ็น 3 รอยต่อ (J_1,J_2 และ J_3) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เมื่ออาโนดเป็นลบเทียบกับคาโทดรอยต่อ J_2 จะถูกไบแอสตามส่วนรอยต่อ J_1 และ J_3 จะถูกไบแอสย้อน ดังนั้น ไทริสเตอร์จะสามารถกั้นการไหลของกระแสจนกระทั่งแรงดันเกิน แรงดันพังทลายของรอยต่อ J_1 และ J_3 อนุกรมกัน เมื่ออาโนดเป็นบวกเทียบกับคาโทด รอยต่อ J_1 และ J_3 จะถูกไบแอสตาม แต่รอยต่อ J_2 จะถูกไปแอสย้อน ดังนั้น กระแสจะถูกกั้นจนกระทั่งแรงดันเกินแรงดันพังทลายของรอยต่อ J_2

ขั้วที่ 3 ของไทริสเตอร์ หรือ ขั้วเกตนั้น ต่อกับชั้นพี.ซึ่งอยู่ติดกับชั้นเอ็น. ของคาโทด ถ้าขั้วนี้เป็นบวกเทียบกับคาโทดจะมีกระแสไหลผ่านรอยต่อคาโทด (J_3) และถ้าอาโนดเป็นบวก กระแสที่ไหลตัวต่อคาโทดจะทำให้เกิดการทวีคูณแบบอะวาลานซ์ (avalanche multiplication) ซึ่งทำให้กระแสไหลผ่าน J_2 และไทริสเตอร์นำไฟฟ้า เมื่อไทริสเตอร์นำไฟฟ้าแล้วเกตก็จะไม่สามารถควบคุมต่อไปได้ ไทริสเตอร์จะนำไฟฟ้าต่อไป จนกว่ากระแสจะถูกทำให้หยุดไหลโดยวิธีการอื่น

2.3.2 กลไกการเริ่มนำไฟฟ้า



รูปที่ 2.8 การแทนโครงสร้างของไทริสเตอร์ด้วยทรานซิสเตอร์2ตัว

กลไกการเริ่มนำไฟของไทริสเตอร์สามารถอธิบายง่าย ๆ โดยการแบ่งชั้นภายใน 4 ชั้นออกเป็นทรานซิสเตอร์ 2 ตัวดังแสดงในรูปที่ 2.8 เมื่อไบแอสให้อาโนดเป็นบวก อาโนดจะเป็นอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี และคาโทดจะเป็นอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็น คอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวส่งกระแสไปให้กับเบสของทรานซิสเตอร์อีกตัวหนึ่ง

การวิเคราะห์เริ่มจากการใช้สมการของทรานซิสเตอร์คือ

$$I_C = \propto I_E + I_{CBO} \tag{2.16}$$

โดยที่ I_C คือ กระแสคอลเลกเตอร์

I_E คือ กระแสอิมิตเตอร์

I_{CBOP} คือ กระแสรั่วระหว่างคอลเลกเตอร์กับเบส

I_{CBON} คือ กระแสรั่วระหว่างคอลเลกเตอร์กับเบส

$\propto_P$ คือ อัตราการขยายกระแสในสภาพเบสร่วม

$\propto_N$ คือ อัตราการขยายกระแสในสภาพเบสร่วม

สำหรับทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี

$$I_A - I_1 = \propto_P I_A + I_{CBOP} \tag{2.17}$$

สำหรับทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็น

$$I_1 = \propto_N (I_A + I_G) + I_{CBON} \tag{2.18}$$

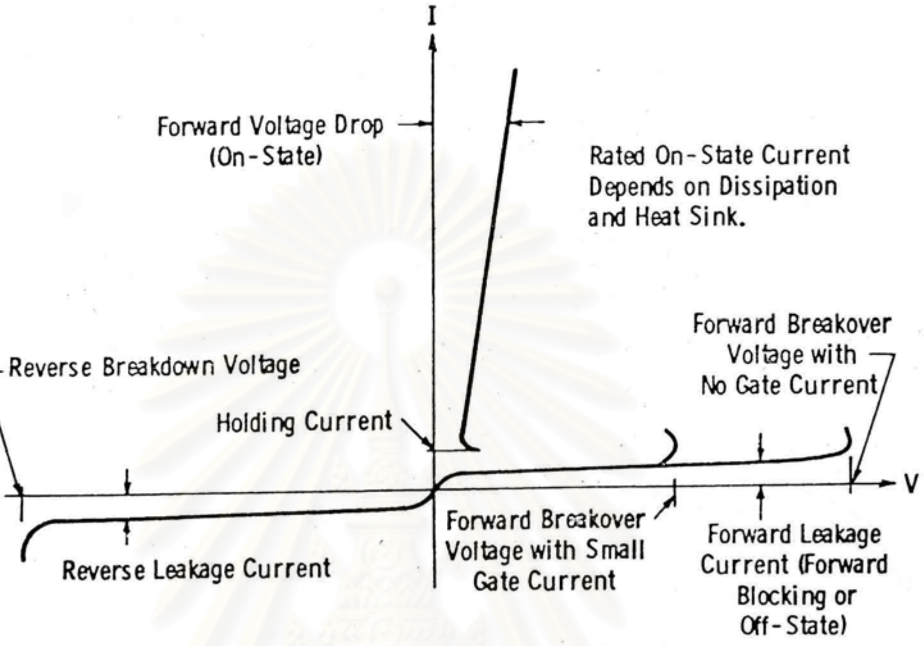
เมื่อรวมสมการที่ 2.11 กับสมการที่ 2.12 เพื่อขจัด I_1 และแก้สมการเพื่อหา I_A จะได้

$$I_A = \frac{\alpha_N I_G + I_{CBON} + I_{CBOP}}{1 - (\alpha_N + \alpha_P)} \tag{2.19}$$

ก่อนที่ไทริสเตอร์จะนำไฟฟ้ากระแสคอลเลกเตอร์มีค่าต่ำมาก ทำให้ $\propto$ มีค่าต่ำกว่า 1 มากในสภาพไม่นำไฟฟ้าและ $I_G = 0$ กระแสรั่วมีค่าต่ำมาก ทำให้ผลรวมของ $\propto_N$ และ $\propto_P$ มีค่าต่ำกว่า 1 กระแสอาโนดจึงมีค่าเสถียรอยู่ที่ค่าต่ำ ๆ ค่าหนึ่ง การเปลี่ยนสภาพจากไม่นำไฟฟ้าเป็นนำไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการใส่กระแสเกต ซึ่งทำให้กระแสเบสของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นเพิ่มขึ้น ทำให้ $\propto_N$ มากขึ้น ทำให้กระแสคอลเลกเตอร์พีเอ็นพีมีค่ามากขึ้น และ $\propto_P$ มากขึ้น เมื่อ $\propto_N + \propto_P$ มีค่าใกล้หนึ่ง ตัวหารของสมการที่2.19 จะมีค่าใกล้ศูนย์ ทรานซิสเตอร์ทั้งสองจะอิ่มตัว และกระแสอาโนดก็เพิ่มอย่างรวดเร็วถึงขนาดที่จำกัดโดยวงจรภายนอก กระแสโหลดจะทำให้ $\propto_N + \propto_P > 1$ และไทริสเตอร์จะค้างอยู่ในสภาพนำไฟฟ้าถึงแม้ว่าจะไม่มีกระแสเกตแล้วก็ตาม

2.3.3 ลักษณะสมบัติของไทริสเตอร์

2.3.3.1 ลักษณะสมบัติของไทริสเตอร์ในสภาพอยู่ตัว



รูปที่ 2.9 ลักษณะสมบัติของไทริสเตอร์ในสภาพอยู่ตัว

จากรูปที่ 2.9 อาจแบ่งเขตการทำงานของไทริสเตอร์ออกเป็น 3 เขตคือ

ก. สถานะปิดกั้นย้อน (Reverse blocking state) คือจตุภาค (gradrant) ที่ 3 ในรูปที่2.9 ไทริสเตอร์จะไม่นำไฟฟ้าแต่มีกระแสรั่ว (I_R) ไหลเล็กน้อย จนกระทั่งแรงดันยป้อนกลับขั้วมีค่าสูงเกินค่าแรงดันพังทลาย ก็จะเกิดการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วอย่างมากหรือเกิดการพังทลาย

ข. สถานะปิดกั้นตาม (Forward conditioning state) คือ จตุภาคที่ 1 ในช่วงนี้ไทริสเตอร์ไม่นำไฟฟ้า แต่จะมีกระแสรั่ว (I_D) ไหลเล็กน้อย

ค. สถานะนำไฟฟ้าตาม (Forward conducting state) คือ จตุภาคที่ 1 อีก เมื่อส่งกระแสไฟฟ้าเข้าไปทางขั้วเกตจะทำให้แรงดันปล่อยกระแสเดินหน้า (forward breakover voltage) ลดลง หากลดลงต่ำกว่าแรงดันระหว่างอาโนดและคาโทด ไทริสเตอร์ก็จะนำไฟทำให้มีกระแสไหลจำนวนมาก แรงดันระหว่างอาโนดกับคาโทดจะมีค่าต่ำราว 1.4 โวลต์ ทั้งนี้สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.8 สามารถหาค่าแรงดันระหว่างอาโนดกับคาโทด คือ

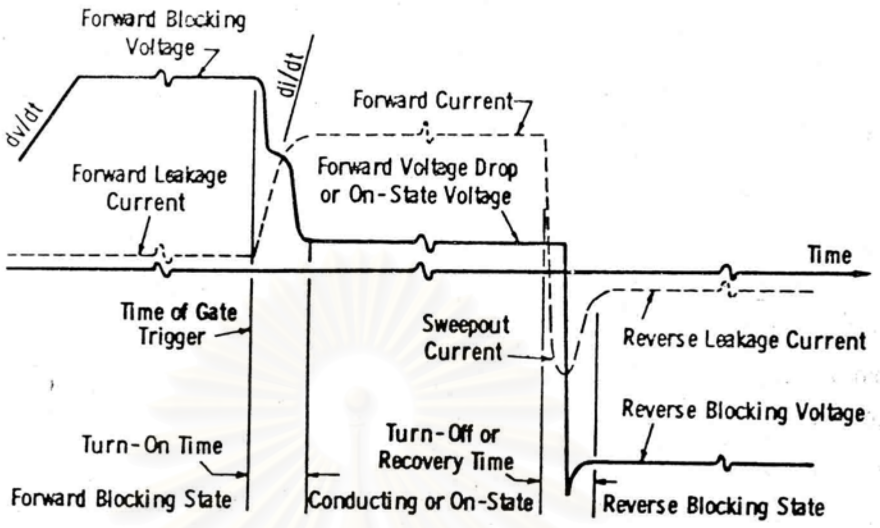
$$V_{EB\,(SAT)}\,(PNP) + V_{CE(SAT)}\,(NPN)$$

หรือ

$$V_{EC\,(SAT)}\,(NPN) + V_{BE(SAT)}\,(NPN)$$

ซึ่งจะมีค่าสูงกว่าแรงดันไบแอสตามคร่อมไดโอดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

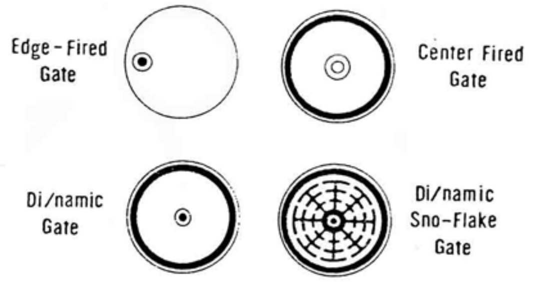
2.3.3.2 ลักษณะสมบัติของไทริสเตอร์ในช่วงเปลี่ยนสภาพ



รูปที่ 2.10 ลักษณะสมบัติของไทริสเตอร์ในช่วงเปลี่ยนสภาพ

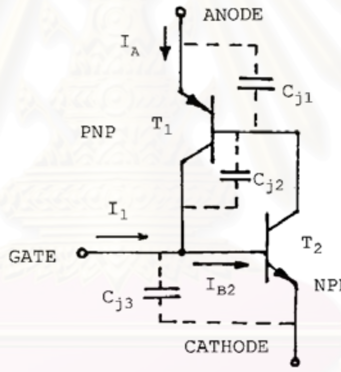
ลักษณะสมบัติของไทริสเตอร์ในช่วงเปลี่ยนสภาพดังรูปที่ 2.10 นั้น คล้ายกับของไดโอดที่ว่า การเริ่มนำไฟฟ้า (turn on) และการหยุดนำไฟฟ้า (trun off) ไม่สามารถเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อองค์ประกอบถูกไบแอสย้อนทันทีหลังจากการนำไฟฟ้า จะมีพัลส์ของกระแสไหลกลับอันเกิดจากประจุที่ตกค้างอยู่ในรอยต่อ แต่ไทริสเตอร์มีสถานะปิดกั้นตาม ซึ่งไม่มีในไดโอด

พิจารณาการเริ่มนำไฟฟ้าก่อน เมื่อไดโอดถูกไบแอสตามจะเริ่มนำไฟฟ้าทันที ดังนั้น ทั่วทั้งพื้นที่ของไดโอดจะนำไฟพร้อมกัน แต่การเริ่มนำไฟของไทริสเตอร์นั้นเริ่มที่พื้นที่เล็กๆ ติดกับขั้วเกต แล้วจะกระจายจากพื้นที่นี้ออกทางด้านข้าง ความเร็วของการกระจายประมาณ 0.1มิลลิเมตร ต่อไมโครวินาที ดังนั้น สิ่งประดิษฐ์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และมีขั้วเกตตรงจุดศูนย์กลางจะต้องใช้เวลาราว 100 ไมโครวินาที ก่อนที่ทั่วทั้งพื้นที่จะนำไฟฟ้า ถึงแม้ว่าแรงดันไบแอสตามจะถึงค่าอยู่ตัวนานแล้วก็ตาม เนื่องจากว่าพื้นที่ที่เริ่มนำไฟฟ้านั้นมีขนาดเล็กมากตอนเริ่มต้น ความหนาแน่นของกระแสอาจสูงมาก ถ้าไม่มีการจำกัดอัตราการเพิ่มกระแส ความหนาแน่นของกระแสที่มากเกินไปนั้นจะทำให้เกิดบริเวณที่ร้อนมาก ซึ่งอาจทำให้สิ่งประดิษฐ์เสียได้ ดังนั้น ไทริสเตอร์กำลังสูงจึงต้องมีขีดจำกัดค่า di/dt สูงสุดขณะเริ่มนำไฟฟ้า



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของเกตชนิดต่างๆ

เดิมนั้น จุดต่อขั้วเกตของไทริสเตอร์อยู่ตรงขอบดังรูปที่ 2.11 การนำไฟจะต้องกระจายจากจุดนี้ไปทั่วทั้งพื้นที่ต่อมาได้มีการย้ายจุดต่อไปอยู่ตรงกลางทำให้เวลาเริ่มนำไฟของไทริสเตอร์ลดลงครึ่งหนึ่ง ไทริสเตอร์ใหม่ๆ มีเกตรูปแบบอื่นๆ ซึ่งจะทำให้การเริ่มนำไฟฟ้าเกิดขึ้นที่พื้นที่ใหญ่ขึ้น ทำให้เวลาเริ่มนำไฟลดลงและทำให้ขีดจำกัด di/dt มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นตามรอยต่อของไทริสเตอร์

พารามิเตอร์ที่สำคัญมากอีกตัวหนึ่ง คือ dv/dt เราได้ทราบแล้วว่าเมื่อ ไทริสเตอร์อยู่ในสถานะปิดกั้นตามรอยต่อกลาง (J_2) จะถูกไบแอสกลับ ทำให้มีกระแสรั่วต่ำมาก แต่รอยต่อนี้ก็มีค่าเก็บประจุแฝง C_{J2} ต่อขนานอยู่ดังรูปที่ 2.12 ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดกระแสจำนวนหนึ่งไหลผ่านได้

$$I_{B2} = v_{J2}\frac{dC_{J2}}{dt} + C_{J2}\frac{dv_{J2}}{dt} \qquad (2.20)$$

จากสมการที่ 2.20 จะพบว่า I_{B2} ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ก็มีผลเหมือนกับการป้อนกระแสเกต I_1 หาก I_{B2} มีขนาดมากพอจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองนำไฟ และอัตราขยาย

วงรอบเพิ่มเป็นหนึ่ง ดังนั้นไทริสเตอร์ที่ถูกไบแอสตามจะเริ่มนำไฟได้ถ้าแรงดันคร่อมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (dv/dt เป็นบวก)

เมื่อไทริสเตอร์คอมมิวเทตโดยธรรมชาติ (natural commutation) จะมีกระแสย้อนกลับอยู่ชั่วขณะเช่น ในกรณีของไดโอด โดยปกติไทริสเตอร์ที่คอมมิวเทตโดยธรรมชาติ จะถูกไบแอสย้อนเป็นช่วงเวลานานมากกว่าช่วงเวลาคืนตัวของรอยต่อ(recovery time) ส่วนไทริสเตอร์ที่คอมมิวเทตโดยการบังคับ (forced commutation) ไทริสเตอร์จะถูกไบแอสกลับชั่วขณะหนึ่ง แล้วหลังจากนั้นจะต้องปิดกั้นแรงดันตามให้ได้

2.3.4 วิธีการทำให้ไทริสเตอร์เริ่มนำไฟฟ้า

2.3.4.1 การเริ่มนำไฟฟ้าด้วยกระแสเกต

การให้แรงดันของเกตเป็นบวกเมื่อเทียบกับคาโทด จะทำให้เกิดกระแสไหลเข้าไปในขั้วเกต ถ้ากระแสนี้มีขนาดเพียงพอจะทำให้ไทริสเตอร์เริ่มนำไฟฟ้าทันทีที่ความต่างศักย์อาโนดเป็นบวกเมื่อเทียบกับคาโทด กระแสเกตนี้อาจเป็นไฟตรง หรือเป็นพัลส์กว้าง 4-5 ไมโครวินาที ขนาดที่ต้องการอาจแปรจาก 2-3 มิลลิแอมแปร์ไปจนถึงกว่า 250 มิลลิแอมแปร์

2.3.4.2 การเริ่มนำไฟฟ้าด้วยแสง

วิธีนี้ใช้กับไทริสเตอร์ไวแสง (Light sensitive SCR หรือ Light triggered SCR) การส่องแสงไปยังรอยต่อคาโทด J_3 ทำให้การยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำขาด พาหะส่วนข้างน้อยที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้ไทริสเตอร์เริ่มนำกระแสได้

2.3.5 วิธีการทำให้ไทริสเตอร์หยุดนำไฟฟ้า

เมื่อไทริสเตอร์นำไฟฟ้าแล้ว ก็จะนำไฟฟ้าเรื่อยไปจนกระทั่งกระแสอาโนดมีค่าต่ำกว่ากระแสยึดเหนี่ยว (holding current) จึงจะหยุดนำไฟฟ้า กระแสยึดเหนี่ยวนี้จะมีค่าประมาณเศษหนึ่งส่วนพันของกระแสอาโนดสูงสุด เมื่อไทริสเตอร์หยุดนำไฟฟ้า ถึงแม้จะมีแรงดันตกคร่อมขั้วอาโนด-คาโทดอีก ก็จะไม่สามารถทำให้ไทริสเตอร์นำไฟฟ้าได้ถ้าไม่มีการป้อนกระแสเกต วิธีการทำให้ไทริสเตอร์หยุดนำไฟฟ้ามี 3 วิธี คือ

2.3.5.1 การคอมมิวเทตโดยธรรมชาติ (Natural commutation)

ในวงจรไฟสลับเมื่อแรงดันกลับเฟสจากบวกเป็นลบ กระแสอาโนดจะลดลงเป็นศูนย์ จะทำให้ไทริสเตอร์หยุดนำไฟฟ้าได้

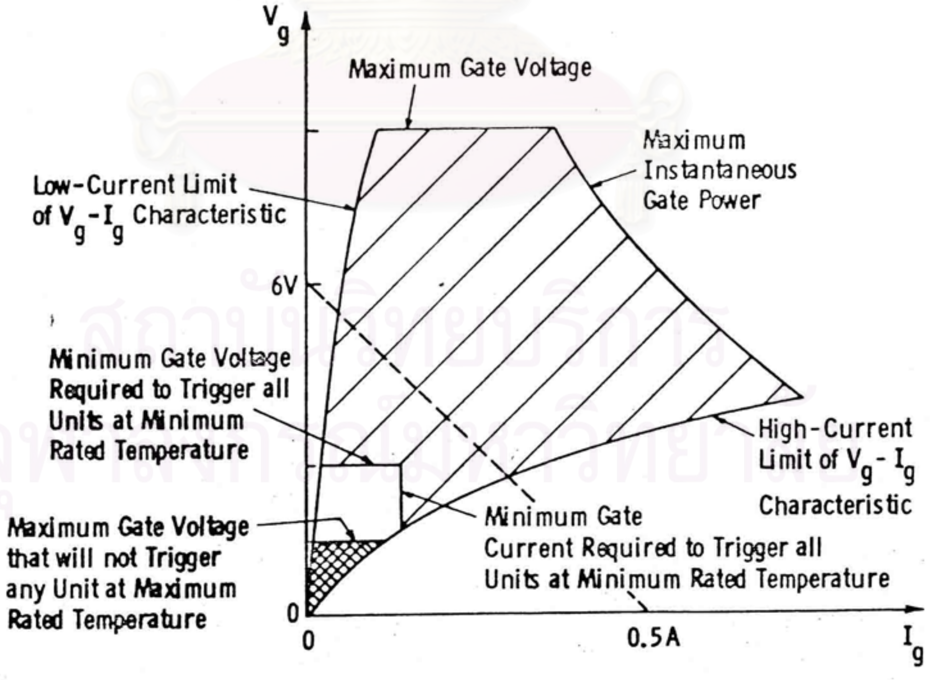
2.3.5.2 การคอมมิวเทตโดยการบังคับ (Force cmmutation)

ในวงจรไฟตรง ไทริสเตอร์จะไม่สามารถหยุดนำไฟฟ้าได้เอง จึงต้องใช้การคอมมิวเทตโดยการบังคับ โดยการต่อตัวเก็บประจุที่มีแรงดันตรงข้ามคร่อมตัวไทริสเตอร์ ทำให้เกิดการไบแอสกลับชั่วคราวไทริสเตอร์ก็จะหยุดนำไฟฟ้าได้ การคอมมิวเทตโดยโหลดคือการเปลี่ยนลักษณะสมบัติของโหลดจนไทริสเตอร์หยุดนำกระแส เช่น การเพิ่มอิมพิแดนซ์ของโหลดจนกระทั่งกระแสอาโนดมีค่าต่ำกว่ากระแสยึดเหนี่ยว

2.3.5.3 การหยุดนำไฟฟ้าด้วยเกต

ไทริสเตอร์ที่ออกแบบพิเศษมีคุณสมบัติที่ว่า กระแสเกตที่เป็นลบจะเพิ่มกระแสยึดเหนี่ยวจนกระทั่งมีค่าเกินกระแสอาโนด ทำให้ไทริสเตอร์หยุดนำกระแส ในอดีตไทริสเตอร์ชนิดนี้มีแต่ชนิดผ่านกระแสต่ำกว่า 10 แอมแปร์ แต่ปัจจุบันไทริสเตอร์ชนิดนี้สามารถหยุดกระแสหลายร้อยแอมแปร์ โดยใช้เกตเท่านั้น

2.3.6 ลักษณะสมบัติของเกต



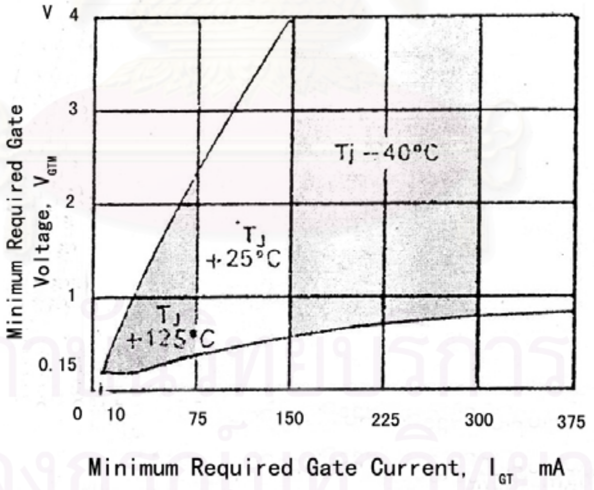
รูปที่ 2.13 ลักษณะสมบัติของเกตไทริสเตอร์

จากรูปที่ 2.13 แสดงลักษณะสมบัติของเกตที่ผู้ผลิตให้สำหรับออกแบบวงจรจุดชนวนเกต จุดทำงานที่ปลอดภัยของเกตถูกกั้นด้วยเส้นกระแสต่ำสุด เส้นกระแสสูงสุด เส้นแรงดันสูงสุด และเส้นกำลังสูงสุด ภายในเส้นกั้นเหล่านี้เขต 3 เขตที่สำคัญ

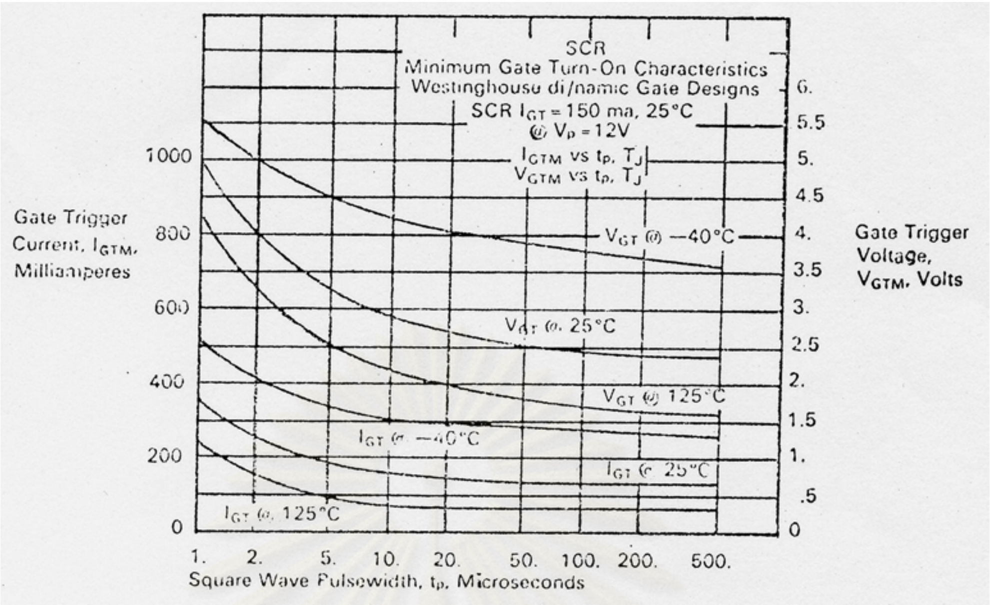
เขตที่ 1 อยู่ใกล้จุดเริ่มต้น (เป็นตาข่าย) และกำหนดโดยค่าแรงดันเกตสูงสุดที่จะไม่สามารถจุดชนวนไทริสเตอร์ได้ ค่าแรงดันนี้กำหนดที่อุณหภูมิสูงสุดของรอยต่อเกต (โดยทั่วไป125 ^{o}C) เขตทำงานนี้ เมื่อมีแรงดันตามคร่อมตัวไทริสเตอร์ แต่ไม่ต้องการให้มีการจุดชนวน หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ เขตนี้กำหนดขนาดสัญญาณที่ไม่ต้องการสูงสุดที่จะมีในวงจรจุดชนวนได้

