# การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมดุลการเชื่อมและค่าแรงดึงในการเชื่อมสตัด แบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุและการออกแบบระบบการเชื่อมที่มีความสมดุล

นายชินภัทร อิงคะประดิษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-3001-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# STUDY OF RELATIONSHIP BETWEEN WELDING BALANCE AND TENSILE STRENGTH OF CAPACITOR DISCHARGE STUD WELDING AND DESIGN OF WELDING SYSTEM WITH WELDING BALANCE

Mr. Chinnaphat Ingkapradit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering.

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

ISBN 974-14-3001-9

Copyright of Chulalongkorn University

490229

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมดุลการเชื่อมและค่าแรงดึงในการเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุและการออกแบบระบบการเชื่อมที่มีความสมดุล |
| โดย | นายชินภัทร อิงคะประดิษฐ์ |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธารา ชลปราณี |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธารา ชลปราณี)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์)

ชินภัทร อิงคะประดิษฐ์ : การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมดุลการเชื่อมและค่าแรงดึงในการเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุและการออกแบบระบบการเชื่อมที่มีความสมดุล (STUDY OF RELATION BETWEEN WELDING BALANCE AND TENSILE STRENGTH OF CAPACITOR DISCHARGE STUD WELDING AND DESIGN OF WELDING SYSTEM WITH WELDING BALANCE) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ธารา ชลปราณี, 103 หน้า. ISBN 974-14-3001-9.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสนอการออกแบบและสร้างอุปกรณ์การเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ วงจรสวิตช์คุมกระแสที่มีตัวควบคุมแบบฮิสเตอรีซิสถูกนำมาใช้เป็นวงจรชาร์จตัวเก็บประจุ วงจรเรียงกระแสควบคุมเฟสภาคอินเวอร์เตอร์ถูกนำมาใช้เป็นวงจรลดระดับแรงดัน ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบมีตัวแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลภายใน ถูกนำมาเป็นตัวควบคุมการทำงานของแหล่งจ่ายไฟ เป็นผลให้ระบบสามารถทำงานที่มีความซับซ้อนที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต และมีความสามารถในการรับค่าและแสดงผล

แหล่งจ่ายไฟที่ถูกออกแบบสามารถชาร์จตัวเก็บประจุขนาด 80,000 μF ตั้งแต่แรงดัน 0-170 โวลต์ โดยใช้ระยะเวลา 3.4 วินาที ใช้กระแสไฟสลับขาเข้า 3.5 แอมแปร์ ความผิดพลาดในการควบคุมแรงดันอยู่ในช่วง ±2% การลดระดับแรงดันโดยวงจรเรียงกระแสควบคุมเฟสจาก 170 โวลต์เป็น 50 โวลต์ใช้เวลา 11 วินาที การคืนพลังงานโดยการตั้งค่ากระแสคืนพลังงาน 4 แอมแปร์ ใช้เวลาการคืนพลังงาน 4 วินาที การทดลองการเชื่อมสตัดโดยใช้สลักเกลียวอลูมิเนียมขนาด M6 อุปกรณ์ที่ทำการออกแบบสามารถเชื่อมสลักเกลียว โดยที่รอยเชื่อมมีความแข็งแรงเฉลี่ย 4,400 นิวตัน สำหรับกรณีแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ 170 โวลต์ ความสมดุลของรอยเชื่อมถูกทดสอบโดยการเปรียบเทียบมุมเอียงของสลักเกลียวกับค่าแรงดึงรอยเชื่