เขตที่ 2 กำหนดโดยค่าแรงดันและกระแสเกตต่ำสุดที่จะต้องใช้ในการจุดชนวน ไทริสเตอร์ทุกตัวที่อุณหภูมิของรอยต่อต่ำสุด เขตนี้เป็นเขตที่ไม่ควรใช้ เพราะไม่สามารถมั่นใจว่าสัญญาณในเขตนี้จะสามารถใช้จุดชนวนสิ่งประดิษฐ์ทุกตัว หรือ จะไม่จุดชนวนสิ่งประดิษฐ์ตัวใดเลย

เขตที่ 3 ซึ่งเป็นเขตที่ใหญ่ที่สุด แสดงเขตที่สัญญาณเกตสามารถจุดชนวนได้อย่างเชื่อถือได้ โดยทั่วไปแล้วสัญญาณที่อยู่ในบริเวณซ้ายล่างก็เพียงพอแล้ว แต่ในกรณีที่ต้องการให้การเริ่มนำกไฟฟ้าเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อาจจะต้องใช้สัญญาณจุดชนวนขนาดใหญ่ (“HARD” firing signal) ในเขตขวาบน โดยเกตต้องการแรงดันระหว่าง 2 ถึง 10 โวลต์ และกระแสระหว่าง 100 ไมโครแอมแปร์ ถึง 1.5 แอมแปร์



รูปที่ 2.14 การปรับค่าของสัญญาณจุดชนวนต่ออุณหภูมิ



รูปที่ 2.15 ขนาดความกว้างต่ำสุดของสัญญาณจุดชนวนเกต

จากรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำต้องใช้แรงดันและกระแสในการจุดชนวนสูงกว่าที่อุณหภูมิสูง ตัวอย่างในรูปเป็นไทริสเตอร์ที่ต้องใช้กระแสเกต 150 มิลิแอมแปร์ ที่ 25°C ที่ 125 °C กระแสเกตที่ต้องใช้จะลดลงครึ่งหนึ่ง และที่ -40 °C กระแสที่ต้องใช้จะเพิ่มขึ้นเท่าหนึ่ง

สำหรับการจุดชนวนโดยใช้พัลส์ เมื่อพัลส์มีความกว้างต่ำกว่า 20 ไมโครวินาที จะต้องใช้พัลส์ที่มีขนาดกระแสขนาดมากขึ้น ทั้งนี้เป็นไปตามทฤษฎีที่ว่าการทำให้ไทริสเตอร์เริ่มนำไฟฟ้านั้นต้องใช้ประจุจำนวนหนึ่ง ดังนั้นเมื่อความกว้างลดต่ำลงไปก็ต้องเพิ่มขนาดของกระแสมาชดเชยให้ประจุมีขนาดคงที่ รูปที่ 2.15 แสดงขนาดของกระแสที่ต้องใช้ที่ความกว้างชองพัลส์ต่าง ๆ

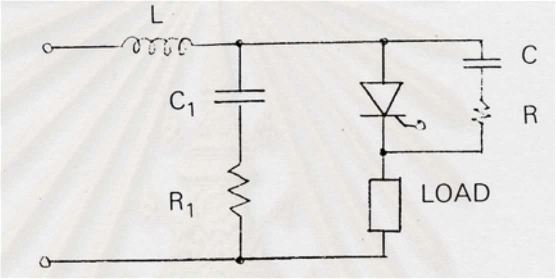
2.3.7 วงจรป้องกันไทริสเตอร์

ไทริสเตอร์เกิดความเสียหายในกรณีเดียวเท่านั้น คือ อุณหภูมิของรอยต่อมีค่าสูงเกินไป ปกติไทริสเตอร์จะทำงานได้ที่อุณหภูมิรอยต่อ 125 °C แต่ปัจจุบันนี้ ไทริสเตอร์บางตัวก็ทำงานได้ถึง 150 °C สาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิที่รอยต่อมีค่าเกินและไทริสเตอร์เสีย ก็คือ

1.การระบายความร้อนไม่ดีพอ การระบายความร้อนไม่ดีพอทำให้ไทริสเตอร์ร้อนเกินไป เนื่องจากตัวระบายความร้อน (heat sink) มีขนาดเล็กไป พัดลมไม่ได้เป่า หรือน้ำที่ใช้ระบายความร้อนไม่ไหล

2.แรงดันสูงเกินไป ไทริสเตอร์มีความสามารถป้องกันแรงดันเกินอยู่ในตัวเมื่อแรงดันสูงเกินไป ไทริสเตอร์ก็จะนำไฟฟ้าทำให้แรงดันตก และมีกระแสจำนวนมากไหล ปัญหาแรงดันเกิน ก็กลายเป็นปัญหากระแสเกินไป

3.กระแสเกิน เราสามารถป้องกันปัญหากระแสเกินได้โดยใช้ เซอร์กิตเบรกเกอร์แม่เหล็ก (magnetic circuit breaker) และฟิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์แม่เหล็กจะสามารถตัดวงจรได้เร็วถึง 10 มิลลิวินาที ฟิวส์อาจตัดวงจรได้เร็วถึง 1 มิลลิวินาที แต่ฟิวส์ที่ใช้ต้องเป็นฟิวส์ความเร็วสูงชนิดพิเศษ เรียกว่า ไทริสเตอร์ฟิวส์ (Thyrister fuse) หรือฟิวส์เงิน (Silver fuse) ที่สำคัญที่สุดก็คือ ไทริสเตอร์ที่ใช้ต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะทนกระแสเกินได้โดยไม่เกิดความเสียหายจนกว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์แม่เหล็กตัด หรือ ฟิวส์ขาด



รูปที่ 2.16 วงจรป้องกันเสิร์จสำหรับไทริสเตอร์

4.แรงดันเสิร์จ ผู้ออกแบบวงจรไทริสเตอร์ไม่สามารถควบคุมแรงดันเสิร์จ จึงต้องใช้วงจรป้องกันเช่นรูปที่ 2.16 ถ้าสะพานไฟถูกตัดขณะที่ไม่มีโหลด พลังงานแม่เหล็กในแกนหม้อแปลงขาเข้าก็จะถูกย้ายมายัง C_1 หรือเมื่อโหลดลดลงพลังงานแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กรั่วของหม้อแปลงขาเข้า หรือในตัวเหนี่ยวนำ L ก็จะย้ายมายัง C_1 เช่นกัน C_1 นั้นจะรับพลังงานไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง เมื่อปิดสะพานไฟตอนไม่มีโหลด แต่การทำงานนี้อาจทำให้เกิดการแกว่งในวงจร LC_1 ได้ดังนั้น จึงมีการใส่ R_1 เป็นตัวหน่วงเนื่องจากว่าแรงดันขนาด 2 เท่า ของค่าสูงสุดของแหล่งจ่ายไฟอาจปรากฏบน C_1 ได้

การสวิตช์ของไทริสเตอร์ ก็ทำให้เกิดแรงดันเสิร์จภายใน แต่มีพลังงานขนาดเล็กเท่านั้นในการเริ่มนำไฟฟ้าของไทริสเตอร์ L และ R จะจำกัดอัตราการเพิ่มของกระแส (di/dt) R ยังจำกัดกระแสประจุของ C จะช่วยรับกระแสของพาหะข้างน้อยในไทริสเตอร์ทำให้ไทริสเตอร์หยุดนำไฟได้ และขณะเดียวกันจำกัดอัตราการเพิ่มแรงดัน (dv/dt) ด้วย.

2.4 การควบคุมมุมจุดชนวนเกตของไทริสเตอร์

การควบคุมมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับใช้การควบคุมมุมจุดชนวนเกตของไทริสเตอร์ โดยอาศัยคุณสมบัติของวงจรรวมเฉพาะงานเช่น TCA 785 [5] ของบริษัท Siemens ทำให้ลดขั้นตอนการออกแบบวงจรและใช้อุปกรณ์อิเลกทรอนิกส์น้อยลงรวมทั้งฟังก์ชันการทำงานมีสมรรถนะการควบคุมที่เชื่อถือได้ โดยมีคุณสมบัติดังนี้

1) สามารถจุดชนวนเกตไทริสเตอร์ได้ 2 ตัวต่อวงจรรวม 1ตัว

2) ควบคุมมุมจุดชนวนเกตได้ระหว่าง 0° ถึง 180°

3) สามารถควบคุมความกว้างของสัญญาณจุดชนวนได้

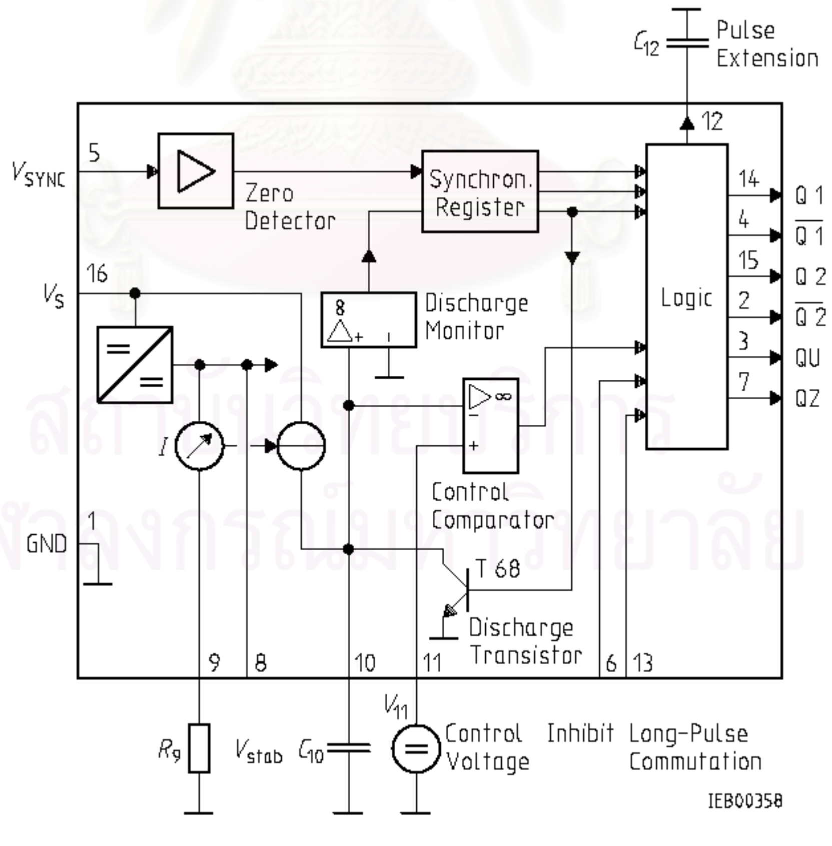
4) กระแสจุดชนวนเกตสามารถจ่ายได้สูงสุด 250mA

5) สัญญาณจุดชนวนเกตสามารถควบคุมได้โดยขา Inhibit

6) สัญญาณจุดชนวนเกตสามารถที่จะกำหนดความกว้างของรูปคลื่นได้

7) ความถี่ที่ใช้งาน 10-500 เฮิรตซ์

8) ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ -25°C ถึง 180°C



รูปที่ 2.17 โครงสร้างภายในของวงจรรวม TCA785

จากรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นโครงสร้างภายในของวงจรรวม TCA785 ซึ่งได้รวมวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่ต่างๆไว้ในตัวเดียวได้แก่

- วงจรสร้างแรงดันอ้างอิง
- วงจรตรวจจับจุดตัดศูนย์
- วงจรสร้างสัญญาณลาดเอียง
- วงจรเปรียบเทียบ
- วงจรลอจิก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การออกแบบและสร้าง

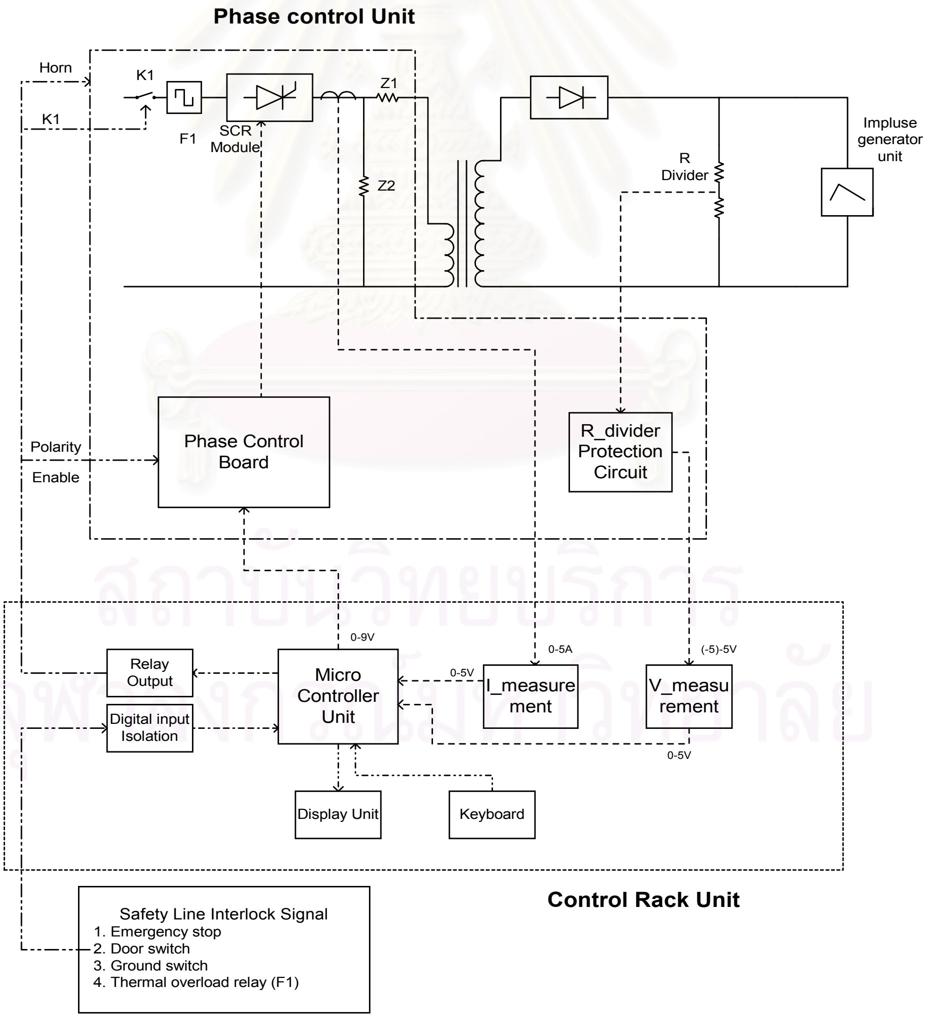
เครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุที่ออกแบบและสร้างได้ใช้หลักการควบคุมมุมเฟสของแรงดันที่จ่ายให้หม้อแปลงทดสอบโดยการออกแบบสามารถแบ่งได้เป็น 3 ภาคดังนี้

1)การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมมุมเฟส

2) การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

3)การออกแบบชุดคำสั่งควบคุม

โดยภาพรวมของเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 และบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างในแต่ละส่วนต่อไป



รูปที่ 3.1 วงจรเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 การออกแบบและสร้างชุดควบคุมมุมเฟส

3.1.1การออกแบบและการเลือกใช้อุปกรณ์

เครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุที่จะทำการสร้างได้กำหนดให้มีขนาดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายได้เท่ากับ 7.5kVA และมีขนาดแรงดันที่ขาออกไม่เกิน 220V. ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่ากระแสพิกัดได้จาก

$$I_N = \frac{S}{V} = \frac{7500}{220} = 34.1A. \tag{3.1}$$

จากค่ากระแสพิกัดที่คำนวณได้สามารถกำหนดขนาดของอุปกรณ์ต่างๆได้ดังนี้

1) เซอร์กิตเบรกเกอร์(CB) เพื่อป้องกันกระแสลัดวงจรกำหนดให้ค่ากระแสตัดวงจรมีขนาดไม่ควรเกิน 3 เท่าของกระแสพิกัด[6] ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาด 2 เท่าของกระแสพิกัด

$$AT = 2 \times I_N = 64.2 \approx 63A. \tag{3.2}$$

2) ตัวสัมผัสแบบแม่เหล็ก (K1) ใช้ควบคุมการจ่ายแรงดันกระแสสลับเข้าขั้วอาโนดของไทริสเตอร์โดยรับคำสั่งจากวงจรควบคุมและมีการติดตั้งตัวป้องกันโหลดเกิน

3) ฟิวส์ เพื่อป้องกันไทริสเตอร์เสียหายเนื่องจากกระแสเกิน การเลือกใช้ฟิวส์ไม่ควรมีขนาดเกิน 2 เท่าของกระแสพิกัด[6] ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาด 1.5 เท่าของกระแสพิกัด

$$1.5 \times I_N = 51.15 \approx 50A. \tag{3.3}$$

4) ไทริสเตอร์ เลือกใช้ไทริสเตอร์แบบกำลังที่ติดตั้งพร้อมชุดระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยเลือกขนาดพิกัดกระแสเท่ากับ

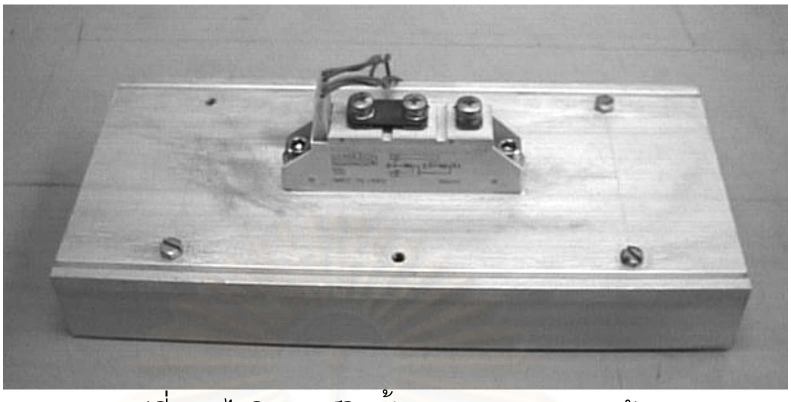
$$1.5 \times I_N = 51.15 \approx 50A. \tag{3.4}$$

และมีขนาดพิกัดทนแรงดันเลือกให้สามารถทนแรงดันได้มากกว่าหรือเท่าค่า 2-2.5 เท่าของค่ายอดแรงดันใช้งานปกติ [7]

$$2 \times V_{PEAK} = 2 \times 220\sqrt{2} = 622.25 \approx 700V. \tag{3.5}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดังนั้นจึงเลือกใช้ไทริสเตอร์ของ Semikron model SKKT72/08D ที่มีพิกัดกระแส 80 แอมแปร์ และสามารถทนแรงดันย้อนกลับได้ 800 โวลต์ [8] คุณลักษณะโดยรวมของไทริสเตอร์ที่เลือกใช้แสดงไว้ในภาคผนวก ข



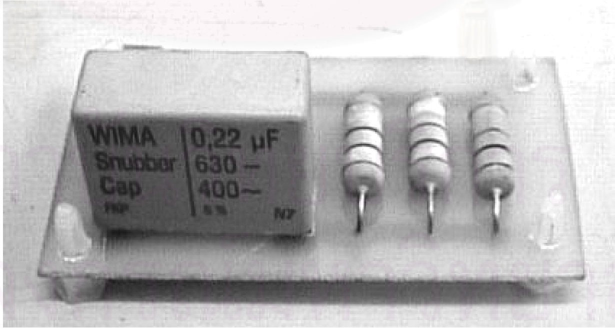
รูปที่ 3.2 ไทริสเตอร์ติดตั้งบนชุดระบายความร้อน

5) วงจรสนับเบอร์ เพื่อป้องกันอัตราการเพิ่มแรงดันต่อเวลาที่ตกคร่อมไทริสเตอร์ขณะเปิดวงจรไม่ให้มีค่าสูงเกินพิกัดของไทริสเตอร์ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 จึงเลือกใช้ตามข้อแนะนำของไทริสเตอร์ จากคู่มือของไทริสเตอร์[8]ได้กำหนดให้ใช้

ค่าความต้านทานมีขนาด 33 โอห์ม 10 วัตต์

ค่าตัวเก็บประจุขนาด 0.22 ไมโครฟารัด

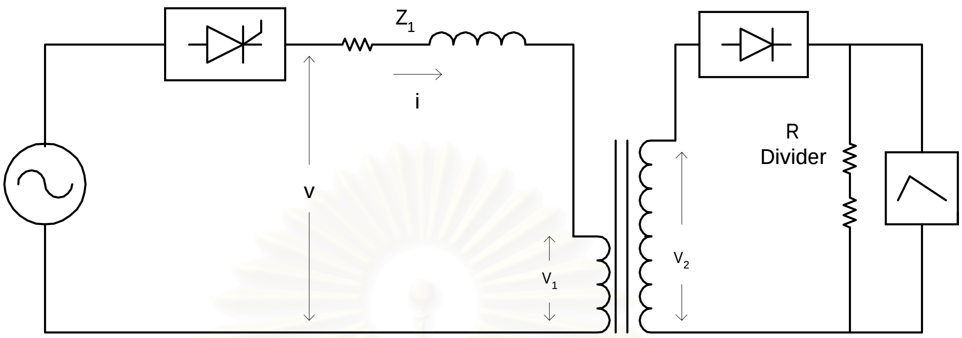
จากข้อแนะนำดังกล่าวจึงออกแบบและประกอบวงจรสนับเบอร์ขึ้นเนื่องจากมีราคาประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ของราคาชุดสำเร็จ



รูปที่ 3.3 ชุดวงจรสนับเบอร์

6) อิมพิแดนซ์ควบคุมกระแสอัดประจุ (Z_1) เครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุที่ออกแบบและสร้างใช้หลักการเพิ่มแรงดันทีละน้อย ดังนั้นจึงสามารถลดปัญหากระแสเกินได้ระดับหนึ่ง แต่ในกรณีที่เกิดการคายประจุของเครื่องสร้างแรงดันอิมพัลส์โดยชุดควบคุมยังไม่สั่งให้ลดระดับแรงดันที่

จ่ายให้หม้อแปลงทดสอบจะทำให้เกิดกระแสอัดประจุที่ตัวเก็บประจุอย่างมากและรวดเร็วซึ่งอาจทำให้ไทริสเตอร์เสียหายได้หรือฟิวส์ป้องกันที่ใส่ไว้ขาดบ่อย สามารถออกแบบได้ดังนี้



รูปที่ 3.4 วงจรการต่อสำหรับการคำนวนค่า Z_1

กำหนดให้

ค่าความเหนี่ยวนำรั่วของหม้อแปลงทดสอบที่ใช้มีค่าอิมพิแดนซ์ลัดวงจร($\%Z_{tr}$)เท่ากับ 4.25% [9] หรือ มีค่าความเหนี่ยวนำรั่วเท่ากับ 0.4114Ω

ค่ากระแสเสิร์จภาวะนำกระแสของไทริสเตอร์ (I_{TSM}) เท่ากับ 1450 A. [8]

ค่ากระแสพิกัดของไดโอดแรงสูง (I_{FN}) เท่ากับ 0.28 A. [8]

V_1 คือ แรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบ

I_1 คือ กระแสเข้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบ

V_2 คือ แรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดสอบ

I_2 คือ กระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดสอบ

จาก
$$I_1 = \frac{V_2 I_2}{V_1} \tag{3.6}$$

ให้ $I_2 = I_{FN}$ และแทนค่า V_1,V_2 และ I_2ลงในสมการที่(3.6) จะได้

$$I_1 = 127.27\text{A.}$$

จาก
$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} - Z_{tr} \tag{3.7}$$

ให้ V_1=220V. , I_1=127.27A. และ Z_{tr} =0.4114Ω ลงในสมการที่ 3.7 จะได้

$$Z_1 = 1.317 \quad \Omega$$

เนื่องจากการปรับค่าแรงดันอัดประจุจะเริ่มจากป้อนแรงดันค่าน้อยไปหามาก และในการใช้งานปกติจะทำการจ่ายแรงดันอัดประจุไม่เกินร้อยละ80 ของชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ดังนั้นจึงเลือกค่าอิมพิแดนซ์ของหน่วงประจุมีค่าประมาณ 1โอห์ม และในกรณีที่เกิดลัดวงจรก่อนเข้าหม้อแปลงจะต้องป้องไม่ให้อัตราการเปลี่ยนของกระแสต่อเวลามากกว่าค่าจำกัดของไทริสเตอร์

อิมพิแดนซ์ดังกล่าวได้จัดทำโดยการนำลวดทองแดงอาบน้ำยาขนาด SWG18 พันรอบท่อพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 4.85 เซนติเมตร จำนวน 226รอบ ได้ค่าความต้านทานต่อ 1 ท่อนเท่ากับ 0.5 โอห์ม ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 370 ไมโครเฮนรี่ ดังนั้นจะได้ค่าความต้านทานรวมเท่ากับ 1 โอห์ม ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 740 ไมโครเฮนรี่ หรือมีค่าอิมพิแดนซ์รวมเท่ากับ 1.027 โอห์ม การวัดค่าอิมพิแดนซ์ดังกล่าวใช้ LCR meter รุ่น HP4284A No. HVT-39-004 และทำการคำนวนหาค่าอัตราการเปลี่ยนของกระแสต่อเวลาดังนี้

กำหนดให้ v คือ แรงดันตกคร่อม Z_1 ; i คือ กระแสเข้า Z_1

R_1 คือ ค่าความต้านทานของ Z_1 ; L_1 คือ ค่าความเหนี่ยวนำของ Z_1

$\left(\frac{di}{dt}\right)_{CR}$ คือค่าอัตราการเปลี่ยนของกระแสต่อเวลาจำกัดของไทริสเตอร์มีค่าเท่ากับ150 A/μs หรือเท่ากับ 150×10^6 A/s [8]

$$v = i \times R_1 + L_1 \frac{di}{dt} \tag{3.8}$$

จากบทที่2 สมการที่ 2.8 สามารถแก้สมการที่ 3.8 ได้ดังนี้

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}V}{Z_1}\left[\sin(\omega t - \phi_1) - \sin(\alpha - \phi_1)e^{\left(\frac{R_1\alpha}{L_1\omega} - \frac{R_1 t}{L_1}\right)}\right] \tag{3.9}$$

โดยที่ $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}$; $\phi_1 = \tan^{-1}\frac{\omega L_1}{R_1}$

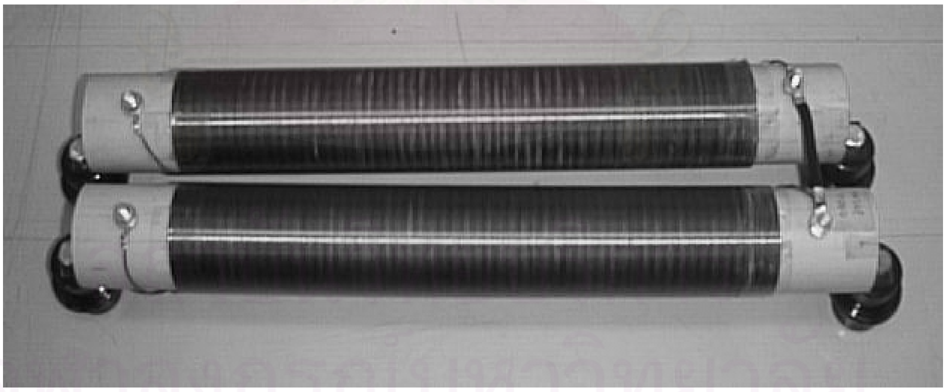
และ α คือ มุมจุดชนวนที่เวลา $t = \frac{\alpha}{\omega}$

ดังนั้น $$\frac{di(t)}{dt} = \frac{\sqrt{2}V}{Z_1}\left[\omega\cos(\omega t - \phi_1) + \frac{R_1}{L_1}\sin(\alpha - \phi_1)e^{\left(\frac{R_1\alpha}{L_1\omega} - \frac{R_1 t}{L_1}\right)}\right] \quad (3.10)$$

ที่มุมจุดชนวน α หรือ $t = \frac{\alpha}{\omega}$ แทนค่า $R_1=1\Omega$, $L_1= 740\times10^{-6}H$, $Z_1=1.027\Omega$ และ $\phi_1 = 0.228rad$ ลงในสมการที่ 3.10 จะสามารถหาค่าอัตราการเปลี่ยนของกระแสต่อเวลาที่มุมจุดชนวนใดๆได้ดังนี้

$$\frac{di}{dt} = \frac{220\sqrt{2}}{1.027}\left[100\pi\cos(\alpha - 0.228) + \frac{\sin(\alpha - 0.228)}{740\times10^{-6}}\right] \quad (3.11)$$

จากสมการที่ 3.11 สามารถหาค่าอัตราการเปลี่ยนของกระแสต่อเวลาสูงสุดได้ที่มุมจุดชนวน α =1.57rad โดย $\left(\frac{di}{dt}\right)_{MAX}$ = 420350 A/s ซึ่งมีค่าน้อยกว่า $\left(\frac{di}{dt}\right)_{CR}$ ของไทริสเตอร์มาก ดังนั้นอิมพิแดนซ์ที่ได้ออกแบบและสร้างสามารถควบคุมกระแสอัดประจุและป้องกันไทริสเตอร์มิให้เสียหายจากกรณีที่เกิดลัดวงจรก่อนเข้าหม้อแปลงทดสอบได้



รูปที่ 3.5 อิมพิแดนซ์ควบคุมกระแสอัดประจุ

7) ดีแมกนิไตซิ่งอิมพิแดนซ์ (Z_2) เนื่องจากการหยุดนำกระแสของไทริสเตอร์ไม่สามารถหยุดนำกระแสเมื่อกระแสโหลดมีค่าเท่ากับ 0 ได้พอดี เนื่องจากต้องรอระยะเวลาคืนตัวของประจุภายในรอยต่อของไทริสเตอร์และจะมีค่ายอดของกระแสค่าหนึ่ง ทำให้มีการเก็บพลังงานส่วนหนึ่งไว้ในค่าความเหนี่ยวนำรั่วของหม้อแปลงทดสอบและในอิมพิแดนซ์ควบคุมกระแสอัดประจุ (Z_1) ดังนั้นจึงต้องต่อดีแมกนิไตซิ่งอิมพิแดนซ์ขนานกับโหลดรวมของหม้อแปลงทดสอบกับอิมพิแดนซ์ควบคุมกระแสอัดประจุเพื่อถ่ายเทพลังงานออกจากค่าความเหนี่ยวนำทั้ง 2 และยังคงช่วยสร้างกระแสเริ่มต้นสำหรับให้ไทริสเตอร์สามารถคงสถาวะการนำกระแสที่มุมจุดชนวนที่มีค่าแรงดันต่ำโดยเลือกใช้ค่าความต้านทานประมาณ 50 โอห์ม

อิมพิแดนซ์ดังกล่าวได้จัดทำโดยการนำลวดโลหะผสมนิเกิลโครเมี่ยม อัตราส่วน 60/16 ขนาด SWG 20 ความต้านทาน 1.9โอห์มต่อหลา พันรอบท่อฉนวนเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 7 เซนติเมตร จำนวน 101 รอบ วัดค่าความต้านทานได้ 50.05 โอห์ม และมีค่าความเหนี่ยว 205.9 ไมโครเฮนรี่ การวัดค่าอิมพิแดนซ์ดังกล่าวใช้ LCR meter รุ่น HP4284A No. HVT-39-004

รูปที่ 3.6 ดีแมกนิไตซิ่งอิมพิแดนซ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.2 การออกแบบวงจรควบคุมมุมเฟส

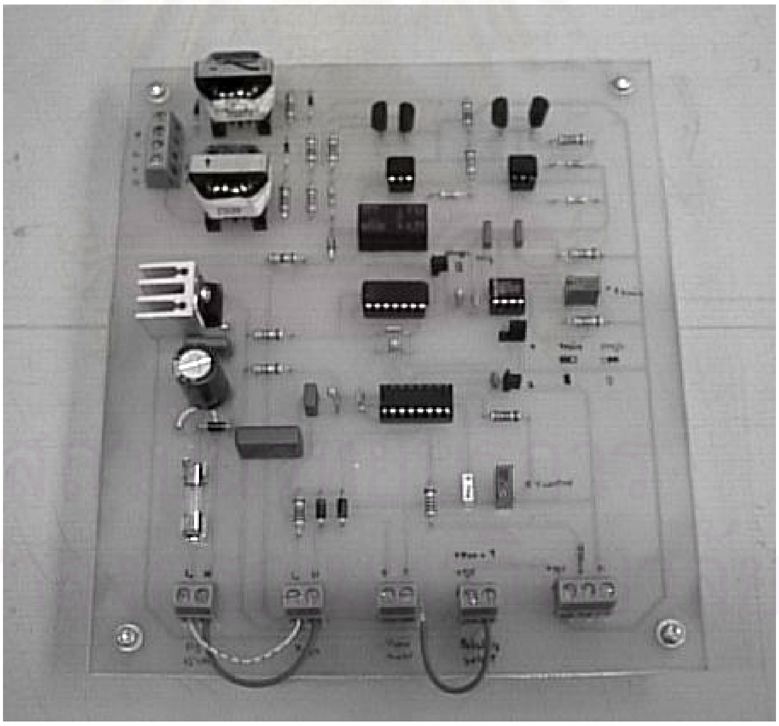
การออกแบบวงจรควบคุมมุมเฟสใช้วงจรรวม TCA785 ของ Siemens เป็นหลักการออกแบบและเพิ่มวงจรต่อพ่วงภายนอกของชุดวงจรรวมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติคือ

1) สามารถเลือกสัญญาณจุดชนวนเฉพาะด้านบวก หรือ ด้านลบ

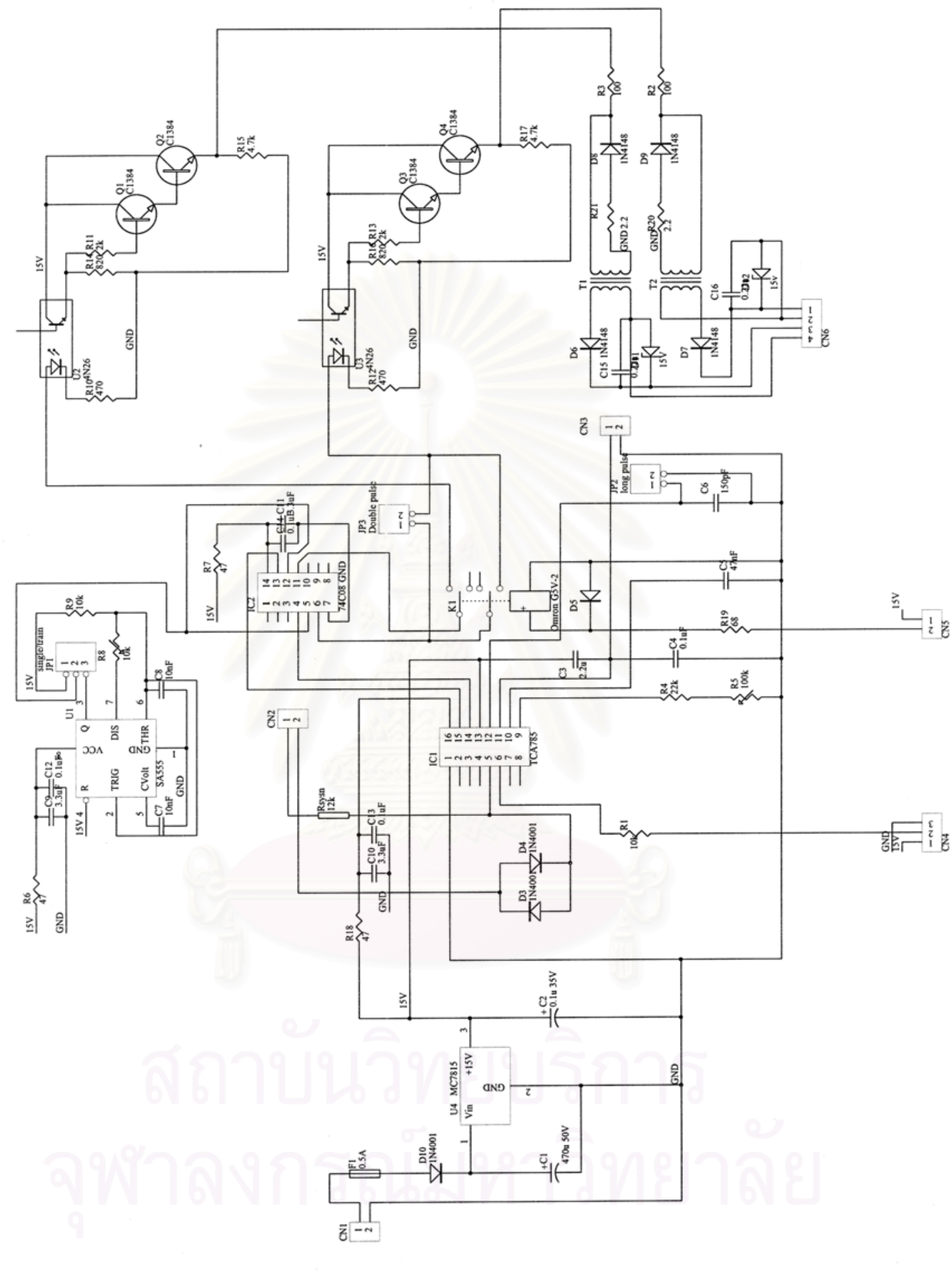
2) เพิ่มวงจรแยกโดดทางไฟฟ้าโดยแสงและหม้อแปลงแยกขดลวดของชุดจุดชนวน

3) เพิ่มวงจรสร้างสัญญาณจุดชนวนต่อเนื่องความถี่สูง

การทำงานของวงจรควบคุมมุมเฟสจะมีแรงดันจ่ายเข้าที่ขั้วแรงดันควบคุมก่อนทำการจ่ายสัญญาณ enable ให้วงจรเสมอเพื่อป้องการจุดชนวนผิดพลาดเนื่องจากขั้วควบคุมไม่มีแรงดันอ้างอิง การเลือกมุมเฟสที่ต้องการจุดชนวนไทริสเตอร์ทำได้โดยการป้อนค่าแรงดันกระแสตรงเข้าที่ขั้วแรงดันควบคุม โดยมุมจุดชนวนไทริสเตอร์สามารถเลือกได้ตั้งแต่ 0 ถึง 180 องศา (ด้านบวก) แปรผันตรงกับค่าแรงดันควบคุม 0 ถึง 9 โวลต์ ถ้าต้องการเลือกมุมจุดชนวนตั้งแต่ 180 ถึง 360 องศา(ด้านลบ) ต้องทำการจ่ายสัญญาณเข้าที่ขั้ว polarity select และจ่ายแรงดันควบคุมขนาด 0 ถึง 9 โวลต์



รูปที่ 3.7 วงจรควบคุมมุมเฟสที่ประกอบเสร็จ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

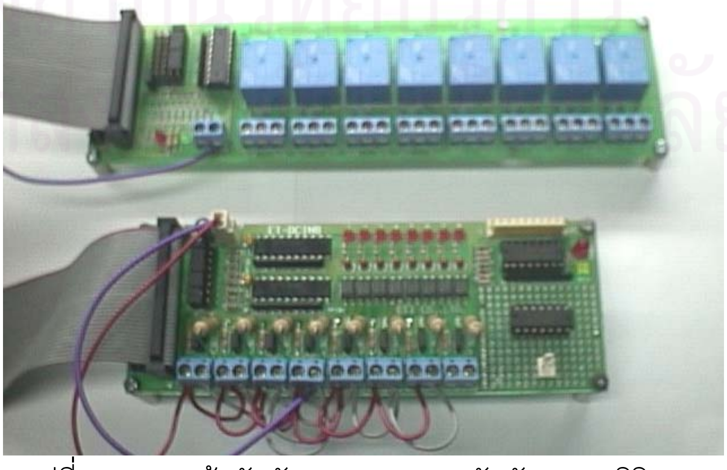
รูปที่ 3.8 วงจรวงจรควบคุมมุมเฟส

3.2 การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ได้รับการพัฒนาโดยบริษัท อีทีที จำกัด รุ่น CP-AT32 Plus [10] ภายในประกอบด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ของบริษัท Phillips รุ่น P89C51RD2 ทำงานที่ความถี่ 18.432 MHz มีหน่วยความจำสำหรับเก็บชุดคำสั่งแบบเขียนทับและลบด้วยไฟฟ้าขนาด 64Kbyte ในการเชื่อมต่อกับสัญญาณอนาลอกมีชุดแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 12บิท จำนวน 2ช่องสัญญาณ และมีชุดแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอกขนาด 8 บิท จำนวน 4ช่องสัญญาณ และยังมีอุปกรณ์ต่อพ่วงเช่น แป้นตัวเลขป้อนค่า จอแสดงผลแบบตัวอักษร ชุดหน้าสัมผัสควบคุม และ ชุดรับสัญญาณดิจิตอล

รูปที่ 3.9 ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์

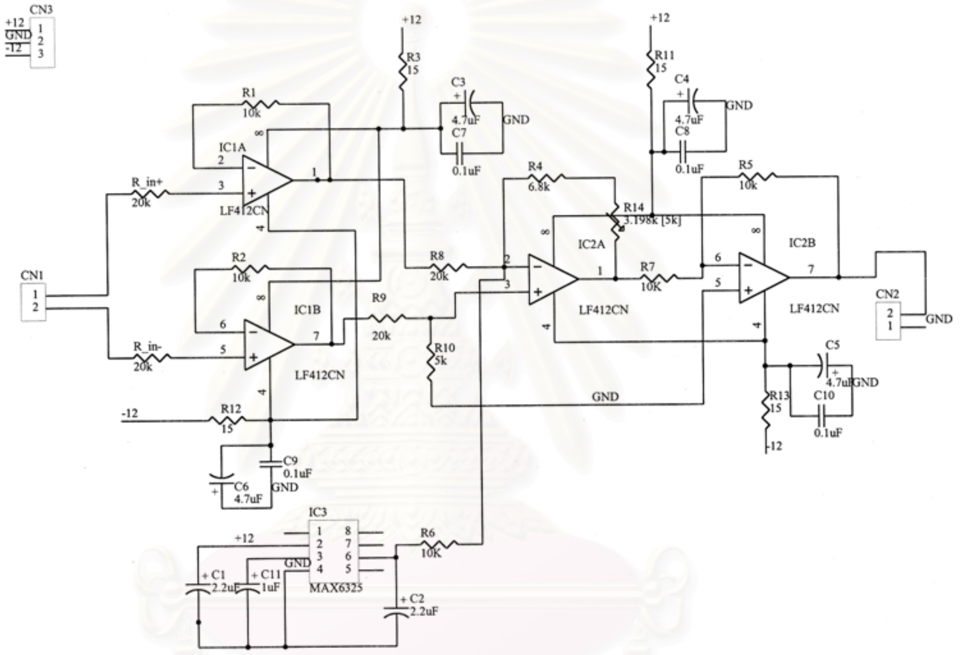
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.10 ชุดหน้าสัมผัสควบคุมและชุดรับสัญญาณดิจิตอล

3.2.1 การออกแบบวงจรวัดแรงดันอัดประจุ

การออกแบบวงจรวัดแรงดันต้องคำนึงถึงค่าอิมพิแดนซ์ขาเข้าวงจรจะต้องมีค่าสูงมากเพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่ออัตราส่วนอิมพิแดนซ์ของดิไวเดอร์จึงใช้คุณสมบัติของวงจรแรงดันตาม (Voltage Follower) เป็นภาคขาเข้าของวงจรที่ออกแบบ และเนื่องจากชุดแปลงค่าอนาลอกเป็นดิจิตอลของชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้มีช่วงแรงดันที่สามารถแปลงค่าได้เท่ากับ 0-5 โวลต์ จึงต้องลดทอนแรงดันอัดประจุจาก –100 ถึง +100 กิโลโวลต์ ลงเหลือ –5 ถึง +5 โวลต์ ก่อนจ่ายเข้าวงจรแรงดันตาม และทำการลดลงเหลือ –2.5 ถึง +2.5 โวลต์ เพื่อนำไปเข้าวงจรบวกกับแรงดันอ้างอิง +2.5 โวลต์ จะได้ช่วงแรงดันที่ออกจากวงจรวัดแรงดันอัดประจุเท่ากับ 0 ถึง +5 โวลต์



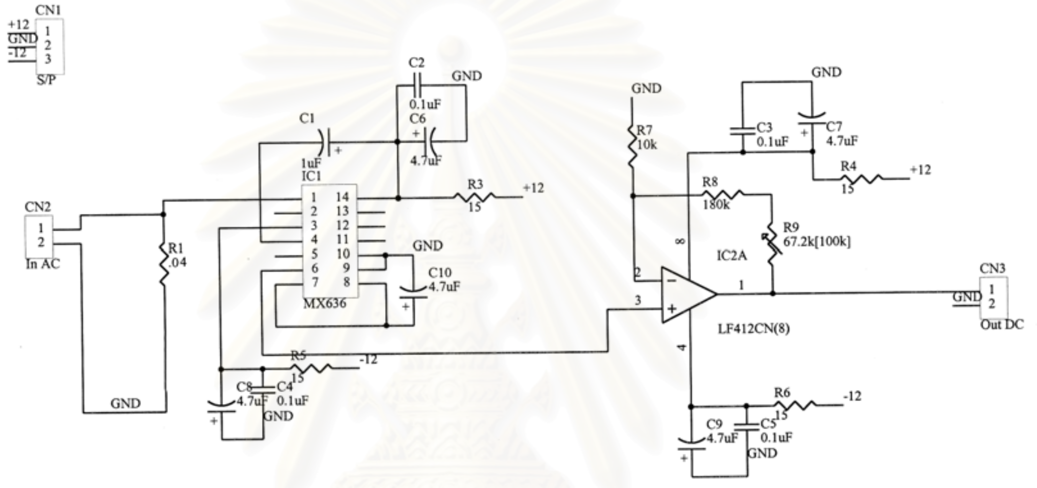
รูปที่ 3.11 วงจรวัดแรงดันแรงดันอัดประจุ

รูปที่ 3.12 วงจรวัดแรงดันแรงดันอัดประจุที่ประกอบเสร็จ

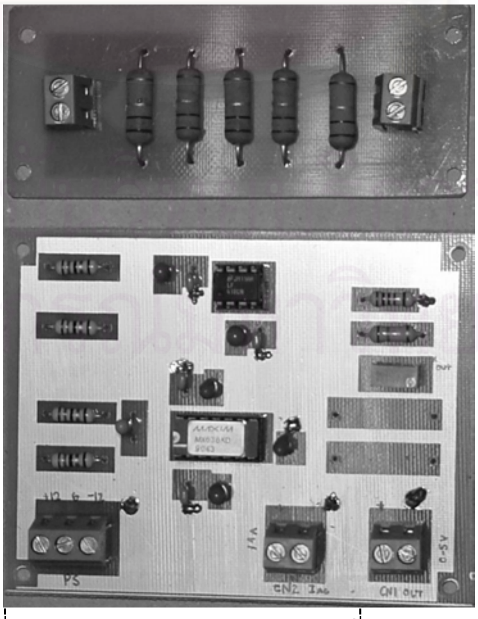
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.2 การออกแบบวงจรวัดกระแสอัดประจุ

การวัดกระแสอัดประจุใช้หม้อแปลงกระแสแบบคล้องขนาด 60/5A. , 15VA สำหรับลดทอนกระแสและแยกขาดทางไฟฟ้า จ่ายกระแสสลับให้กับความต้านทานขนาด 0.04โอห์ม เพื่อแปลงกระแสสลับจาก 0 ถึง 5 แอมแปร์ เป็นแรงดันสลับขนาด 0 ถึง 200 มิลลิโวลต์ เป็นสัญญาณขาเข้าให้วงจรรวม MX636 [11] เพื่อแปลงค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณแรงดันกระแสสลับเป็นค่าแรงดันกระแสตรง อัตราส่วน 1ต่อ1 และส่งเข้าวงจรขยายทำการขยายค่าแรงดันจาก 0 ถึง 200 มิลลิโวลต์ เป็น 0 ถึง 5 โวลต์ และส่งออกไปยังชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป



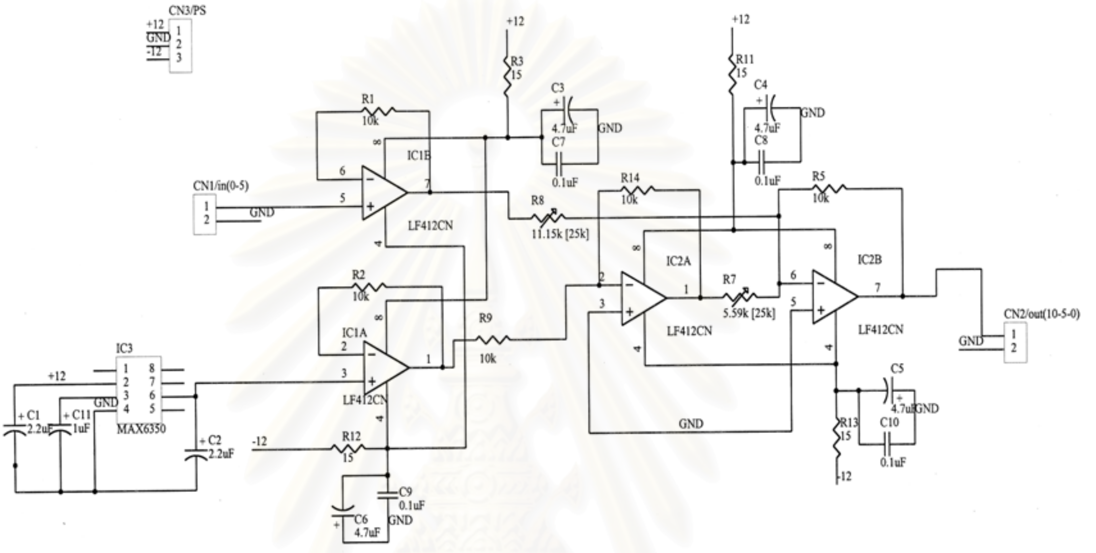
รูปที่ 3.13 วงจรวัดกระแสอัดประจุ



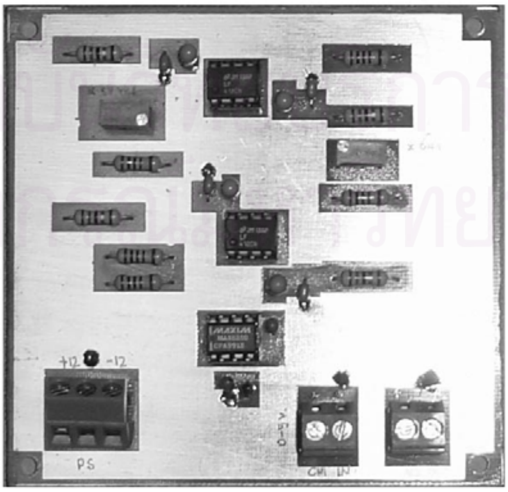
รูปที่ 3.14 วงจรวัดกระแสอัดประจุที่ประกอบเสร็จ

3.2.3 การออกแบบวงจรจ่ายแรงดันควบคุมมุมจุดชนวน

วงจรจ่ายแรงดันควบคุมแรงดันมุมจุดชนวนรับสัญญาณจากชุดแปลงดิจิตอลขนาด 8 บิท เป็นแรงดันกระแสตรง 0 ถึง 5 โวลต์ จากชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่งผ่านเข้าวงจรแรงดันตามและลดขนาดแรงดันเหลือ 0 ถึง 4.5 โวลต์ ส่งเข้าวงจรบวกกับค่าแรงดันอ้างอิงขนาด -9 โวลต์ และส่งเข้าวงจรขยายแบบลบอัตราขยายเท่ากับ –1



รูปที่ 3.15 วงจ่ายแรงดันควบคุมมุมจุดชนวน



รูปที่ 3.16 วงจ่ายแรงดันควบคุมมุมจุดชนวนที่ประกอบเสร็จ

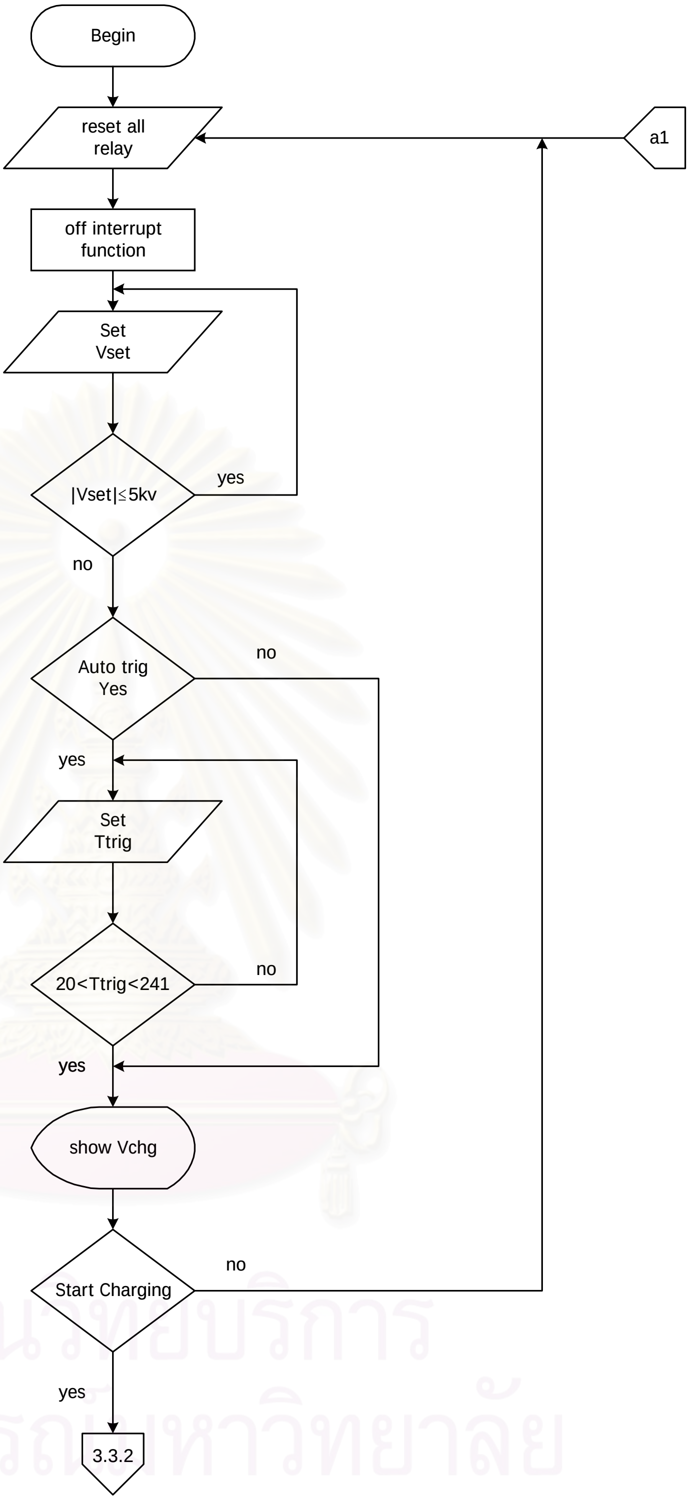
3.3 การออกแบบชุดคำสั่งควบคุม

ชุดคำสั่งควบคุมพัฒนาบนภาษา C โดยใช้ชุดแปลคำสั่งของบริษัท Keil Software ชื่อ C51 Complier [12] ชุดคำสั่งที่พัฒนาสามารถแบ่งออกเป็น 4ส่วนหลักคือ

3.3.1 ชุดคำสั่งป้อนแรงดันอัดประจุ

เริ่มต้นจะทำการยกเลิกการทำงานของชุดหน้าสัมผัสควบคุมทั้งหมด และรอการป้อนค่าแรงดันอัดประจุที่ต้องการโดยค่าแรงดันอัดประจุต้องมีขนาดไม่น้อยกว่า 5 กิโลโวลต์ เมื่อป้อนค่าแรงดันอัดประจุเรียบร้อย ชุดควบคุมจะทำการสอบถามการส่งสัญญาณลั่นไกจะใช้ระบบอัตโนมัติหรือไม่ ถ้าใช่ชุดควบคุมจะรอการป้อนค่าเวลาซึ่งต้องมีค่ามากกว่า20วินาที และไม่เกิน 240วินาที ชุดควบคุมจะรอการยืนยันการเริ่มทำงานจากผู้ใช้เพื่อเริ่มการทำงานชุดคำสั่งถัดไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.17 แผนผังขั้นตอนการทำงานของชุดคำสั่งป้อนค่าแรงดันอัดประจุ

3.3.2 ชุดคำสั่งควบคุมแรงดันอัดประจุ

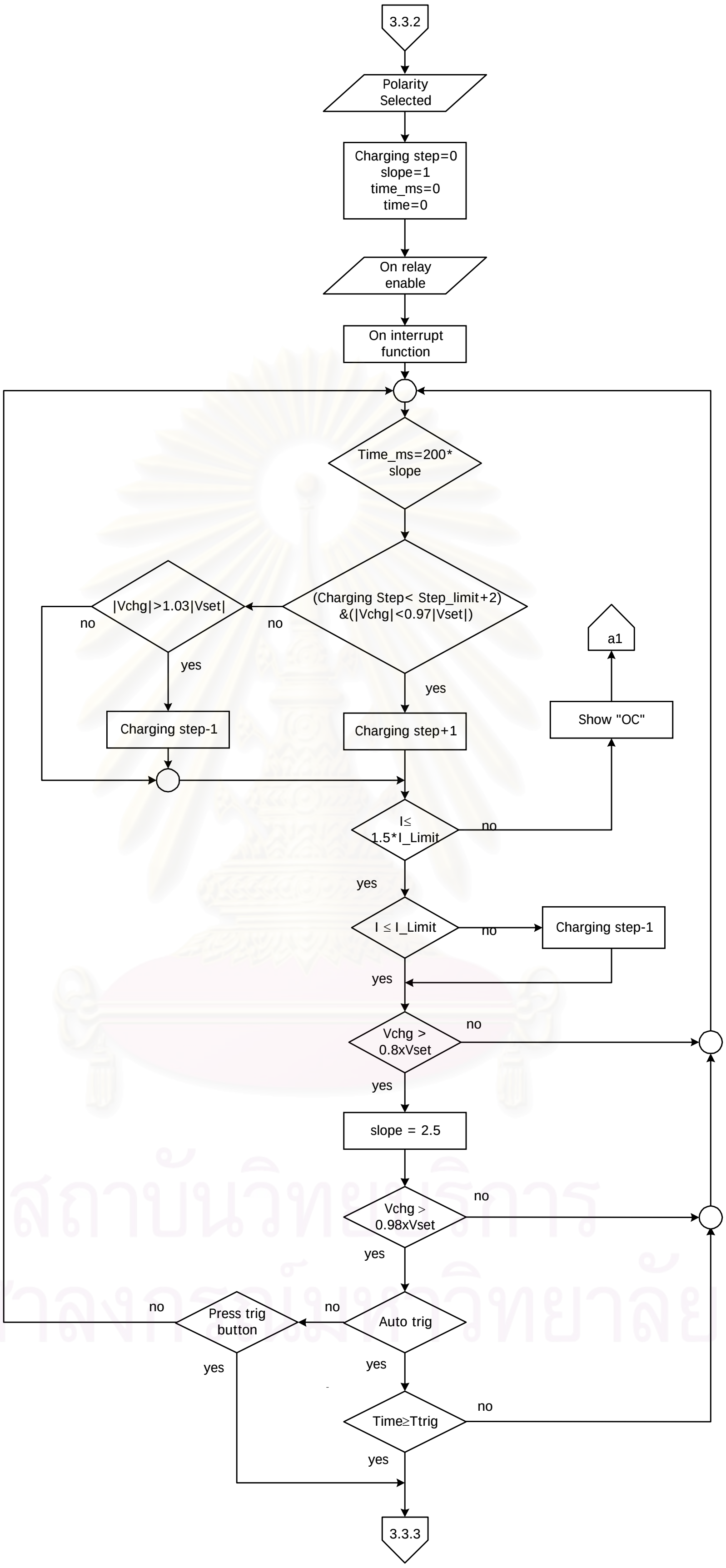
เมื่อป้อนค่าแรงดันอัดประจุและยืนยันเริ่มการทำงาน ชุดควบคุมจะเริ่มสั่งการผ่านหน้าสัมผัส และวงจรควบคุม เพื่อเริ่มทำการเพิ่มแรงดันอัดประจุเป็นลักษณะขั้นบันได การเพิ่มแรงดันอัดประจุแต่ละขั้นมีการตรวจสอบและควบคุมไม่ให้เกิดสภาวะกระแสเกิน ดังนี้

กรณีแรก กระแสมากกว่า 1.5 เท่าของกระแสพิกัดของหม้อแปลงทดสอบจะหยุดทำการอัดประจุ

กรณีที่สอง กระแสมากว่ากระแสพิกัดแต่มีค่าน้อยกว่ากรณีแรก ชุดควบคุมจะทำการลดแรงดันอัดประจุลง 1 ขั้น และทำการอัดประจุต่อ

เมื่อแรงดันอัดประจุมีค่าประมาณร้อยละ80ของแรงดันอัดประจุที่ตั้งค่าไว้ ชุดควบคุมจะทำการลดอัตราความเร็วในการเพิ่มขั้นแรงดันอัดประจุเป็นร้อยละ40 ของช่วงแรก จนกระทั่งแรงดันอัดประจุมีค่าประมาณร้อยละ 98 ของค่าแรงดันอัดประจุที่ตั้งค่าไว้ชุดควบคุมจะทำการตรวจสอบการเลือกส่งสัญญาณลั่นไก ถ้าเลือกแบบอัตโนมัติชุดควบคุมจะทำการตรวจสอบเวลาถ้ามากกว่าที่ตั้งค่าไว้ก็เริ่มการทำงานชุดคำสั่งหัวข้อถัดไป หรือถ้าเลือกแบบควบคุมเองชุดควบคุมจะสอบถามการส่งสัญญาณลั่นไกจากผู้ปฏิบัติงาน เมื่อได้รับการยืนยันจึงเริ่มการทำงานชุดคำสั่งหัวข้อถัดไป

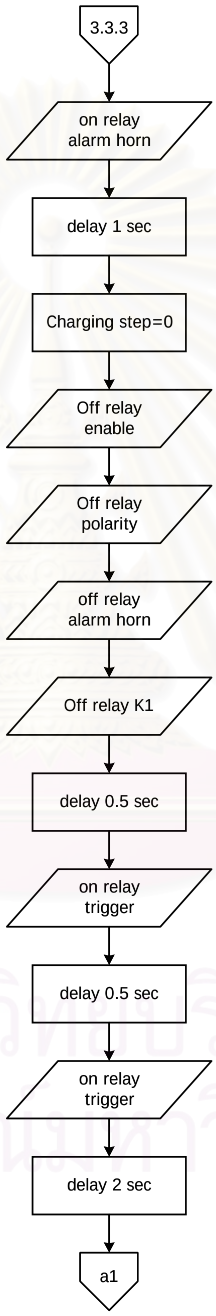
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.18 แผนผังขั้นตอนการทำงานของชุดคำสั่งควบคุมแรงดันอัดประจุ

3.3.3 ชุดคำสั่งจบการอัดประจุ

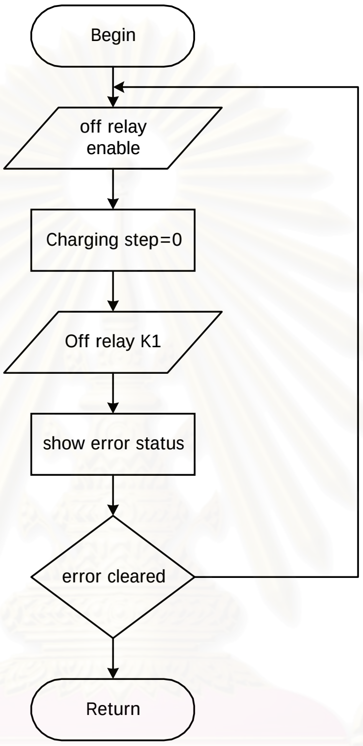
ชุดคำสั่งนี้จะทำการส่งสัญญาณเสียงเตือน หยุดการอัดประจุ ทำการส่งสัญญาณให้ชุดลั่นไกของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ และวนรอบการทำงานกลับไปยังชุดคำสั่งป้อนค่าแรงดันอัดประจุเพื่อเริ่มการทำงานอีกครั้ง



รูปที่ 3.19 แผนผังขั้นตอนการทำงานของชุดคำสั่งจบการอัดประจุ

3.3.4 ชุดคำสั่งขัดจังหวะการควบคุมอัดประจุ

เพื่อความปลอดภัยในการใช้งานชุดควบคุมจึงออกแบบให้มีการรับสัญญาณการเปิดวงจรของสวิตซ์ประตูห้องทดสอบ การกดปุ่มหยุดฉุกเฉิน การทำงานของชุดป้องกันโหลดเกิน และ สวิตซ์วางชุดต่อสายดิน โดยชุดคำสั่งนี้จะหยุดทำการอัดประจุและแสดงสถานะของสัญญาณที่เป็นสาเหตุของการขัดจังหวะ เพื่อให้ผู้ไปฏิบัติงานทำการแก้ไขก่อนจึงจะสามารถเริ่มการทำงานใหม่ได้



รูปที่ 3.20 แผนผังขั้นตอนการทำงานของชุดคำสั่งขัดจังหวะการควบคุมอัดประจุ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 การทดสอบวงจรควบคุมแต่ละส่วน

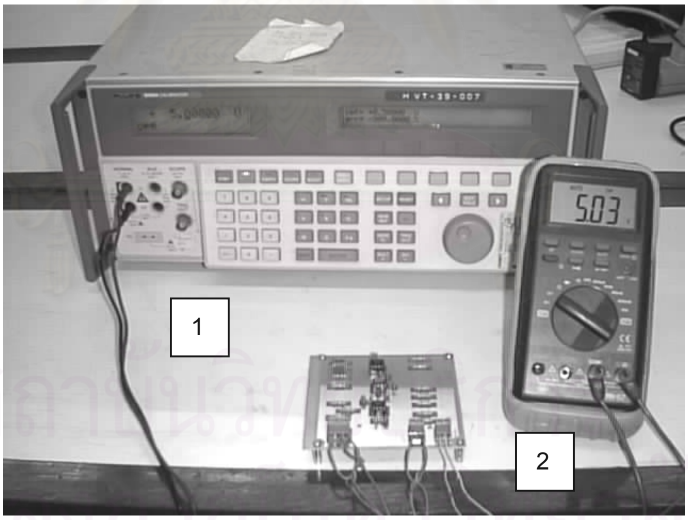
ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงการออกแบบและประกอบสร้างวงจรควบคุมแต่ละส่วน ซึ่งหลังจากประกอบสร้างแล้วได้นำมาทดสอบวงจรควบคุมแต่ละส่วนดังนี้

4.1.1 การทดสอบวงจรวัดแรงดันอัดประจุ

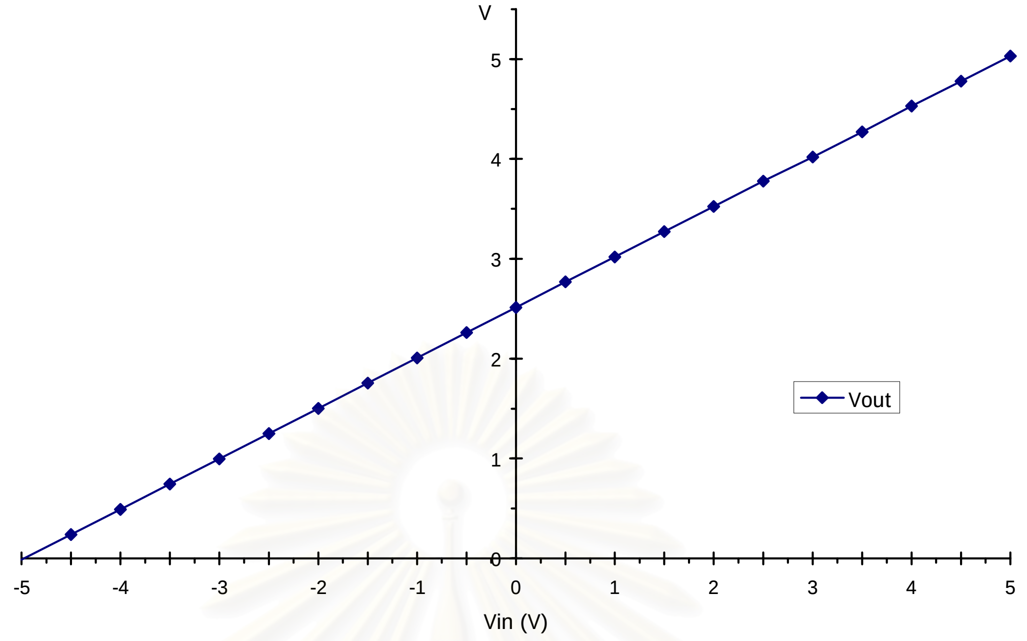
การทดสอบวงจรวัดแรงดันอัดประจุ ได้ทำการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรวัดโดยใช้อุปกรณ์ดังต่อไปนี้

1 คือ เครื่องสอบเทียบ FLUKE 5500A s/n 6675005

2 คือ มัลติมิเตอร์ MY67 s/n 00428870



รูปที่ 4.1 การทดสอบวงจรวัดแรงดันอัดประจุ



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันขาเข้ากับแรงดันขาออกวงจรวัดแรงดันอัดประจุ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรวัดแรงดันอัดประจุ

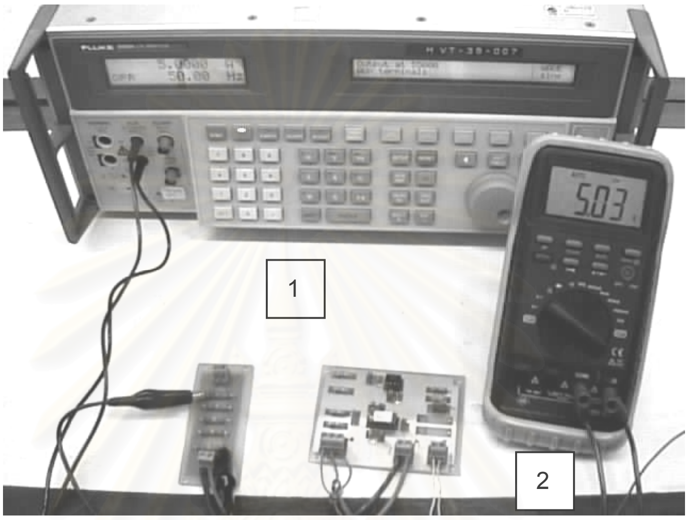
แรงดันขาเข้า (V)	แรงดันขาออก (V)	ค่าความคลาดเคลื่อน(%)
-5	-0.013	-
-4.5	0.239	-4.40%
-4	0.491	-1.80%
-3.5	0.744	-0.80%
-3	0.997	-0.30%
-2.5	1.249	-0.08%
-2	1.502	-0.13%
-1.5	1.755	0.29%
-1	2.008	0.40%
-0.5	2.26	0.44%
0	2.513	0.52%
0.5	2.768	0.66%
1	3.019	0.63%
1.5	3.272	0.68%
2	3.525	0.71%
2.5	3.778	0.75%
3	4.02	0.50%
3.5	4.27	0.47%
4	4.53	0.66%
4.5	4.78	0.64%
5	5.03	0.60%

4.1.2 การทดสอบวงจรวัดกระแสอัดประจุ

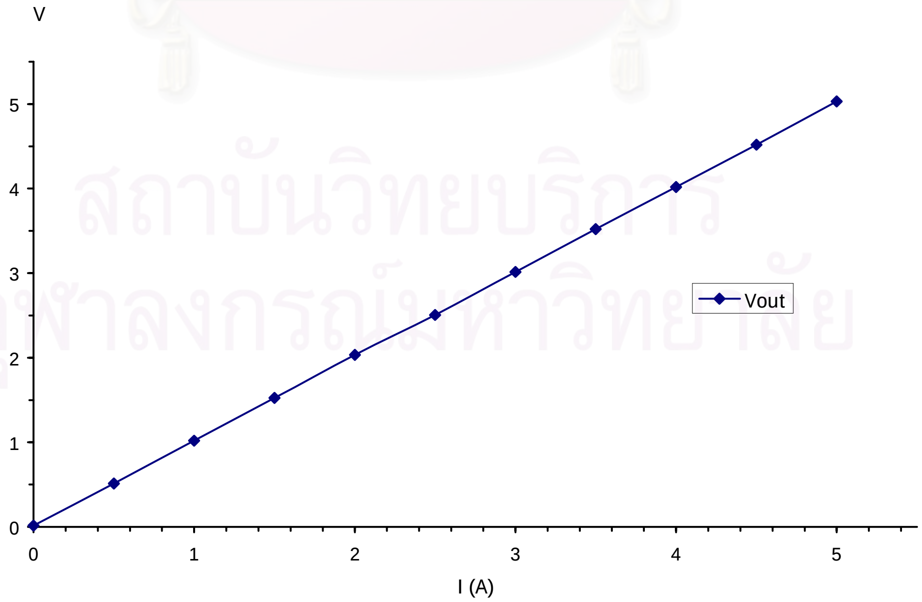
การทดสอบวงจรวัดกระแสอัดประจุ ได้ทำการป้อนกระแสรูปคลื่นซายน์ ความถี่ 50 เฮิร์ท และวัดค่าแรงดันขาออกของวงจรวัด โดยใช้อุปกรณ์ดังต่อไปนี้

1 คือ เครื่องสอบเทียบ FLUKE 5500A s/n 6675005

2 คือ มัลติมิเตอร์ MY67 s/n 00428870



รูปที่ 4.3 การทดสอบวงจรวัดกระแสอัดประจุ



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสขาเข้ากับแรงดันขาออกวงจรวัดกระแส

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบวงจรวัดกระแสอัดประจุ

กระแสขาเข้า (A)	แรงดันขาออก (V)	ค่าความคลาดเคลื่อน(%)
0	0.013	-
0.5	0.511	2.20%
1	1.018	1.80%
1.5	1.526	1.73%
2	2.033	1.65%
2.5	2.506	0.24%
3	3.014	0.47%
3.5	3.521	0.60%
4	4.02	0.50%
4.5	4.52	0.44%
5	5.03	0.60%

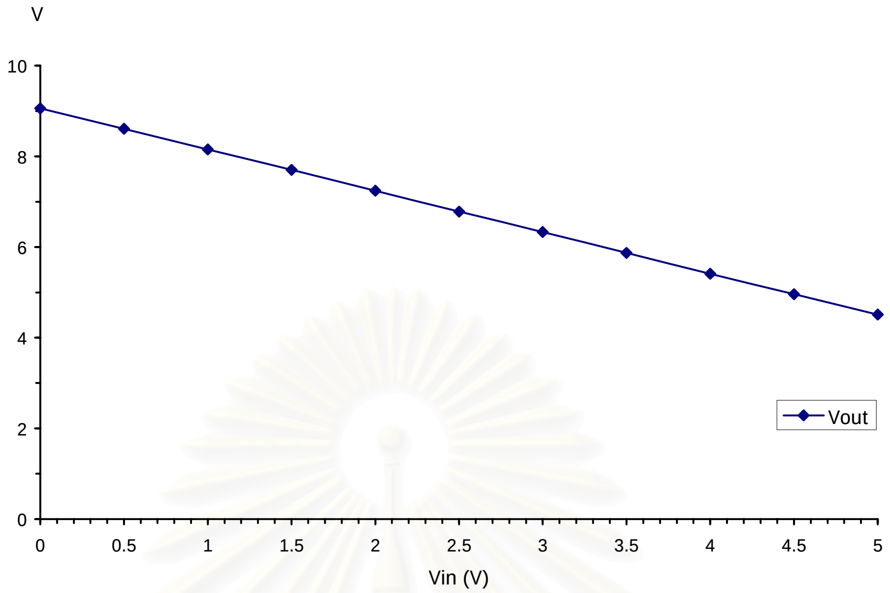
4.1.3 การทดสอบวงจรจ่ายแรงดันควบคุมมุมจุดชนวน

การทดสอบวงจรจ่ายแรงดันควบคุมแรงดันอัดประจุ ได้ทำการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรวัดโดยใช้อุปกรณ์ดังต่อไปนี้

1 คือ เครื่องสอบเทียบ FLUKE 5500A s/n 6675005

2 คือ มัลติมิเตอร์ MY67 s/n 00428870

รูปที่ 4.5 การทดสอบวงจรจ่ายแรงดันควบคุมมุมจุดชนวน



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันขาเข้ากับแรงดันขาออกวงจรควบคุมมุมจุดชนวน

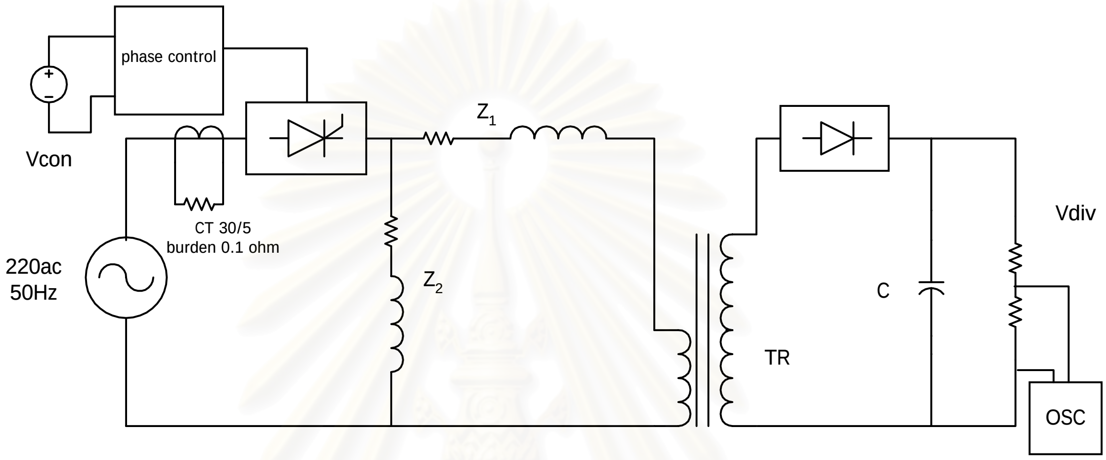
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบวงจรควบคุมมุมจุดชนวน

แรงดันขาเข้า (V)	แรงดันขาออก (V)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
0	9.06	0.67%
0.5	8.61	0.70%
1	8.15	0.62%
1.5	7.7	0.65%
2	7.24	0.56%
2.5	6.78	0.44%
3	6.33	0.48%
3.5	5.87	0.34%
4	5.41	0.19%
4.5	4.96	0.20%
5	4.51	0.22%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.4 การทดสอบวงจรควบคุมมุมเฟส

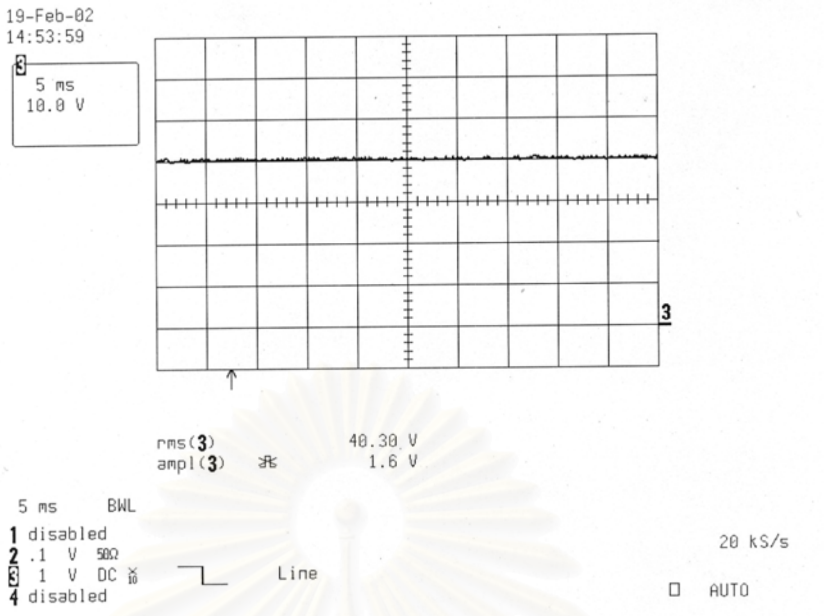
ทำการทดสอบป้อนแรงดันอัดประจุโดยการป้อนแรงดันควบคุมปรับค่าด้วยมือเข้าวงจรควบคุมมุมเฟสโดยการป้อนแรงดันอัดประจุจะทำการป้อนไม่เกิน 50กิโลโวลต์เพื่อป้องไดโอดด้านแรงสูงทำงานเกินขีดจำกัด การทดสอบมีการต่อวงจรดังรูป



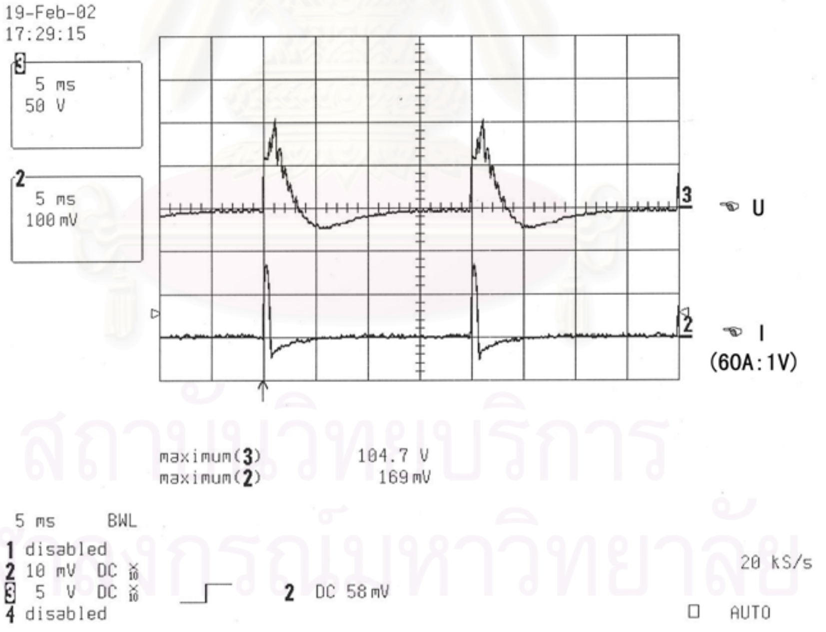
รูปที่ 4.7 การต่อวงจรทดสอบวงจรควบคุมมุมเฟส

อุปกรณ์ที่ใช้

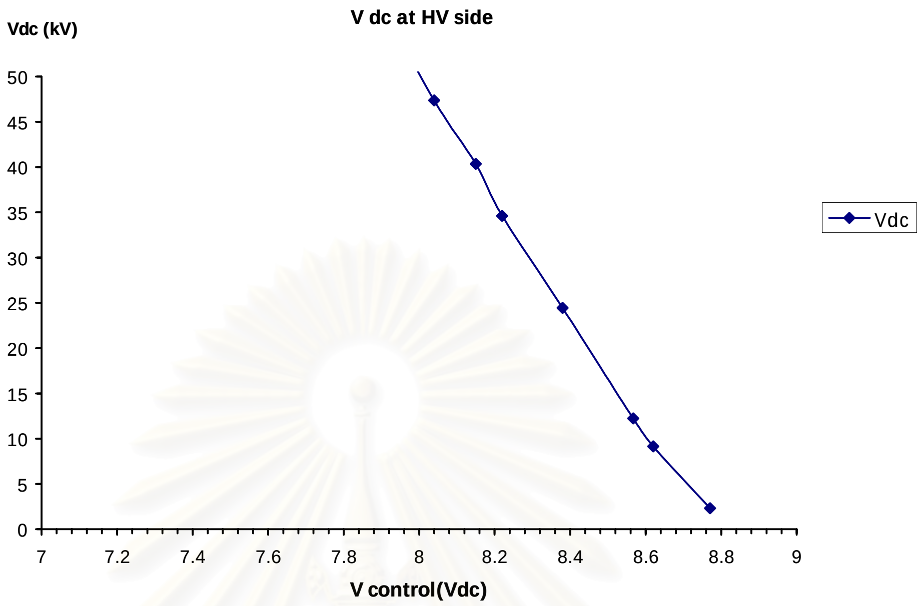
TR	คือ	หม้อแปลงทดสอบ 220V/100kV 5kVA
C	คือ	ตัวเก็บประจุ (C) ขนาด 49.5nF 100kV
CT	คือ	หม้อแปลงกระแสแบบคล้อง อัตราส่วน 30/5A burden 0.1 ohm
Vdiv	คือ	โวลต์เตจดิไวเดอร์ อัตราส่วน 1:1190
OSC	คือ	ออสสิโลสโคป Lecroy 9384M
Vcon	คือ	แหล่งจ่ายแรงดันควบคุม
Z_1	คือ	อิมพิแดนซ์ควบคุมกระแสอัดประจุ
Z_2	คือ	ดีแมกนิไตซิ่งอิมพิแดนซ์



รูปที่ 4.8 แรงดันกระแสตรงคร่อม C เท่ากับ 48kV.



รูปที่ 4.9 แรงดันและกระแสที่ป้อนเข้าหม้อแปลงทดสอบที่ระดับแรงดันอัดประจุเท่ากับ 48kV.



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันควบคุมกับค่าแรงดันตกคร่อม C

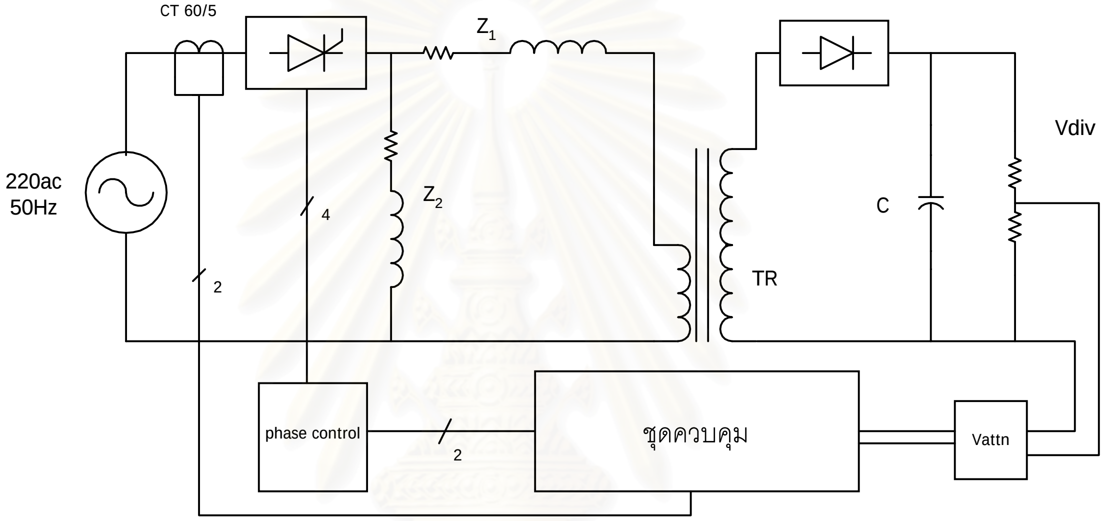
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบวงจรควบคุมมุมเฟส

แรงดันควบคุม (V)	แรงดันตกคร่อม C (kV)
8.77	2.300
8.62	9.14
8.57	12.22
8.38	24.44
8.22	34.63
8.15	40.34
8.04	47.36

4.2 การทดลองใช้งานจริง

4.2.1 การทดสอบจับเวลาสัญญาณลั่นไก

ทำการทดลองจับเวลาสัญญาณลั่นไกโดยทำการต่อวงจรดังรูปที่ 4.11 ทำการตั้งค่าแรงดันอัดประจุที่ต้องการเท่ากับ 35กิโลโวลต์ ทำการเลือกการส่งสัญญาณลั่นไกของชุดควบคุมแบบอัตโนมัติ ตั้งเวลาการลั่นไก และทำการจับเวลาหาค่าเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยได้ดังตารางที่ 4.5 (ข้อมูลในการจับเวลาในแต่ละครั้งแสดงดังในตารางที่ ก.1)



รูปที่ 4.11 การต่อวงจรควบคุมแรงดันอัดประจุ

อุปกรณ์ที่ใช้

TR	คือ	หม้อแปลงทดสอบ 220V/100kV 5kVA
C	คือ	ตัวเก็บประจุ ขนาด 49.5nF 100kV
CT	คือ	หม้อแปลงกระแสแบบคล้อง อัตราส่วน 60/5A
Vdiv	คือ	โวลต์เตจดิไวเดอร์ อัตราส่วน 1:1024
Vattn	คือ	ชุดลดทอนแรงดัน อัตราส่วน 1:21.5
Z_1	คือ	อิมพิแดนซ์ควบคุมกระแสอัดประจุ
Z_2	คือ	ดีแมกนิไตซิ่งอิมพิแดนซ์

กำหนดให้ Ttrig คือ ค่าเวลาที่ตั้ง

Time คือ เวลาที่วัดได้

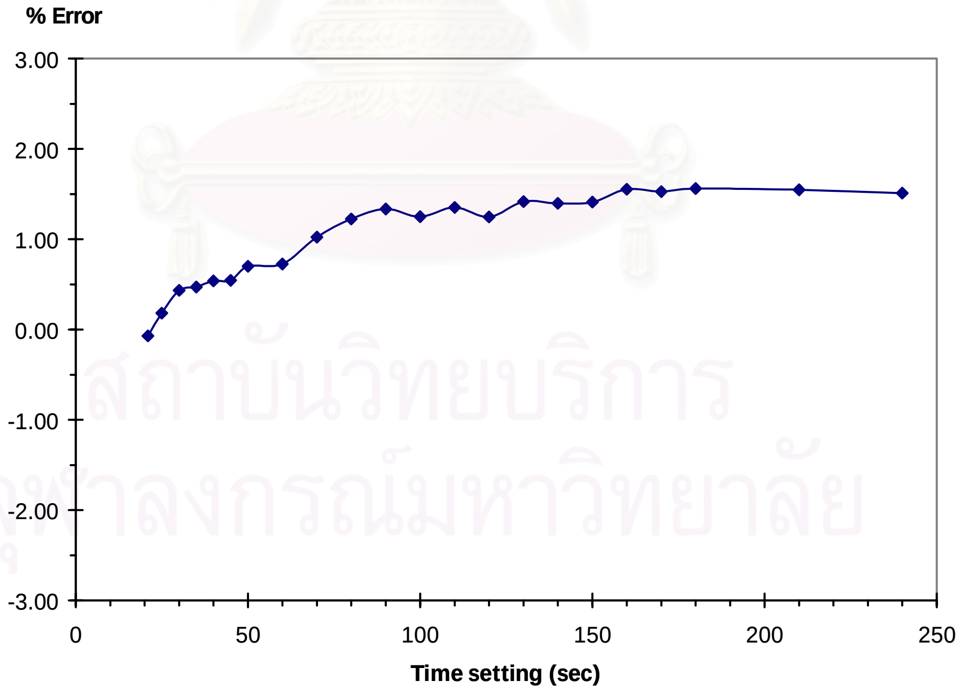
%Error คือ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด

$$\%Error = \frac{Time - Ttrig}{Trig} x100$$

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบจับเวลาสัญญาณลั่นไก

Ttrig (sec)	21	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90
Time (sec)	20.985	25.045	30.13	35.17	40.22	45.25	50.35	60.44	70.72	80.98	91.20
%Error	-0.07	0.18	0.43	0.47	0.54	0.54	0.70	0.72	1.02	1.23	1.33

Ttrig (sec)	100	110	120	130	140	150	160	170	180	210	240
Time (sec)	101.25	111.49	121.50	131.84	141.96	152.12	162.49	172.60	182.81	213.25	243.63
%Error	1.25	1.35	1.25	1.42	1.40	1.41	1.55	1.53	1.56	1.55	1.51



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดต่อเวลาที่ตั้งค่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 การทดสอบการตั้งค่าแรงดันสูงกระแสตรง

การทดสอบทำการต่อวงจรดังรูปที่ 4.11 ทำการตั้งค่าแรงดันอัดประจุที่ต้องการโดยตั้งค่าต่ำกว่า 50กิโลโวลต์เพื่อป้องกันไดโอดแรงสูงทำงานเกินพิกัด ตั้งการส่งสัญญาณลั่นไกแบบไม่อัตโนมัติ และดูค่าแรงดันที่วัดด้านแรงดันสูง ค่าเฉลี่ยของแรงดันแรงสูงกระแสตรงและค่าความคลาดเคลื่อนแสดงดังตารางที่ 4.6 (ข้อมูลการวัดค่าแรงดันแต่ละครั้งแสดงที่ตาราง ก.2)

กำหนดให้ Vset คือ แรงดันอัดประจุที่ตั้ง

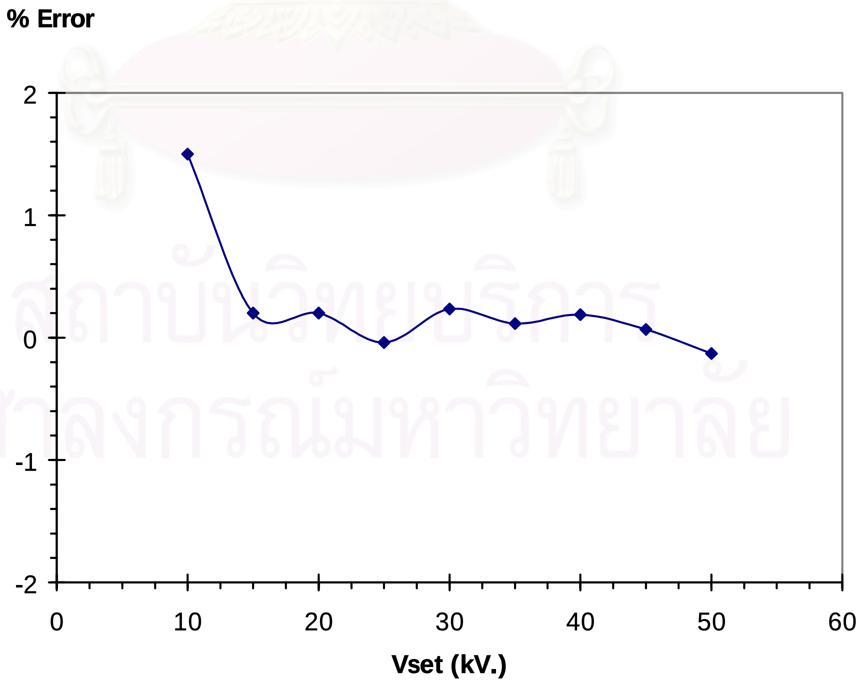
Vchg คือ แรงดันอัดประจุที่วัดได้

%Error คือ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด

$$\%\text{Error} = \frac{\text{Vchg} - \text{Vset}}{\text{Vset}} \text{x}100$$

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดค่าแรงดันสูงกระแสตรง

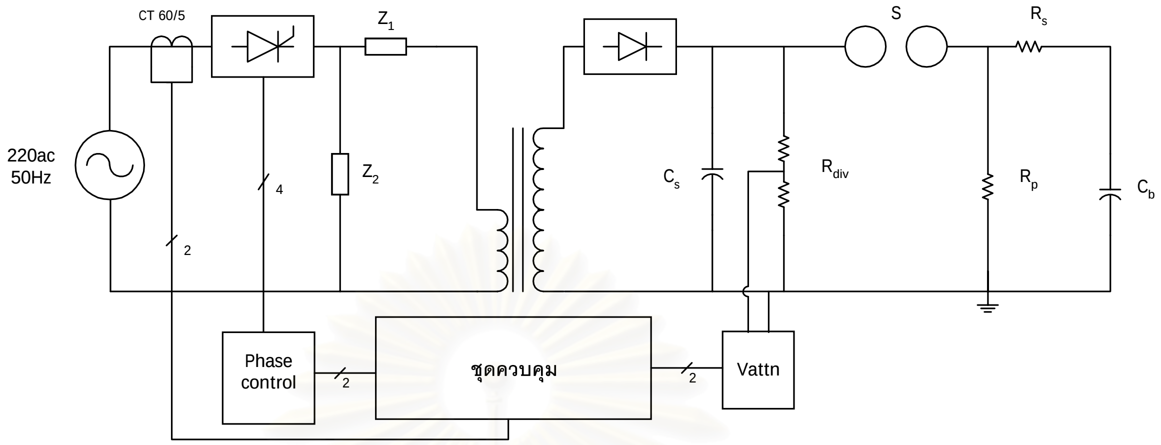
Vset (kV.)	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Vchg (kV.)	10.15	15.03	20.04	24.99	30.07	35.04	40.08	45.03	49.94
%Error	1.50	0.20	0.20	-0.04	0.23	0.11	0.19	0.07	-0.13



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดต่อแรงดันที่ตั้ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.3 การทดสอบสร้างแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 4.14 วงจรทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 μs

อุปกรณ์ที่ใช้

TR	คือ หม้อแปลงทดสอบ 220V/100kV 5kVA
C_s	คือ ตัวเก็บประจุ ขนาด 49.5nF 100kV
CT	คือ หม้อแปลงกระแสแบบคล้อง อัตราส่วน 60/5A
R_{div}	คือ โวลต์เตจดิไวเดอร์ อัตราส่วน 1:1024
Vattn	คือ ชุดลดทอนแรงดัน อัตราส่วน 1:21.5
Z_1	คือ อิมพิแดนซ์ควบคุมกระแสอัดประจุ
Z_2	คือ ดีแมกนิไตซิ่งอิมพิแดนซ์
S	คือ สปาร์กแกป
R_s	คือ ความต้านทานหน่วง ขนาด 200 Ω
R_p	คือ ความต้านทานคายประจุ ขนาด 1.2 kΩ
C_b	คือ ตัวเก็บประจุโหลดขนาด 2.072 nF

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.15 การทดสอบสร้างแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 μs

การทดสอบทำโดยต่อวงจรดังรูปที่ 4.14 เพื่อสร้างแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 μs และป้อนแรงดันอัดประจุที่ 35กิโลโวลต์เนื่องจากที่ระดับแรงดันสูงกว่า 35กิโลโวลต์อาจเกิดการเบรกดาวน์ของสปาร์กแกปก่อนถึงแรงดันที่ตั้งไว้ และทำการส่งสัญญาณลั่นไก โดยทำการทดสอบจำนวน 50 ครั้ง ผลการทดสอบปรากฏว่าเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุที่ได้ออกแบบและสร้างสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

1. เครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 89c51 มีหน่วยความจำภายในขนาด 64 กิโลไบต์ การพัฒนาชุดคำสั่งควบคุมทำการพัฒนาบนโครงสร้างภาษา C และด้วยคุณสมบัติของชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถล้างและอัดโปรแกรมได้โดยไม่ต้องถอดตัวไมโครคอนโทรเลอร์ออกจากชุดควบคุมเพียงใช้สายต่อเชื่อมจากพอร์ทอนุกรมตามมาตรฐาน RS232 ต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับชุดไมโครคอนโทรเลอร์ทำให้สะดวกต่อการแก้ไขดัดแปลงขั้นตอนการทำงาน ส่วนประกอบต่างๆของชุดควบคุมจะต้องบรรจุในกล่องโลหะและการต่อระหว่างส่วนต่างๆต้องต่อผ่านสายชีลด์

2. เครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุสามารถนำไปช่วยผู้ปฏิบัติงานควบคุมการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ และผู้ใช้สามารถหยุดการทำงานกระทันหันในกรณีฉุกเฉินได้ หรือในกรณีที่ไม่สามารถเพิ่มแรงดันอัดประจุ เกิดกระแสเกิน หรือ เกิดการเบรกดาวน์ของช่องว่างอากาศโดยไม่ได้รับคำสั่งลั่นไก เครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุจะหยุดและแจ้งให้ผู้ปฏิบัติงานทราบ

3. เครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุสามารถใช้ในงานศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง และใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาสู่อุตสาหกรรม

4. การทดสอบวงจรควบคุมมุมเฟสและการทดสอบการตั้งค่าแรงดันสูงกระแสตรง ทำการทดสอบที่ระดับแรงดันต่ำกว่า50กิโลโวลต์เพื่อป้องไดโอดแรงสูงของวงจรสร้างแรงดันสูงกระแสตรงเสียหายเนื่องจากทำงานเกินพิกัด

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. การสลับขั้วแรงดันสำหรับการทดสอบยังต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานในการสลับขั้วของไดโอดเรียงกระแสด้านแรงดันสูง

2. การตรวจสอบสภาวะการเกิดเบรกดาวน์ของช่องว่างอากาศโดยไม่ตั้งใจทำโดยใช้ซอพต์แวร์ตรวจสอบซึ่งยังมีการผิดพลาดบ้างเป็นบางครั้ง

3. เครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุยังไม่สามารถตั้งการควบคุมอัตราการเพิ่มแรงดันต่อเวลาให้ได้ตามที่ผู้ปฏิบัติงานต้องการ

4. ที่การตั้งระดับแรงดันอัดประจุที่ต่ำกว่า 10 กิโลโวลต์ ค่าความผิดพลาดของแรงดันอัดประจุจากตารางที่ ก.2 พบว่าการควบคุมแรงดันอัดประจุของชุดควบคุมบางครั้งมีค่าความผิดพลาดมากกว่า 5% ซึ่งอาจเป็นผลมาจากชุดแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกที่ใช้สร้างแรงดันอ้างอิงมีความละเอียดเพียง 256บิท อาจไม่เพียงพอ (จากการทดสอบพบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอัดประจุด้านแรงสูงต่อสัญญาณอ้างอิงคือ 1 กิโลโวลต์ ต่อ1บิท)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] IEC 60-1. **High-voltage test techniques.** International Electrotechnial Commission,1989.

[2] จิระชัย ทองทิพยา และ ธรรมศักดิ์ แจ่มศรี. **เครื่องควบคุมแรงดันเข้าวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ด้วยไทริสเตอร์**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.

[3] สำรวย สังข์สะอาด. **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.

[4] Dewan S.B., Straughen A. **Power Semiconductor Circuits.** John Wiley&Sons, 1975.

[5] Siemens. **Phase control IC TCA785.** Siemens Semiconductor Group, 1994.

[6] ศุลี บรรจงจิตร. **หลักการและเทคนิคการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง : ฉบับปรับปรุงและเพิ่มเติม**. ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2533.

[7] R.K. Sugandhi and K.K. Sugandhi. **Thyristors : theory and applications.** Wiley, 1984.

[8] Semikron. **Semikron Power Electronic.** Semikron International,1998.

[9] สำรวย สังข์สะอาด และ ปริพนธ์ พัฒนสัตยวงศ์. **รายงานผลการวิจัยออกแบบหม้อแปลงทดสอบแบบขั้นบันได 200kV 10kVA.** คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.

[10] บริษัท อีทีที จำกัด. **คู่มือการใช้ CP-AT2 Plus.** บริษัท อีทีที จำกัด, 2544.

[11] Maxim. **True RMS-to-DC Converters.** Maxim Integrated Products, 1998.

[12] Keil Software. **C51 Complier Optimizing 8051 C Complier and Library Reference.** Keil Software, 1997.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบจับเวลาสัญญาณลั่นไก

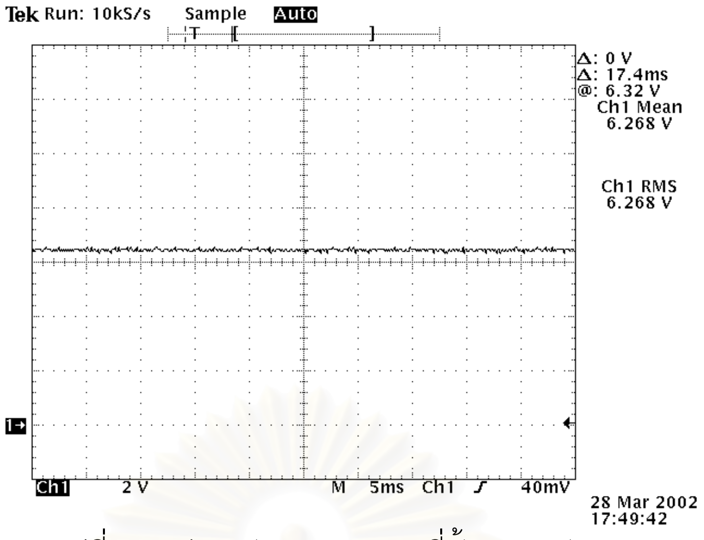
ทดสอบ ครั้งที่	Ttrig (sec)										
	21	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90
1	21.3	24.7	30.3	35.1	40.3	45	50.5	60.3	70.4	81.2	91.1
2	20.9	24.9	30.2	35.2	40.4	45.2	50.2	60.4	70.9	81.1	91.1
3	20.7	25	30	35.1	40.2	45.3	50.3	60.3	70.5	80.9	91.3
4	20.9	24.8	30.2	35.2	40.3	45.2	50.4	60.4	70.6	81.2	91.2
5	21	25	30.4	35.2	40.4	45.3	50.4	60.5	70.6	81.1	91.3
6	21.1	25.1	30.2	35.2	40.2	45.2	50.3	60.6	70.7	80.7	91.5
7	21.2	24.9	30.2	35.1	40	45.3	50.4	60.3	70.6	80.9	90.9
8	21.2	25.1	30.2	35.2	40.2	45.2	50.4	60.4	70.6	81	91.1
9	21.2	25.1	30.2	35.3	40.2	45.3	50.3	60.7	70.7	80.9	91.2
10	20.9	25.2	30.2	35.2	40.1	45.2	50.4	60.5	70.8	81	91.4
11	21	25.1	30.1	35.1	40.3	45.3	50.4	60.4	70.8	80.9	90.7
12	21	25.3	30.1	35	40.2	45.2	50.4	60.3	70.7	80.9	91
13	20.9	25.1	30.2	35.2	40.1	45.4	50.3	60.4	70.8	81	91.2
14	21	25	29.9	35.1	40.4	45.3	50.5	60.5	70.7	80.9	91.3
15	20.8	24.9	30.1	35.2	40.3	45.2	50.4	60.4	70.8	81	91.4
16	20.8	25.1	30.2	35.3	40.2	45.3	50.3	60.4	70.7	80.9	91.3
17	21.1	25.2	29.9	35.1	40	45.2	50.2	60.5	70.9	80.9	91.2
18	21.1	25.1	29.9	35.2	40.2	45.2	50.1	60.4	70.8	81.1	91.4
19	20.9	25.2	30.1	35.2	40.1	45.3	50.4	60.5	70.9	80.9	91.4
20	20.7	25.1	30	35.1	40.2	45.3	50.4	60.5	70.8	81.1	91
เฉลี่ย	20.985	25.045	30.13	35.165	40.215	45.245	50.35	60.435	70.715	80.98	91.2

ตารางที่ ก.1(ต่อ)

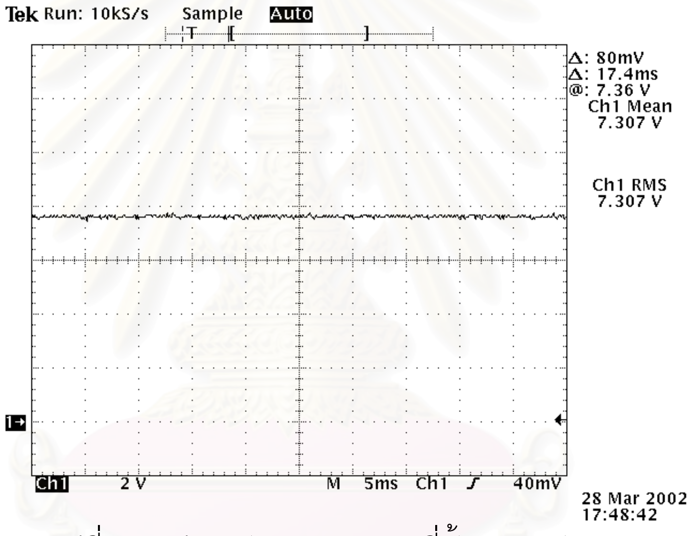
ทดสอบ ครั้งที่	Ttrig (sec)										
	100	110	120	130	140	150	160	170	180	210	240
1	101	111.4	121.5	131.9	142	152.3	162.4	172.6	183	213	243.7
2	101.3	111.4	121.6	131.8	141.9	152	162.5	172.6	182.5	213.3	243.8
3	101.2	111.4	121.3	131.7	142.1	151.9	162.2	172.5	182.7	213.3	243.5
4	101.1	111.6	121.6	131.8	141.8	152.2	162.3	172.9	182.6	213.2	243.6
5	100.9	111.6	121.5	131.9	141.9	152.1	162.5	172.4	182.6	213.5	243.5
6	101	111.5	121.7	131.7	141.9	151.9	162.6	172.5	183	213.2	243.5
7	101.3	111.6	121.3	131.7	142	151.9	162.2	172.8	183.2	213.5	243.6
8	101.4	111.2	121.5	132	141.8	152.3	162.4	172.6	182.6	213	243.8
9	101.6	111.6	121.5	131.9	141.9	152.4	162.6	172.9	183.1	212.9	243.4
10	101.1	111.5	121.6	131.8	141.8	151.8	162.7	172.5	182.7	213.4	243.5
11	101.3	111.7	121.3	131.8	141.9	152	162.3	172.4	182.8	213.5	243.8
12	101.3	111.3	121.5	132	141.8	152.3	162.7	172.6	182.9	213.2	243.6
13	101.3	111.4	121.4	131.9	142	152.1	162.5	172.9	183	213.3	243.5
14	101.4	111.5	121.5	131.9	142.3	152.2	162.6	172.5	182.7	213.2	243.6
15	101.3	111.6	121.6	131.7	141.8	152.2	162.4	172.4	182.7	213.4	243.5
16	101.5	111.5	121.5	132	141.9	152.1	162.7	172.8	182.6	213.2	243.8
17	101.2	111.4	121.5	131.7	142.2	151.9	162.6	172.5	182.8	213.3	243.6
18	101	111.4	121.4	131.9	142.3	152	162.5	172.6	182.9	212.9	243.5
19	101.4	111.5	121.6	131.8	142	152.4	162.4	172.4	183	213.4	243.8
20	101.4	111.6	121.5	131.9	141.8	152.3	162.6	172.5	182.8	213.3	243.9
เฉลี่ย	101.25	111.49	121.50	131.84	141.96	152.12	162.49	172.60	182.81	213.25	243.63

ตารางที่ ก.2 ผลการวัดแรงดันอัดประจุ

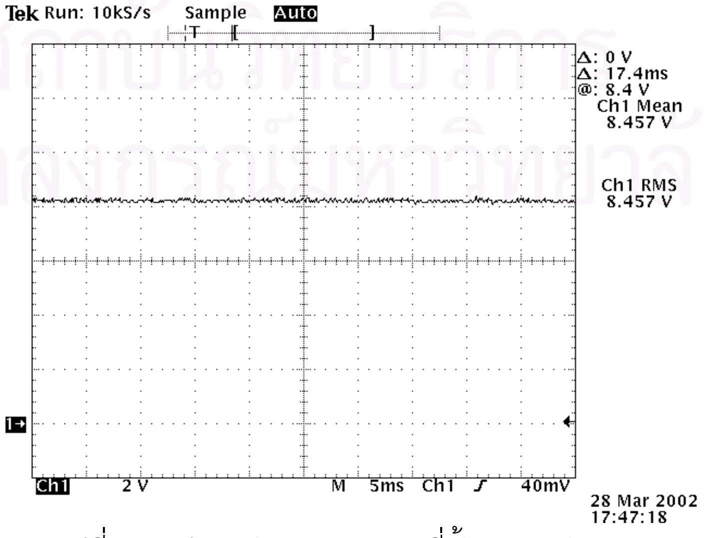
ทดสอบ ครั้งที่	Vset (kV.)												
	6	7	8	9	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	5.9	6.4	7.8	8.7	10.1	14.9	20.2	25.4	30.2	35.3	40.1	45.6	50.4
2	5.8	7.2	8.6	8.8	10.1	15.1	19.9	25.2	30.2	35.2	39.9	44.7	49.5
3	6.2	7.5	7.8	9.2	10.6	15.2	20	25	30.4	35.1	40.3	45.1	49.8
4	6.6	7.1	8.8	9.5	9.9	15	20.3	25	29.5	35.1	40.2	45.6	49.6
5	6.4	7.4	7.4	9.1	10.4	14.8	20.5	24.9	30	35.1	39.8	45	49.8
6	5.8	6.5	7.4	8.6	10.4	15.1	20.2	24.9	30.3	35.1	39.7	45.6	49.5
7	6.1	6.6	8.7	8.8	10.2	14.8	19.5	25.1	30.2	35.1	39.8	44.8	49.8
8	5.8	7.1	8	9.5	10.9	14.7	19.5	24.4	30.1	35.2	40	44.8	49.5
9	6.1	6.7	8.2	8.6	10.1	15.1	19.9	24.7	30	35	40.3	45.2	50.5
10	6.6	7.1	8.2	8.8	10.2	15.2	20	24.8	29.7	35.1	39.9	45.4	50.4
11	6.1	7.2	7.7	9.1	9.6	14.8	20.1	25	30	34.9	40	45.5	49.5
12	6	7.6	8.8	8.9	9.5	14.9	20.3	25.5	30.1	34.8	39.9	45.5	49.7
13	5.7	7.3	8.5	8.8	10.3	15.4	19.8	25.2	30.1	35.1	39.9	45	50.1
14	5.2	6.8	8.5	8.7	10.3	15.2	19.9	25.1	30	35	40.2	44.8	49.9
15	6.3	6.9	8.2	8.8	10.3	15.3	19.5	24.9	30.1	34.8	40.2	44.7	49.7
16	5.8	6.7	8.6	9	9.7	15	20.4	25	30.1	35.3	40.1	44.6	49.9
17	6.1	6.8	7.3	9.2	10.4	14.9	19.5	25.1	30.2	34.9	40.3	44.7	50.2
18	5.8	6.3	7.6	9.2	10.3	14.8	20	24.7	30.1	35.4	40.2	44.6	50.4
19	5.7	7.1	7.4	8.4	9.4	15.8	20.6	24.9	30	34.7	40.2	44.7	50.2
20	5.5	6.6	8.8	9	10.3	14.6	20.7	25	30.1	34.6	40.5	44.7	50.3
เฉลี่ย	5.975	6.945	8.115	8.935	10.15	15.03	20.04	24.99	30.07	35.04	40.08	45.03	49.94



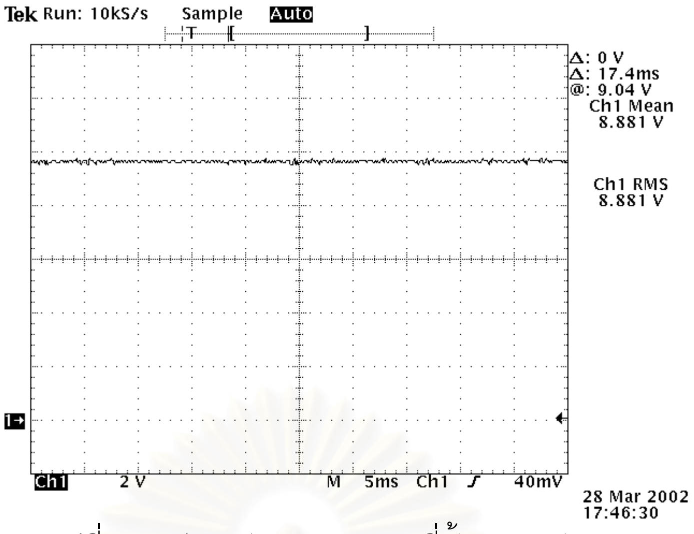
รูปที่ ก.1 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 6kV.



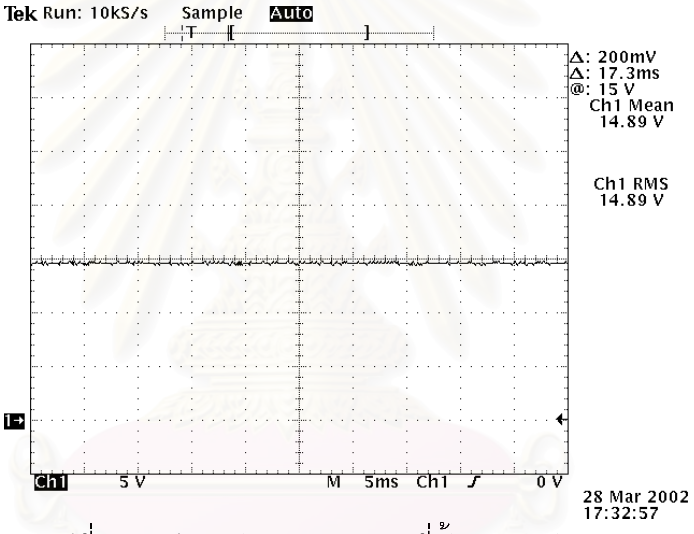
รูปที่ ก.2 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 7kV.



รูปที่ ก.3 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 8kV.

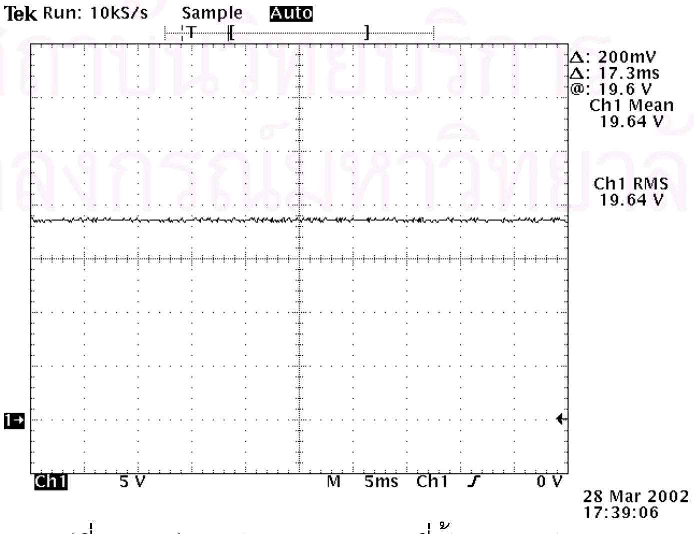


รูปที่ ก.4 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 9kV.

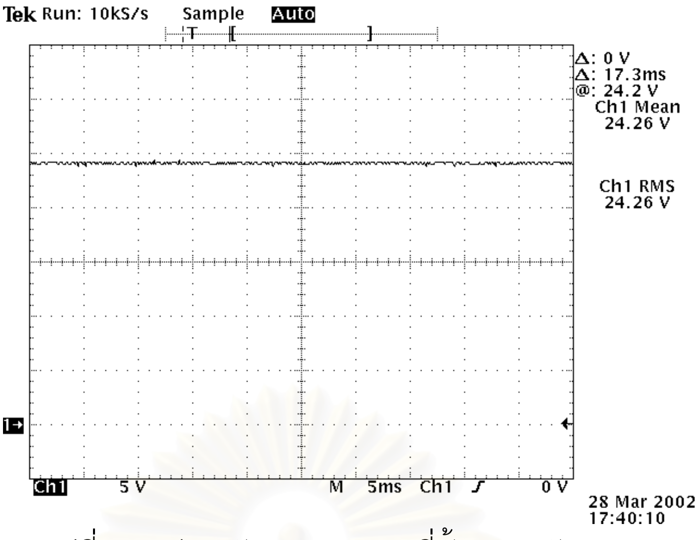


รูปที่ ก.5 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 15kV.

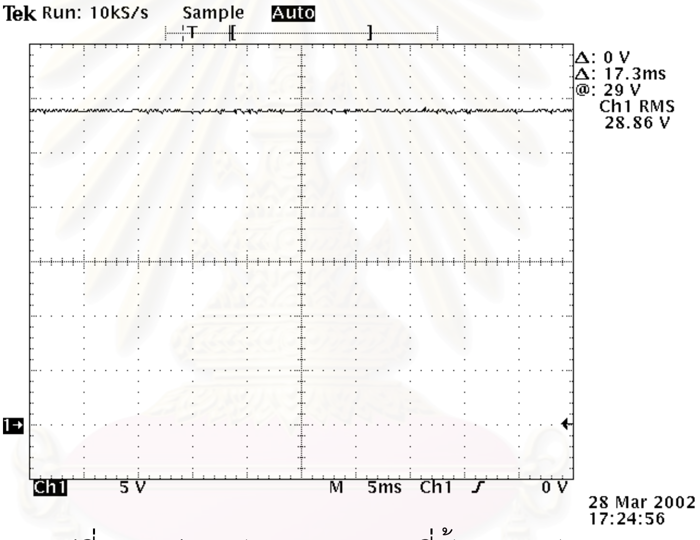
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.6 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 20kV.

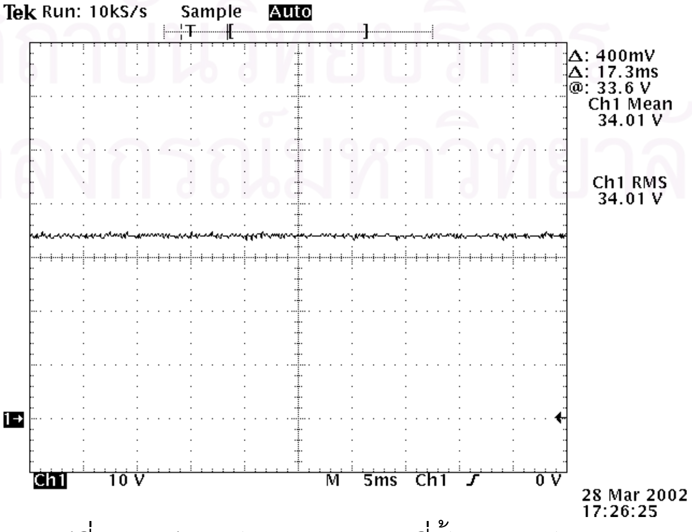


รูปที่ ก.7 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 25kV.

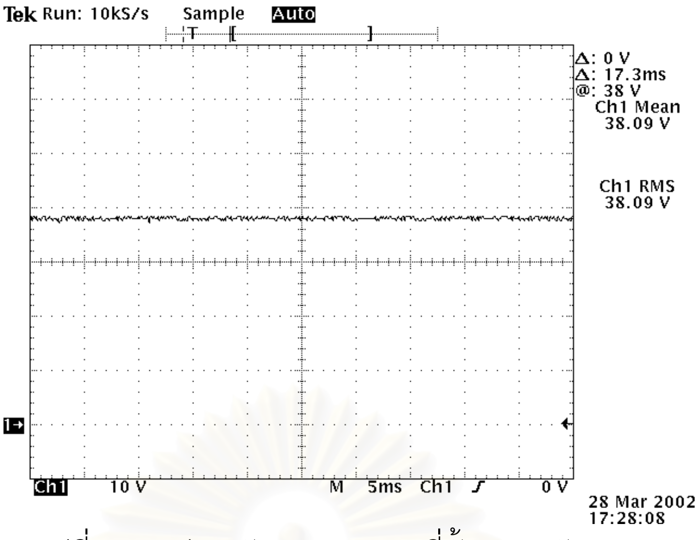


รูปที่ ก.8 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 30kV.

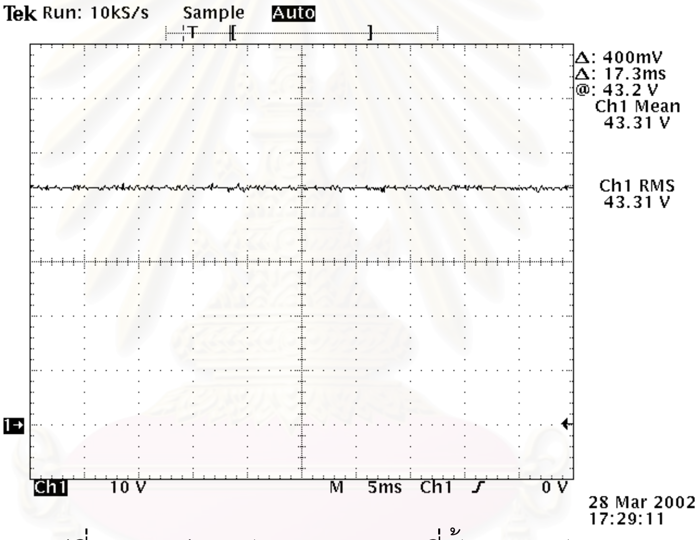
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



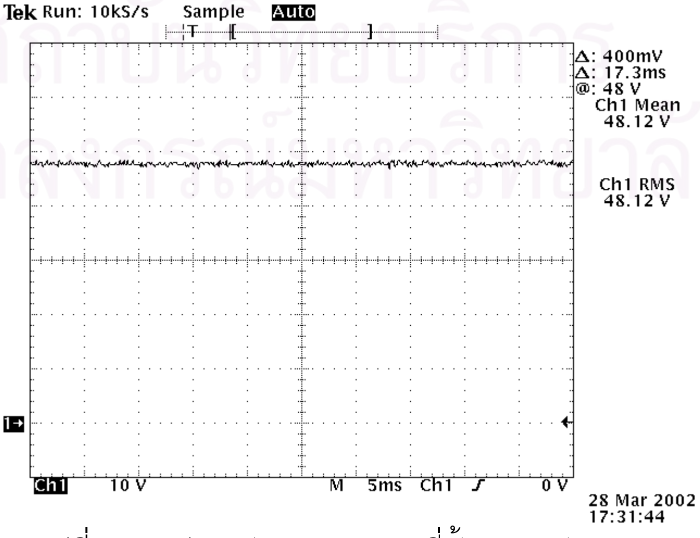
รูปที่ ก.9 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 35kV.



รูปที่ ก.10 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 40kV.



รูปที่ ก.11 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 45kV.



รูปที่ ก.12 รูปแรงดันสูงกระแสตรงที่ตั้งค่าแรงดัน 50kV.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

คุณลักษณะของไทริสเตอร์ Semikron SKKT 72/08D

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

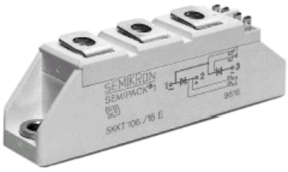
SEMIKRON

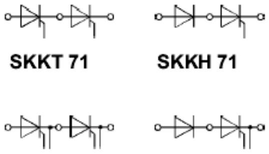
V_{RSM}	V_{RRM} V_{DRM}	$(dv/dt)_{cr}$	I_{TRMS} (maximum value for continuous operation) 125 A			
			I_{TAV} (sin. 180; T_{case} = 78 °C) 80 A			
V	V	V/µs				
700	600	500	**SKKT 71/06 D**	–	–	**SKKH 72/06 D**
900	800	500	**SKKT 71/08 D**	**SKKT 72/08 D**[1]	**SKKH 71/08 D**	**SKKH 72/08 D**
1300	1200	1000	**SKKT 71/12 E**	**SKKT 72/12 E**[1]	**SKKH 71/12 E**	**SKKH 72/12 E**
1500	1400	1000	**SKKT 71/14 E**	**SKKT 72/14 E**[1]	**SKKH 71/14 E**	**SKKH 72/14 E**
1700	1600	1000	**SKKT 71/16 E**	**SKKT 72/16 E**[1]	**SKKH 71/16 E**	**SKKH 72/16 E**
1900	1800	1000	**SKKT 71/18 E**	**SKKT 72/18 E**[1]	**SKKH 71/18 E**	**SKKH 72/18 E**
2100	2000	1000	–	**SKKT 72/20 E**	–	**SKKH 72/20 E**
2300	2200	1000	–	**SKKT 72/22 E**	–	**SKKH 72/22 E**

Symbol	**Conditions**	**SKKT 71 SKKH 71**	**SKKT 72 SKKT 72B SKKH 72**	**Units**
I_{TAV}	sin. 180; T_{case} = 78 °C	80		A
	T_{case} = 85 °C	70		A
I_D	B2/B6 T_{amb} = 45 °C; P 3/180	62 / 75		A
	T_{amb} = 35 °C; P 3/180 F	115 / 145		A
I_{RMS}	W1/W3 T_{amb} = 45 °C; P 3/180 F	155 / 3 x 115		A
I_{TSM}	T_{vj} = 25 °C; 10 ms	1 600		A
	T_{vj} = 125 °C; 10 ms	1 450		A
i^2t	T_{vj} = 25 °C; 8,3 ... 10 ms	13 000		A^2s
	T_{vj} = 125 °C; 8,3 ... 10 ms	10 500		A^2s
t_{gd}	T_{vj} = 25 °C; I_G = 1 A			
	di_G/dt = 1 A/µs	1		µs
t_{gr}	$V_D = 0{,}67 \cdot V_{DRM}$	1		µs
$(di/dt)_{cr}$	T_{vj} = 125 °C	150		A/µs
t_q	T_{vj} = 125 °C	typ. 80		µs
I_H	T_{vj} = 25 °C; typ./max.	150 / 250		mA
I_L	T_{vj} = 25 °C; R_G = 32 Ω; typ./max.	300 / 600		mA
V_T	T_{vj} = 25 °C; I_T = 300A	max. 1,9		V
$V_{T(TO)}$	T_{vj} = 125 °C	0,9		V
r_T	T_{vj} = 125 °C	3,5		mΩ
I_{DD}; I_{RD}	T_{vj} = 125 °C; $V_{RD} = V_{RRM}$			
	$V_{DD} = V_{DRM}$	max. 20[3]		mA
V_{GT}	T_{vj} = 25 °C; d.c.	3		V
I_{GT}	T_{vj} = 25 °C; d.c.	150		mA
V_{GD}	T_{vj} = 125 °C; d.c.	0,25		V
I_{GD}	T_{vj} = 125 °C; d.c.	6		mA
R_{thjc}	cont. } per thyristor / per module	0,35 / 0,18		°C/W
	sin. 180	0,37 / 0,19		°C/W
	rec. 120	0,39 / 0,20		°C/W
R_{thch}		0,2 / 0,1		°C/W
T_{vj}		– 40 ... + 125		°C
T_{stg}		– 40 ... + 125		°C
V_{isol}	a. c. 50 Hz; r.m.s; 1 s/1 min	3600 / 3000		V~
M_1	to heatsink } SI (US) units	5 (44 lb. in.) ± 15 %[2]		Nm
M_2	to terminals	3 (26 lb. in.) ± 15 %		Nm
a		$5 \cdot 9{,}81$		m/s^2
w	approx.	120		g
Case	→ page B 1 – 95	SKKT 71: A 5; SKKH 71: A 6	SKKT 72: A 46; SKKT 72B: A 48; SKKH 72: A 47	

SEMIPACK® 1
Thyristor / Diode Modules

SKKT 71 **SKKH 71**
SKKT 72 **SKKH 72**
SKKT 72B





SKKT 71 **SKKH 71**

SKKT 72 **SKKH 72**
SKKT 72B

Features

- Heat transfer through aluminium oxide ceramic isolated metal baseplate
- Hard soldered joints for high reliability
- UL recognized, file no. E 63 532

Typical Applications

- DC motor control (e.g. for machine tools)
- AC motor soft starters
- Temperature control (e.g. for ovens, chemical processes)
- Professional light dimming (studios, theaters)

1) Also available in SKKT 72 B configuration (case A 48)
2) See the assembly instructions
3) /20 E, /22 E max. 30 mA

This technical information specifies semiconductor devices but promises no characteristics. No warranty or guarantee expressed or implied is made regarding delivery, performance or suitability.

I:\Marketin\FRAMEDAT\datb\B01-Semipack\SKKTH71-72-72B.fm

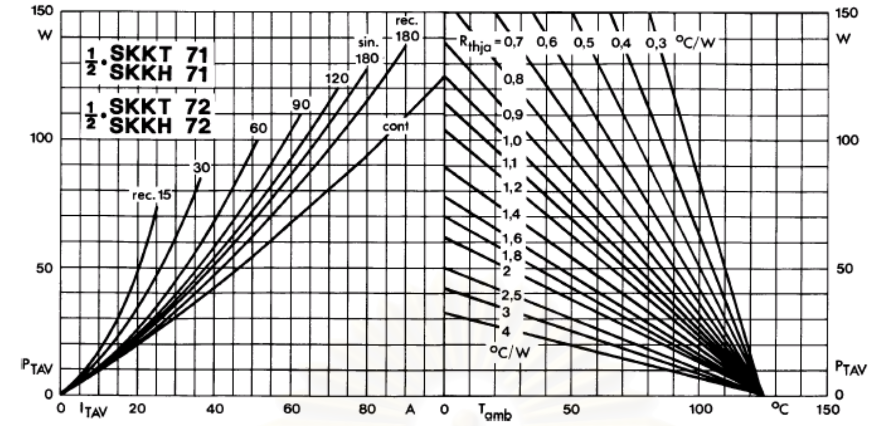


Fig. 1 Power dissipation per thyristor vs. on-state current and ambient temperature

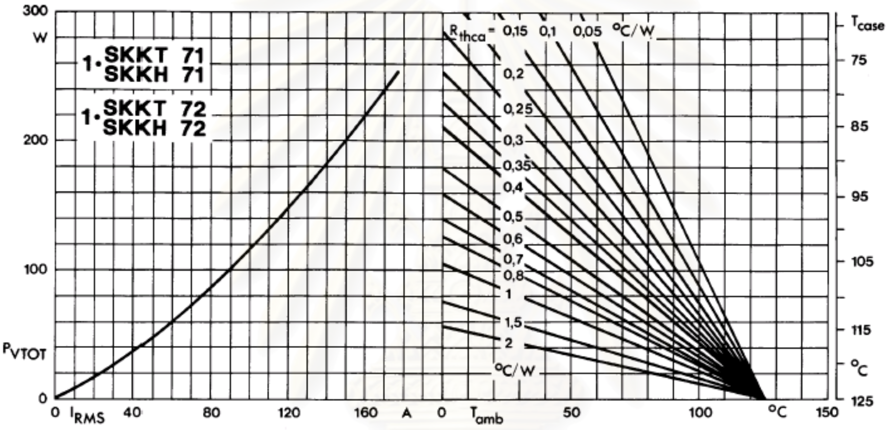


Fig. 2 Power dissipation per module vs. rms current and case temperature

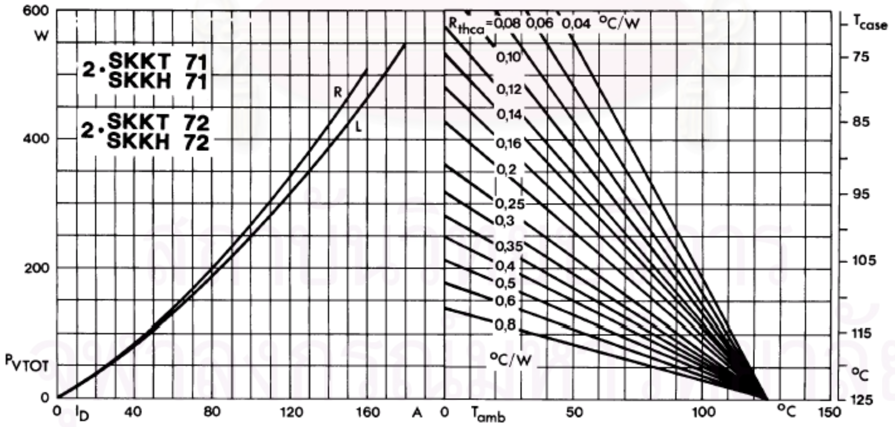


Fig. 3 Power dissipation of two modules vs. direct current and case temperature

© by SEMIKRON

SEMIKRON

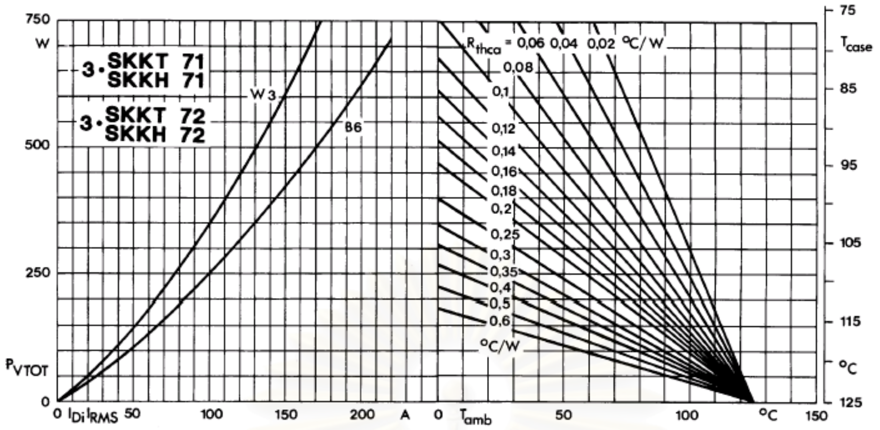


Fig. 4 Power dissipation of three modules vs. direct and rms current and case temperature

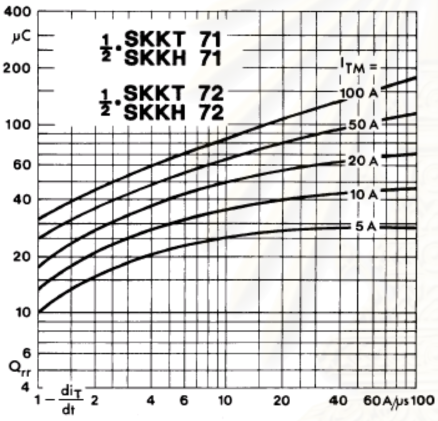


Fig. 5 Recovered charge vs. current decrease

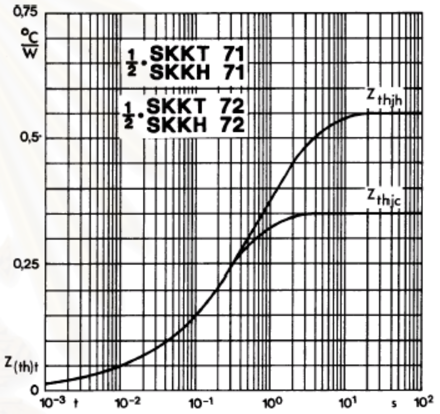


Fig. 6 Transient thermal impedance vs. time

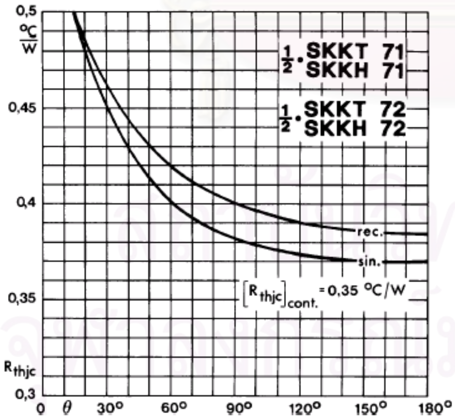


Fig. 7 Thermal resistance vs. conduction angle

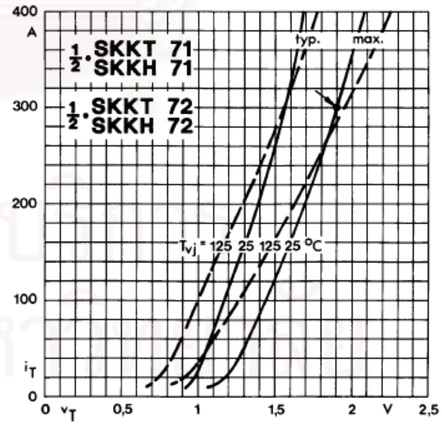


Fig. 8 On-state characteristics

I:\Marketin\FRAMEDAT\datbl\B01-Semipack\SKKTH71-72-72B.fm

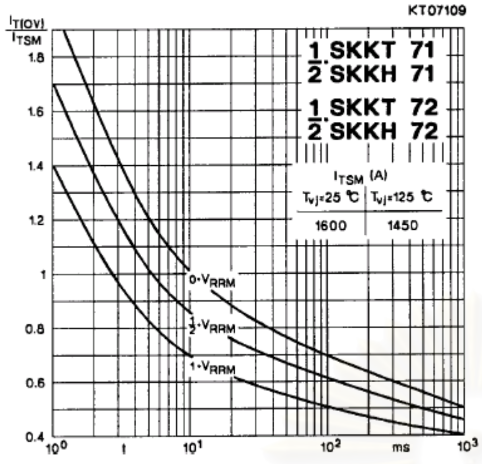


Fig. 9 Surge overload current vs. time

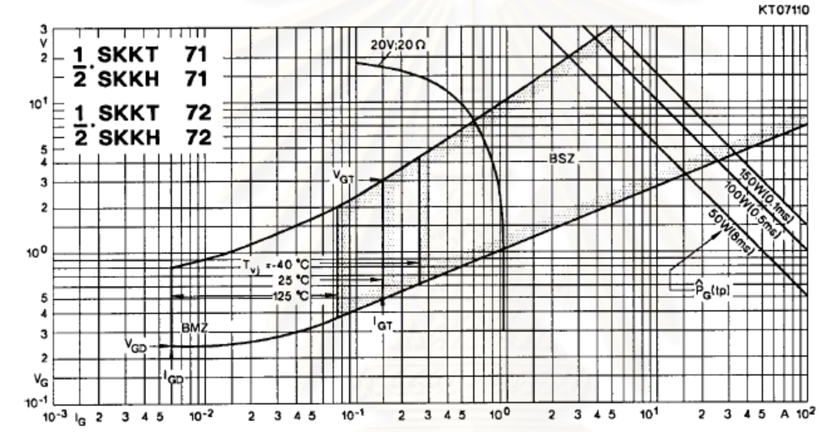


Fig. 10 Gate trigger characteristics

© by SEMIKRON
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SEMIKRON

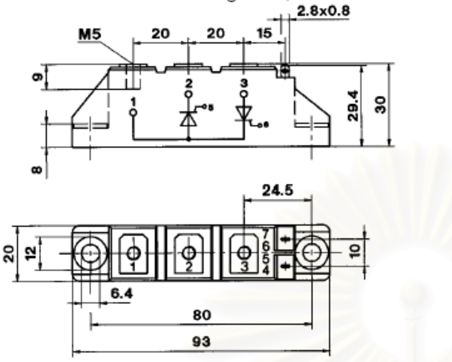
SKKT 19 . . . 105

Case A 5

IEC 192-2: A 77 A
JEDEC: TO-240 AA

SEMIPACK® 1

UL recognized, file no. E 63 532



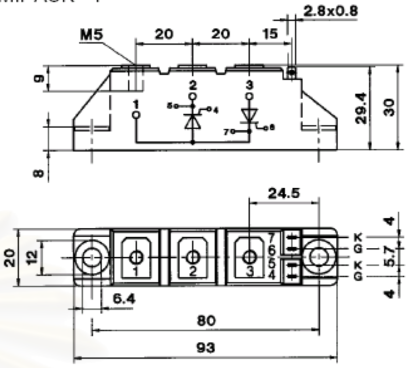
Dimensions in mm

SKKT 20/ . . . 106/

Case A 46

IEC 192-2: A 77 A
JEDEC: TO-240 AA

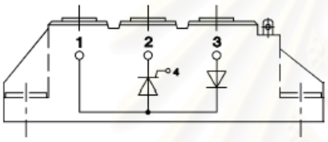
SEMIPACK® 1



Dimensions in mm

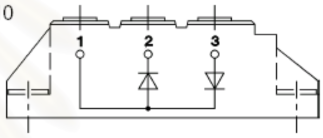
SKKH 26 . . . 105

Case A 6



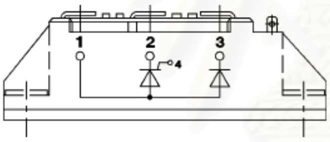
SKKD 26 . . . 100

Case A 10



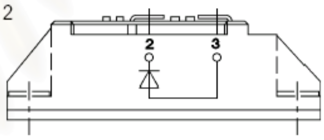
SKNH 56 . . . 91

Case A 7



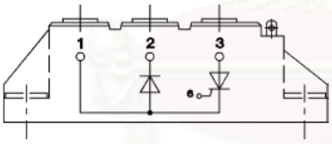
SKKE 81

Case A 12



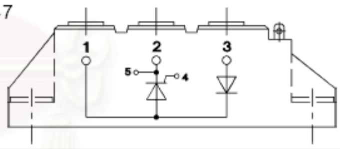
SKKL 56 . . . 105

Case A 9



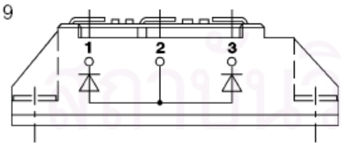
SKKH 27 . . . 106

Case A 47



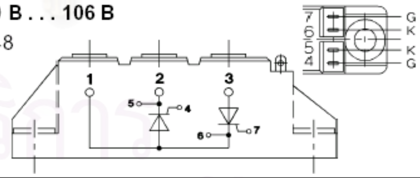
SKND 46 . . . 81

Case A 19



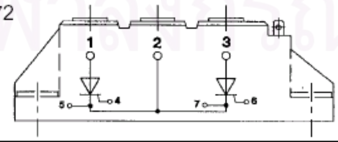
SKKT 20 B . . . 106 B

Case A 48



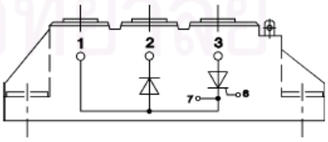
SKMT 92

Case A 72



SKKL 42 . . . 106

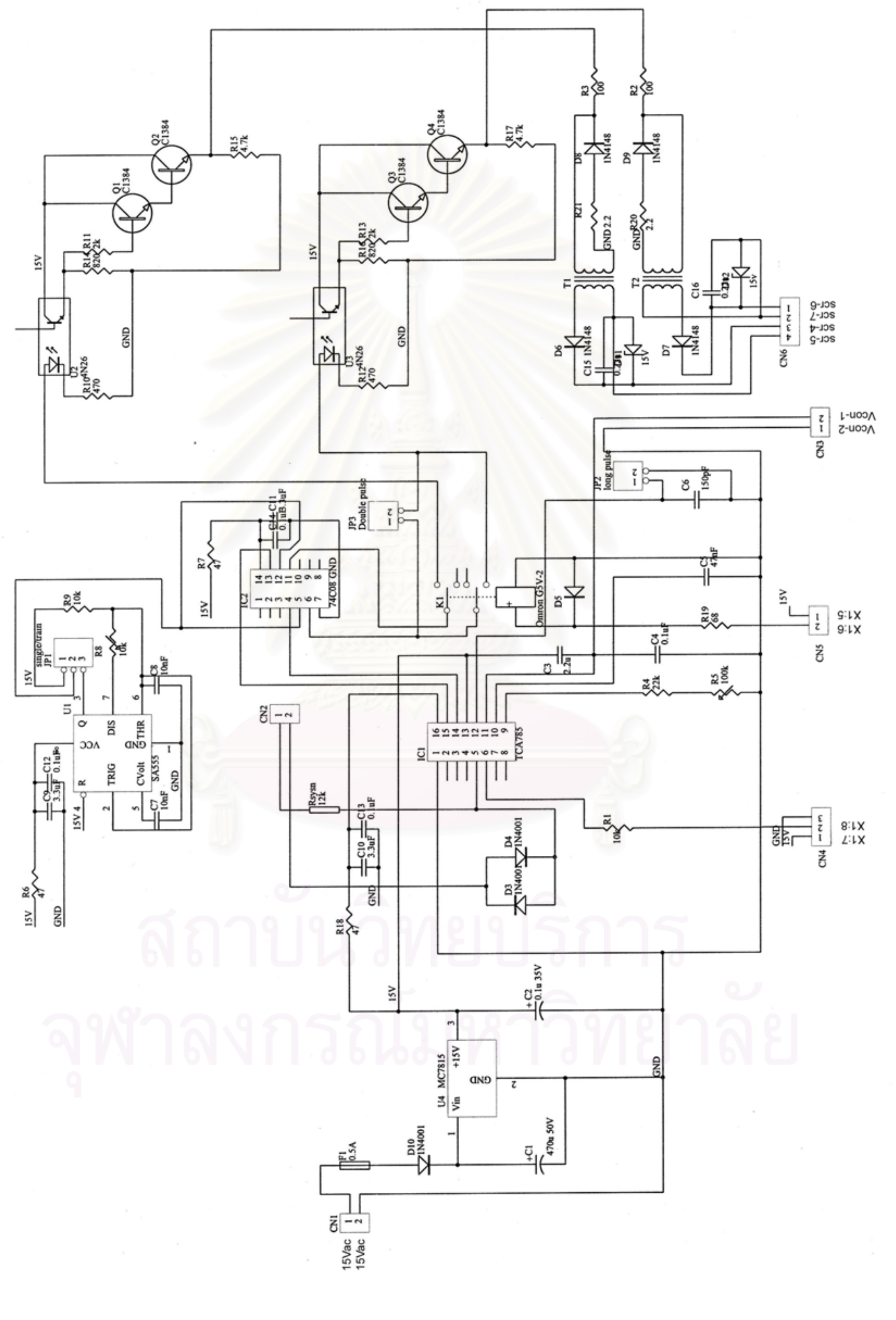
Case A 59



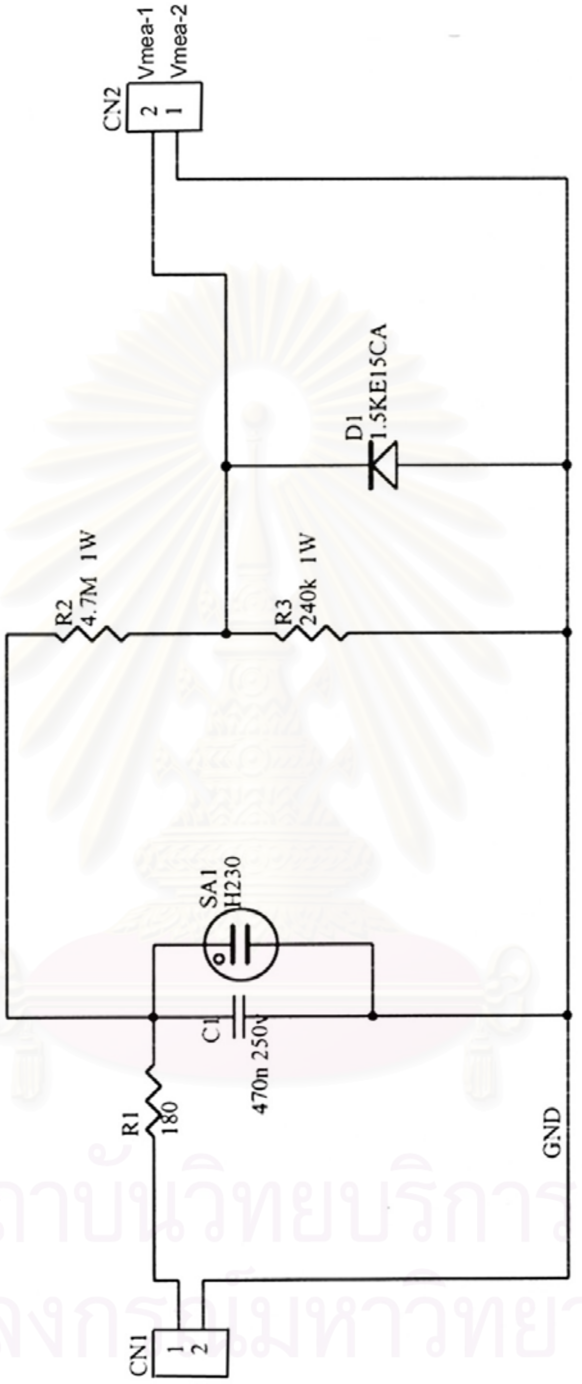
ภาคผนวก ค

วงจรควบคุมภายในเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุ

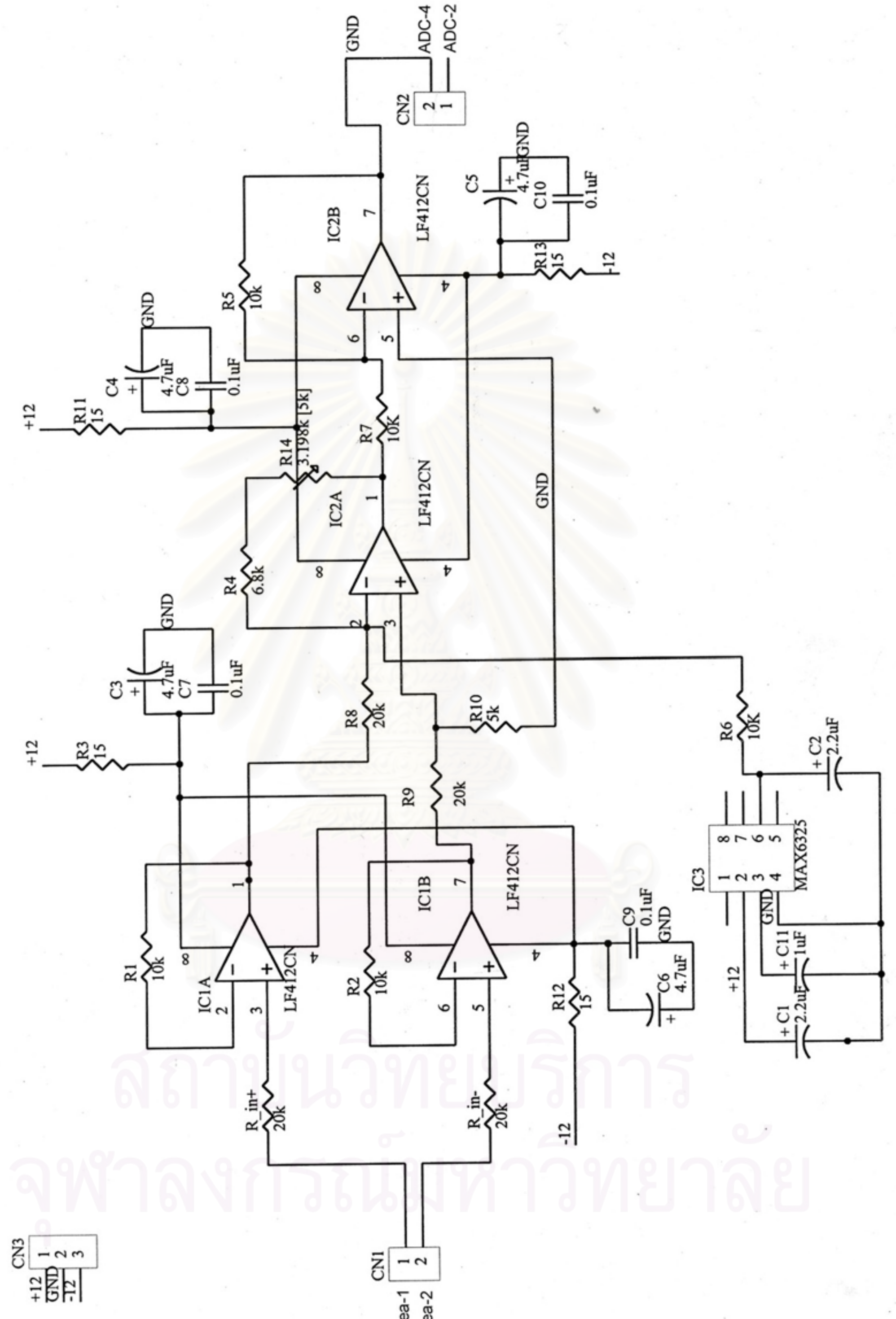
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

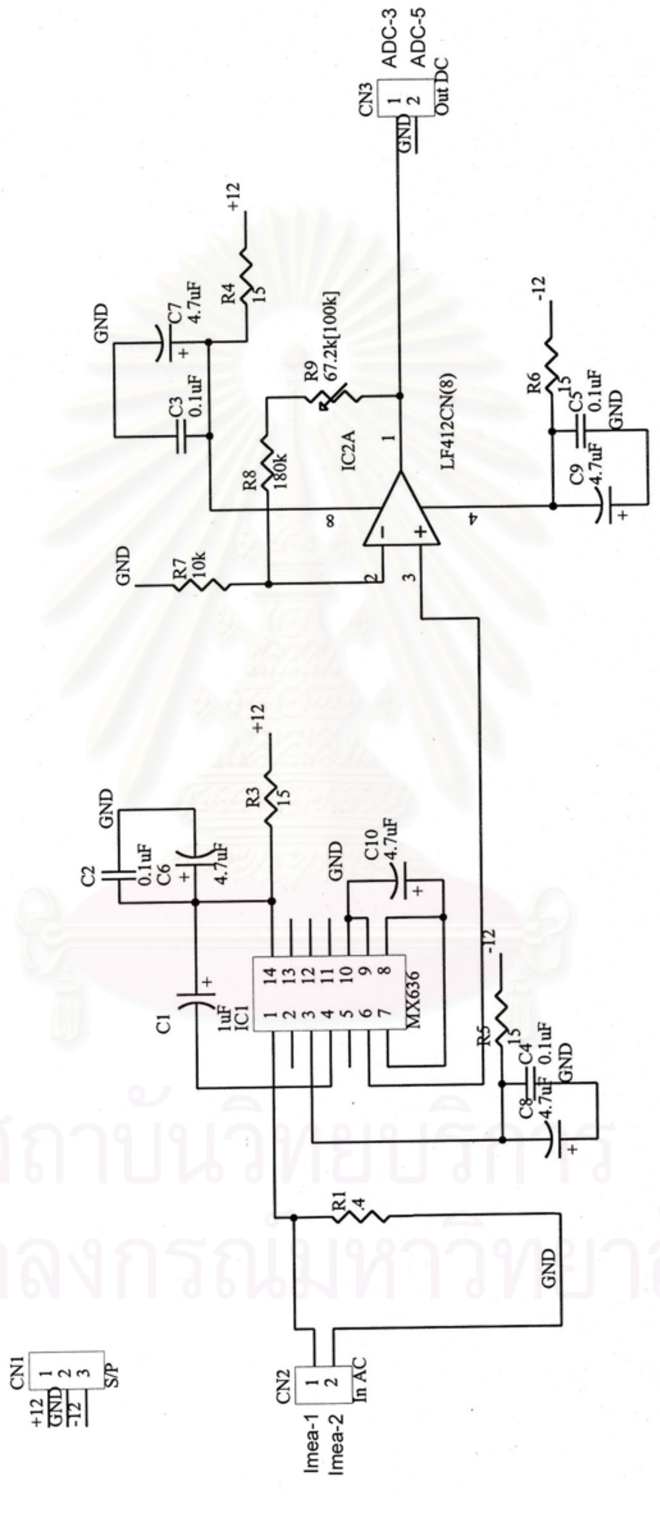


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

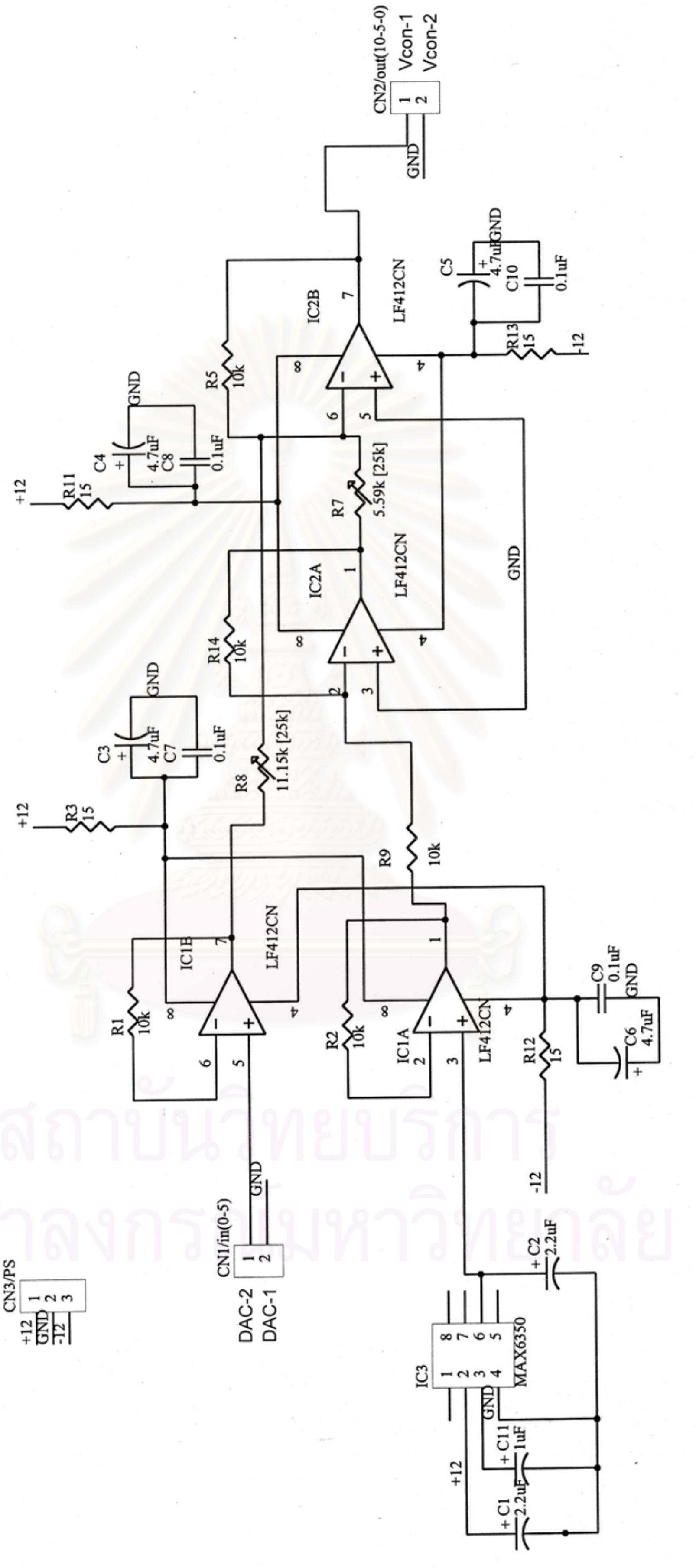


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


GND
ADC-4
ADC-2
CN2
IC2B
LF412CN
C5
4.7uF
C10
0.1uF
R13
15
-12
R5
10k
GND
C4
4.7uF
C8
0.1uF
+12
R11
15
R14
3.198k [5k]
R7
10k
IC2A
LF412CN
GND
R4
6.8k
GND
C3
4.7uF
C7
0.1uF
+12
R3
15
R8
20k
R10
5k
R6
10k
C2
2.2uF
R9
20k
IC1B
LF412CN
IC3
MAX6325
R1
10k
IC1A
LF412CN
R2
10k
C9
0.1uF
C6
4.7uF
R12
15
C11
1uF
C1
2.2uF
R_in+
20k
R_in-
20k
-12
CN3
+12
GND
-12
CN1
Vmea-1
Vmea-2



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Connection of control box terminal

EXT I/O-1	1	Relay_1_com
EXT I/O-3	2	Relay_1_no
EXT I/O-13	3	Relay_4_com
EXT I/O-15	4	Relay_4_no
EXT I/O-5	5	Relay_2_com
EXT I/O-7	6	Relay_2_no
EXT I/O-17	7	Relay_3_com
EXT I/O-19	8	Relay_3_no
EXT I/O-9	9	+5V
EXT I/O-11	10	Digit_4
Ground-2	11	Digit_3
Door-2	12	Digit_2
Emergency-2	13	Digit_1
Trigger-1	14	Relay_5_com
Trigger-2	15	Relay_5_no
Common	16	0V
	17	
Fuse(+5)-2	18	+5
Fuse(-12)-2	19	-12
Fuse(+12)-2	20	+12
	21	
	22	

Connection of power box terminal

12Vac	1	EXT I/O-1
K1a-1	2	EXT I/O-3
12Vac	3	EXT I/O-13
Horn_a-1	4	EXT I/O-15
Polar-1	5	EXT I/O-5
Polar-2	6	EXT I/O-7
Enable-1	7	EXT I/O-17
Enable-2	8	EXT I/O-19
TH-1	9	EXT I/O-9
TH-2	10	EXT I/O-11
	11	
	12	

ภาคผนวก ง

คู่มือการใช้งานเครื่อง

Technical data

Voltage input :	220 V 50 Hz
Voltage output :	0-220 Vac
Phase control angle :	90°-180°
Voltage setting ;	5-99.9 kV.
Time trigger setting :	21-240 sec
Thyristor :	800V 80A
Circuit breaker :	500V 63A 2P
Fuse :	63A 500V
Main contact :	22x3 A.
Thermal overload :	12x3 A.
Snubber circuit :	R=34 ohm
	C=0.22uF 400Vac
Current limiting resistor :	1 Ω
Demagnetizing resistor :	50 Ω

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>ขั้นตอนการใช้งานเครื่องควบคุม</u>

1. กดปุ่ม POWER เพื่อจ่ายไฟเลี้ยงวงจรควบคุม

2. หน้าจอเครื่องควบคุมบรรทัดแรกแสดง “Vset = +00.0 kV.”

3. ป้อน ขั้วและขนาดแรงดันอัดประจุที่ต้องการผ่านทางแป้นกดโดยขนาดของแรงดันอัดประจุต้องมากกว่า 5 kV. เมื่อได้ค่าแรงดันที่ต้องการให้กดปุ่ม Enter

4. หน้าจอเครื่องควบคุมบรรทัดแรกแสดงค่าแรงดันอัดประจุที่ตั้งค่าไว้ และบรรทัดที่สามแสดง “Auto trig Yes” เพื่อสอบถามการตั้งสัญญาณลั่นไกจะใช้ระบบอัตโนมัติหรือไม่ โดยสามารถเลือกได้โดยใช้ ปุ่ม +, -, < หรือ > เมื่อได้ตามที่ต้องการให้กดปุ่ม Enter เพื่อทำขั้นตอนถัดไป โดยถ้าเลือก “Auto trig Yes” จะทำขั้นตอนที่ 4.1 ถ้าเลือก “Auto trig No” จะทำขั้นตอนที่ 5.

```
Vset = +XX.X kV.


Auto trig Yes
```

4.1 ถ้าเลือกให้สัญญาณลั่นไกแบบอัตโนมัติ หน้าจอควบคุมบรรทัดที่สามแสดงการตั้งเวลาของสัญญาณลั่นไก “Ttrig= 000 sec” ให้ป้อนค่าเวลาที่ต้องการผ่านทางแป้นกด 0-9 โดยค่าเวลาที่ป้อนต้องมากกว่า 20 sec เมื่อได้ตามที่ต้องการให้กดปุ่ม Enter

5.หน้าจอเครื่องควบคุมบรรทัดแรกแสดงค่าแรงดันอัดประจุที่ตั้งไว้ บรรทัดที่สองแสดงค่าแรงดันอัดประจุด้านแรงดันสูง และบรรทัดที่สามแสดง “Start Charging No”

```
Vset = +XX.X kV.
Vchg = +XX.X kV.
   Start Charging No
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในกรณีที่ค่าที่ป้อนในขั้นตอนที่ 3 ถึง 4.1 มีการผิดพลาดเลือก “Start Charging No” และให้กดปุ่ม Enter ได้ที่ขั้นตอนนี้ เพื่อกลับไปทำขั้นตอนที่ 3 ในกรณีที่ค่าที่ป้อนในขั้นตอนที่ 3 ถึง 4.1 ถูกต้องตามต้องการ ให้เลือก “Start Charging Yes” โดยใช้ปุ่ม +, - , < หรือ > และกดปุ่ม Enter เพื่อยืนยัน

6. เครื่องควบคุมจะทำการตรวจสอบสถานะของวงจรความปลอดภัย คือ Emergency Stop , Overload relay , สวิตซ์ประตู และ สวิตซ์วางไม้กราวน์ ถ้าพร้อมทำงานเครื่องควบคุมจะทำงานขั้นตอนที่ 7 และถ้าไม่พร้อมทำงานจะแสดงสถานะที่หน้าจอควบคุมบรรทัดที่สี่ โดยมีความหมายของคำย่อดังนี้

Em หมายถึง ปุ่ม Emergency Stop ที่หน้าปัทม์เครื่องควบคุมถูกกด

Dr หมายถึง สวิตซ์ประตูเปิดวงจร

Gs หมายถึง สวิตซ์วางไม้กราวน์เปิดวงจร

OL หมายถึง รีเลย์ป้องกันโหลดเกินที่ชุดไทริสเตอร์ทำการเปิดวงจร

ต้องจัดการวงจรความปลอดภัยให้เรียบร้อยก่อนเครื่องควบคุมจึงจะเริ่มทำขั้นตอนที่ 3

7. เครื่องควบคุมจะรอให้ขนาดของแรงดันด้านแรงสูงมีค่าน้อยกว่า 5kV. โดยแสดงหน้าจอบรรทัดที่สาม “Delay for Vchg<5kV.” เมื่อขนาดแรงดันดันแรงสูงมีค่าน้อยกว่า 5 kV. จึงจะทำขั้นตอนถัดไป

8. เครื่องควบคุมจะทำการควบคุมแรงดันอัดประจุโดยอัตโนมัติจนได้แรงดันด้านแรงสูงตามที่ตั้งค่าไว้

9. ขั้นตอนนี้จะมี 2 กรณีคือ

- กรณีที่1 ถ้าขั้นตอนที่ 4 เลือก “Auto trig Yes” เครื่องควบคุมจะรอจนถึงเวลาที่ตั้งไว้ในขั้นตอนที่ 4.1 จึงทำขั้นตอนที่ 10

- กรณีที่2 ถ้าขั้นตอนที่ 4 เลือก “Auto trig No” เครื่องควบคุมจะแสดงความพร้อมส่งสัญญาณลั่นไกและหน้าจอบรรทัดที่สามแสดง “Press Trig Button” ถ้าต้องการลั่นไกให้กดปุ่ม Trig

10. เครื่องควบคุมจะส่งสัญญาณเสียงเตือน และ ทำการลั่นไก

11. เครื่องควบคุมย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ชุดคำสั่งควบคุม

File Function.h

```
#define Div_ratio 43.26; /*Rdivider ratio&atten (990x21x2/1000)=41.58*/
#define CT_ratio 12.0;       /*CT ratio[Ipri/5A] (60/5)=12*/

extern void printlcd(unsigned char[21],unsigned char i);
extern void init_lcd();
extern void chk_busy();
extern unsigned char read_busy();
extern void goto_lcd(unsigned char);
extern void write_ins(unsigned char);
extern void write_dat(unsigned char);
extern void delay(unsigned int);

extern unsigned int ltc1298(unsigned char);
extern void init_ser();
extern void init_ltc();
extern unsigned char key_scan();
extern void key_release();
extern unsigned char key_press(bit);
extern void max500(unsigned char,unsigned char);
extern void ext1();                         /*External interrupt 1 */
extern void init_in_rel();
extern void relay(unsigned char,bit);
extern float str_flo(unsigned char Vset[5]);
extern void safety_check(bit);
extern void f_sprintf(const char *p,float dt,unsigned char pos);
extern void init_timer1();
extern float show_Vchg();
extern float show_Ichg();
extern void reset_chg();
extern void timer_ms();      /*timer1 interrupt*/
sbit  CS  = P1^2;
sbit  CLK = P1^0;
sbit  DIO = P1^1;
sbit  LDAC= P1^3;
extern bit int_flag,ds_chge;
extern unsigned char sh_lat,sh_lat2,i;
extern unsigned int Vchg_arr[8];
extern unsigned int Vshow_old;
extern unsigned int Ichg_arr[8];
extern unsigned int Ishow_old;
extern float time,Vchg,Vs,Vchg_abs,Vs_abs;
extern unsigned int time_ms,slope,Step_limit,time_trig;
extern int Vs_sign;
```

<u>File Main.c</u>

```
/* option for Target1 use compact memory f=18.432Mhz */
#include <reg51.h>
#include <stdio.h>
#include <function.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>


const float I_limit=8;          /*Current limit = 10e3/220/2 = 22.7A.*/
bit int_flag,ds_chge;
unsigned char sh_lat,sh_lat2,im,i;
unsigned int Vchg_arr[8];
unsigned int Vshow_old;
unsigned int Ichg_arr[8];
unsigned int Ishow_old;
float time,Vchg,Vs=0.0,Vs_abs,Vchg_abs;
unsigned int time_ms,slope,Step_limit,time_trig=60;
int Vs_sign;

void main(void)
{
const unsigned char Step_MAX=255;
unsigned char Vset[6]="+00.0",Ttrig[4]="060";
char buflcd[21]="";
float Vchg_o,Ichg;
unsigned char k_ch/*,i*/,i_old;
unsigned int i_d,aa;
bit chg_flag,auto_trig,trig_flag;
unsigned char xdata *km;
unsigned char k_code;

        max500(0,0);
        sprintf(Vset,"+00.0");
  init_ltc();

sv:     init_lcd();

        for(im = 0;(im < 8);im++)
        {Ichg_arr[im]=0;}
        sh_lat2=0;
        Ishow_old=0;

        for(im = 0;(im < 8);im++)
        {Vchg_arr[im]=2065;}
        sh_lat=0;
        Vshow_old=16520;

        k_ch=0;
        EA=0;
        init_in_rel();
        chk_busy();
        write_ins(0x0D); /* display ON/OFF control 1101(cursor off,blink*/
        sprintf(buflcd,"Vset = %s kV.",Vset);
        printlcd(buflcd,0x01);
        i=0;
        goto_lcd(0x08);
        do{
                k_ch=key_press(0);
                switch (i){
                case 0 : if ((k_ch=='+')||(k_ch=='-'))
                                { write_dat(k_ch);
                                  Vset[i]=k_ch;
                                  i++;
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
                    }
                    if (k_ch=='R') {i++,goto_lcd(0x09);}
                    break;
        case 1 : if ((k_ch>='0')&&(k_ch<='9'))
                    { write_dat(k_ch);
                      Vset[i]=k_ch;
                      i++;
               }
                    if (k_ch=='L') {i--;goto_lcd(0x08);}
                    if (k_ch=='R') {i++,goto_lcd(0x0A);}
                    break;
        case 2 : if ((k_ch>='0')&&(k_ch<='9'))
                    { write_dat(k_ch);
                      Vset[i]=k_ch;
                      i+=2;
                      goto_lcd(0x0C);
               }
                    if (k_ch=='L') {i--;goto_lcd(0x09);}
                    if (k_ch=='R') {i+=2,goto_lcd(0x0C);}
                    break;
        case 4 : if ((k_ch>='0')&&(k_ch<='9'))
                    { write_dat(k_ch);
                      Vset[i]=k_ch;
                      goto_lcd(0x0C);
               }
                    if (k_ch=='L') {i-=2;goto_lcd(0x0A);}
                    break;
        }
        key_release();
    }
    while (k_ch != 'E');
    Vs=atof(Vset);
    Vs_abs=fabs(Vs);
    if ((Vs>=-5.0)&&(Vs<=5.0)) {goto sv;}
    f_sprintf("%+4.1f kV. ",Vs,0x08);
    chk_busy();
    write_ins(0x0C);            /* display ON/OFF control 1101(cursor off,off blink*/

    Step_limit=ceil((fabs(Vs))+9);          /* step=mVs+c ,m=1,c=9    */

    auto_trig=1;
    k_ch=0;
    printlcd("Auto trig Yes",0x17);

    do{
        k_ch=key_press(0);
        if ((k_ch=='L')||(k_ch=='R')||(k_ch=='+')||(k_ch=='-')) {auto_trig=~auto_trig;}
        if (auto_trig) {printlcd("Yes",0x21);}
        else {printlcd("No ",0x21);}
        key_release();
     }
    while (k_ch != 'E');

TT: chk_busy();
    write_ins(0x0D); /* display ON/OFF control 1101(cursor off,blink*/

    if (auto_trig)      {trig_flag=1;
                        sprintf(buflcd,"Ttrig= %s sec",Ttrig);
                        printlcd(buflcd,0x17);
                        i=0;
                        goto_lcd(0x1E);
                        do      {
                                k_ch=key_press(0);
                                switch (i){
                                case 0 : if ((k_ch>='0')&(k_ch<='9'))
                                                {write_dat(k_ch);
                                                Ttrig[i]=k_ch;
```

```
                                        i++;
                                        }
                                    if (k_ch=='R') {i++,goto_lcd(0x1F);}
                                    break;
                        case 1 : if ((k_ch>='0')&(k_ch<='9'))
                                        {write_dat(k_ch);
                                         Ttrig[i]=k_ch;
                                         i++;
                                        }
                                    if (k_ch=='L') {i--;goto_lcd(0x1E);}
                                    if (k_ch=='R') {i++,goto_lcd(0x20);}
                                    break;
                        case 2 : if ((k_ch>='0')&(k_ch<='9'))
                                        {write_dat(k_ch);
                                         Ttrig[i]=k_ch;
                                         goto_lcd(0x20);
                                        }
                                    if (k_ch=='L') {i--;goto_lcd(0x1F);}
                                    break;
                                    }
                        key_release();
                        }
            while (k_ch != 'E');
            time_trig=atoi(Ttrig);
            if ((time_trig<=20)||(time_trig>240)) {goto TT;}
            }
else        {trig_flag=0;
            time_trig=1;
            }
chk_busy();
write_ins(0x0C);

chg_flag=0;
k_ch=0;
printlcd("Start Charging No",0x15);
printlcd("Vchg =",0x41);

do          {k_ch=key_press(1);
            if ((k_ch=='L')|(k_ch=='R')|(k_ch=='+')|(k_ch=='-')) {chg_flag=~chg_flag;}
            if (chg_flag) {printlcd("Yes",0x24);}
            else {printlcd("No ",0x24);}
            key_release();
            }
while (k_ch != 'E');
if (~(chg_flag)) {goto sv;}
int_flag=0;                                             /*clear interrupt flag*/
safety_check(0);
/* IT1=1;  /* 1 for low edge,0 for low level */
IE=0x8C;                                                /* enable EA=1 and EX1=1 */
i_d=0;
do          {
            if (int_flag) {goto sv;}
            Vchg=show_Vchg();
            if (i_d==0)         {printlcd("Delay for Vchg<5kV.",0x14);}
            if (i_d==300)       {printlcd("                  ",0x14);}
            if (i_d==600)       {i_d=0;}
            else {i_d++;}
            }
while (fabs(Vchg)>5);
if (Vs>0) {relay(2,0);}                 /*Polarity + =0 */
else {relay(2,1);}
delay(5000);
max500(0,0);                                    /*Set Vref=0 */
delay(5000);
if (int_flag) {goto sv;}
relay(1,1);                                     /*On relay K1 */
delay(5000);
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
relay(3,1);                                         /*On relay enable */
delay(5000);

init_lcd();
f_sprintf("Vset = %+4.1f kV. ",Vs,0x01);
printlcd("Vchg =",0x41);
printlcd("Ichg =",0x15);
Vchg=show_Vchg();
Vchg_o=Vchg;
Vchg_abs=fabs(Vchg);
i=0;                        /* charging step */
i_old=i;
i_d=0;                      /*delay step charging*/

if (Vs>0) {Vs_sign=1;}
else {Vs_sign=-1;}
time_ms=0;
time=0.0;
ds_chge=0;
slope=200;
init_timer1();

do                                      /*start increase step for charging */
        {
        If (int_flag)
                {
                printlcd("          ",0x057);
                goto sv;
                }
        else {if (i!=i_old)  {
                        max500(0,i);
                        aa=(int)i;                              /*aa= integer i*/
                        f_sprintf("%3.0f",aa,0x10);  /*show step */
                        i_old=i;}
                        }

        Vchg=show_Vchg();
        Vchg_abs=fabs(Vchg);
if (((i>=(0.8*Step_limit))||(Vchg_abs>=0.8*Vs_abs))&&(Vchg_abs<=(1.1*Vs_abs))) {slope=500;}
        else {slope=200;}
if ((i>=6)&&(((Vs > 0)&&(Vchg < -1.5))||((Vs < 0)&&(Vchg > 1.5)))) /*& bit and ,&& and for compare or
loop*/
                {reset_chg();
                printlcd("Wrong Polarity",0x55);
                delay(20000);
                goto sv;
                }

        if ((i>6)&&((Vs_sign*Vchg)<((Vs_sign*Vchg_o)-2.5)))
                {reset_chg();
                printlcd("  Self Firing    ",0x55);
                delay(20000);
                goto sv;
                }
        Ichg=show_Ichg();
        Vchg_o=Vchg;

        if (Ichg>=(1.5*I_limit))
                {
                reset_chg();
                printlcd("OC",0x63);
                delay(20000);
                goto sv;
                }
        else {if (Ichg>=I_limit)
                        {if (i>0x01) {i--;}
                         else {i=0;}
```

```
                        }
                    }

            if ((Vchg_abs>(0.98*Vs_abs))&&(!auto_trig))
                    {if (time_ms%116==0) {printlcd("Press Trig Button",0x55);}
                     km=0xA002;
                     *km=0xF7;
                     k_code=*km;
                     k_code>>=4;
                     if (k_code==0x0B) {trig_flag=1;
                                                    i=(int)Step_limit;
                                                    max500(0,i);
                                                }
                     else {trig_flag=0;}
                     }

        }
        while ((Vchg_abs<=Vs_abs) || (!trig_flag) || (time<=time_trig-1));
        TR1=0;                                  /*Off Timer*/
        relay(4,1);         /*Alarm Horn ON*/
        delay(10000);
        max500(0,0);                    /*chaging step 0*/
        relay(3,0);                             /*Enable off*/
        relay(2,0);                             /*polarity off*/
        relay(1,0);                             /*K1 OFF*/
        relay(4,0);
        delay(5000);
        relay(5,1);                             /*Triger Signal*/
        delay(5000);
        relay(5,0);
        delay(20000);
        goto sv;
}
```

File Function.C

```
#include <reg51.h>
#include <stdio.h>
#include <function.h>

#define LD_INS_PORT     0xA000;
#define LD_DAT_PORT     0xA001;
#define KY_DAT_PORT     0xA002;
#define LK_CON_PORT    0xA003;
unsigned char pa_buf;


/*#pragma disable*/
void printlcd(string,i)
unsigned char *string;
unsigned char i;
{
        if (((i>=0x00)&(i<=0x27))|((i>=0x40)&(i<=0x67))) {goto_lcd(i);}
        while(*string!=0x00)
                {
                write_dat(*string);
                string++;
                }
        return;
}


void init_lcd(void)
{
unsigned char xdata *p;

        p  = LK_CON_PORT;
        *p = 0x8A;
        delay(5);
        write_ins(0x30);
        write_ins(0x30);
        write_ins(0x30);
        chk_busy();
        write_ins(0x38); /*function set 111000*/
        chk_busy();
        write_ins(0x80); /*set DDram addr*/
        chk_busy();
        write_ins(0x01); /*clear display 01*/
        chk_busy();
        write_ins(0x06); /*entry mode set 110*/
        chk_busy();
        write_ins(0x0C); /* display ON/OFF control 1100(cursor off,not blink*/
        return;
}


void goto_lcd(i)
unsigned char i;
{
        write_ins(i | 0x80);
        delay(1);
        return;
}


void chk_busy(void)
{
        while(read_busy());
        return;
}
```

```
/*#pragma disable*/
unsigned char read_busy(void)
{
unsigned char xdata *p;
unsigned char i;

            p  = LK_CON_PORT;
            *p = 0x8A;
            delay(5);
            p  =  LD_INS_PORT;
            pa_buf &= 0xFD;
            pa_buf |= 0x01;
            *p = pa_buf;
            pa_buf |= 0x80;   /*high edge enable*/
            *p = pa_buf;
            delay(1);
            p = LD_DAT_PORT;
            i = *p;
            p = LD_INS_PORT;
            pa_buf &= 0x7F;
            *p = pa_buf;
            delay(1);
            p  = LK_CON_PORT;
            *p = 0x88;
            return i & 0x80;
}


void write_ins(unsigned char i)
{
unsigned char xdata *p;

            p = LD_INS_PORT;
            pa_buf &= 0xfc;
            *p = pa_buf;
            p = LD_DAT_PORT;
            *p = i;
            p = LD_INS_PORT;
            pa_buf |= 0x80;
            *p = pa_buf;
            delay(1);
            pa_buf &= 0x7F;
            *p = pa_buf;
            delay(1);
            return;
}


void write_dat(unsigned char i)
{
unsigned char xdata *p;

            p = LD_INS_PORT;
            pa_buf &= 0xFE;
            pa_buf |= 0x02;
            *p = pa_buf;
            p = LD_DAT_PORT;
            *p = i;
            p = LD_INS_PORT;
            pa_buf |= 0x80;
            *p = pa_buf;
            delay(1);
            pa_buf &= 0x7f;
            *p = pa_buf;
            delay(1);
            return;
}
```

```
void delay(unsigned int ms_10)
{
unsigned int i;
            while(ms_10)
                        {
                        for(i=0;i<37;i++){}
                        ms_10--;
                        }
            return;
}


#pragma disable
unsigned int ltc1298(unsigned char ch)
{
unsigned char i;
unsigned char j;
unsigned int  m;

            if(ch == 0) {i=0xdf;}
            else {i = 0xff;}
            CS = 0;
            for(j=0;j<4;j++)
                        {
                        if((i & 0x80) == 0x80) {DIO = 1;}
                        else                   {DIO = 0;}
                        CLK = 0;  CLK = 1;
                        i <<= 1;
                        }
            DIO = 1;
            CLK = 0;  CLK = 1;
            m   = 0;
            for(j=0;j<13;j++)
                        {
                        m <<=1;
                        CLK = 0;
                         if(DIO)  {m |=  0x01;}
                        else     {m &= ~0x01;}
                        CLK = 1;
                        }
            CS = 1;
            return m;
}


void init_ltc(void)
{
            CS  = 1;                    /*for ltc1298 */
            CLK = 1;                    /*for ltc1298 */
            DIO = 1;                    /*for ltc1298 */
            return;
}

/************************************/
/*          key  release            */
/************************************/
void key_release(void)
{
unsigned char kcode;
unsigned char xdata *k;

            k = KY_DAT_PORT
            *k=0xF0;
            do
                        { kcode  = *k&0xF0; }
            while(kcode != 0xF0);
```

```
            delay(100);
            return;
}


/**********************************/
/*          key scan              */
/**********************************/
unsigned char key_scan(void)
{
unsigned char xdata *k;
char scan_code = 0;
char m,n;
unsigned char in_code,a;
unsigned char check_code[4] = {0xFE,0xFD,0xFB,0xF7};
char flag = 0;

            k = KY_DAT_PORT;
            for(m = 0;(m < 4)&&(flag == 0);m++)
                        {
                        *k = check_code[m];
                        in_code = *k;
                        in_code >>= 4;
                        for(n=0;n<4;n++)
                                    {
                                    a = in_code%2;
                                    if(a == 0) {flag = 1; break;};
                                    in_code = in_code/2;
                                    scan_code++;
                                    }
                        }
            return scan_code;
}


/**********************************/
/*          key_press             */
/**********************************/

unsigned char key_press(bit show_Vc)
{
unsigned char ascii[16] = { '1','4','7','L',
                            '2','5','8','0',
                            '3','6','9','R',
                            '+','-','T','E'};
unsigned char v1=1,v2=0;

            do          {
                        v1 = key_scan();
                        if (show_Vc) {show_Vchg();}
                        if(v1 < 16)
                                    {
                                    delay(50);
                                    v2 = key_scan();
                                    }
                        }
            while (v1 != v2);
            return (ascii[v2]);
}
```

```
/**********************************/
/*          max500                */
/**********************************/
#pragma  disable
void max500(unsigned char ch,unsigned char j)
{
unsigned char i;

            DIO = 0;
            CLK = 0;
            LDAC=1;
            for(i=0;i<2;i++)
                        {
                        if((ch & 0x02) == 0x02) {DIO = 1;}
                        else                    {DIO = 0;}
                        CLK = 1;
                        CLK = 0;
                        ch <<= 1;
                        }
            for(i=0;i<8;i++)
                        {
                        if((j & 0x80) == 0x80) {DIO = 1;}
                        else                   {DIO = 0;}
                        CLK = 1;
                        CLK = 0;
                        j <<= 1;
                        }

            DIO = 0;
            CLK = 1;
            DIO = 1;
            LDAC = 0;
            LDAC = 1;
            return;
}


/******************************************/
/*      external 1 interrupt service      */
/******************************************/
void ext1(void) interrupt 2 /*using 2*/
{
unsigned char xdata *pp;
            pp=0x8000;
            delay(50);
            if (((~*pp)&(0x0F))!=(0x0F))            {
                                                     reset_chg();
                                                      safety_check(1);
                                                      delay(5000);
                                                      TR1=1;   /* run timer1 */
                                                      }
            return;
}


/******************************************/
/*          initial input_relay port      */
/******************************************/
void init_in_rel()
{
unsigned char xdata *p;

            p=0x8003;           /* 8225-1 */
            *p=0x92;/* A,B =IN, C=OUT */
            delay(50);
            p=0x9003;   /* 8255-2 conport*/
             *p=0x92;
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
            delay(50); /*delay 5ms.*/
            p=0x9002;
            *p=0x00;   /* clear all relay*/
            delay(50);

}


/*******************************************/
/*          relay output bit               */
/*******************************************/
void relay(unsigned char relay_n,bit relay_dat)
{
unsigned char xdata *p;

            p=0x9003;
            relay_n -= 1;
            relay_n <<= 1;
            if (relay_dat){relay_n += 1;}
            *p=relay_n;
}


/*******************************************/
/*          safety check status            */
/*******************************************/
#pragma disable
void safety_check(bit show_I)
{
unsigned char xdata *p;
unsigned char i;

            printlcd("                ",0x55);
            p=0x8000;
            delay(50);
            i=(~*p)&(0x0F);
            while (i!=0x0F)
                        {show_Vchg();
                        if (show_I) {show_Ichg();}
                        if ((i&1)==0) {printlcd("Em",0x57);}
                        else {printlcd("  ",0x57);}
                        i>>=1;
                        if ((i&1)==0) {printlcd("Dr",0x5A);}
                        else {printlcd("  ",0x5A);}
                        i>>=1;
                        if ((i&1)==0) {printlcd("Gs",0x5D);}
                        else {printlcd("  ",0x5D);}
                        i>>=1;
                        if ((i&1)==0) {printlcd("OL",0x60);}
                        else {printlcd("  ",0x60);}
                        i=(~*p)&(0x0F);
                        int_flag=1;
                        }
}


/*******************************************/
/*          floating print lcd             */
/*******************************************/
/*#pragma disable*/
void f_sprintf(const char *p,float dt,unsigned char pos)
{
unsigned char str_dt[21]="";

            sprintf(str_dt,p,dt);
            printlcd(str_dt,pos);
}
```

```
/*******************************************/
/*          Show Vcharge                   */
/*******************************************/
float show_Vchg()
{
float Vchg1,Vshow=0.0;
unsigned int Vtmp=0;

            Vtmp=Vchg_arr[sh_lat];
            Vchg_arr[sh_lat]=ltc1298(0);
            Vchg_arr[sh_lat]+=ltc1298(0);
            Vchg_arr[sh_lat]=Vchg_arr[sh_lat]/2;
            Vchg1=((Vchg_arr[sh_lat]*5.0/4096)-2.52)*Div_ratio;  /*offset=0.021*/
            Vshow_old+=Vchg_arr[sh_lat]-Vtmp;
            if (sh_lat==2)
                        {Vshow=((Vshow_old*5.0/32768)-2.52)*Div_ratio;
                         f_sprintf("%-+4.1f kV. ",Vshow,0x48);
                        }
            sh_lat=++sh_lat&0x07;
            return(Vchg1);
}


/*******************************************/
/*          Show Icharge                   */
/*******************************************/
float show_Ichg()
{
float Ichg1,Ishow=0.0;
unsigned int Itmp=0;

            Itmp=Ichg_arr[sh_lat2];
            Ichg_arr[sh_lat2]=ltc1298(1);
            Ichg_arr[sh_lat2]+=ltc1298(1);
            Ichg_arr[sh_lat2]=Ichg_arr[sh_lat2]/2;
            Ichg1=(Ichg_arr[sh_lat2]*5.0/4096)*CT_ratio;
            Ishow_old+=Ichg_arr[sh_lat2]-Itmp;
            if (1) /*((ms_chge==1)&&(time_ms%110==0))/*sh_lat2==8)*/
                        {Ishow=(Ishow_old*5.0/32768)*CT_ratio;
                         f_sprintf("%-4.2f A. ",Ishow,0x1d);
                        }
            sh_lat2=++sh_lat2&0x07;
            return(Ichg1);
}


/*******************************************/
/*          Reset Charge                   */
/*******************************************/
#pragma disable
void reset_chg()
{
            relay(3,0);
            delay(100);
            max500(0,0);
            relay(1,0);
            delay(100);
            TR1=0;    /* pause timer1 */
            int_flag=1;
}

/*******************************************/
/*          Timer1 interrupt               */
/*******************************************/
void timer_ms(void) interrupt 3
{
   time_ms=time_ms+10;
```

```
            time+=0.01;
            ds_chge=1;

            if (time_ms>=1000) {time_ms=0;}
            if (time_ms%slope==0)                                   /* Step increase and delay*/
                        {
                         if ((Vchg_abs<0.97*Vs_abs)&&(i<(Step_limit+3))) {i++;}
                         if (Vchg_abs>1.03*Vs_abs) {if (i>0x01) {i--;}
                                                                    else {i=0;}}
                         if ((time>=time_trig-5)&&((Vchg_abs>0.97*Vs_abs)&&(Vchg_abs<1.03*Vs_abs))) {i=
(int)Step_limit;}
                        }

            TH1=0x88;
            TL1=0x04;
}


/*******************************************/
/*          initial Timer1                  */
/*******************************************/
void init_timer1()
{
            TMOD=0x10; /*Timer 1 mode 1 */
            TH1=0x88;
            TL1=0x04; /* 65536-30720+4 =  10ms*/
            TR1=1;
}
```

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสิน เตียพิริยะกิจ เกิดเมื่อวันที่ 2 ตุลาคม พ.ศ. 2513 ที่อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ในปีการศึกษา 2536 เข้าทำงานบริษัทอุตสาหกรรมปิโตรเคมีกัลไทย จำกัด (มหาชน) และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย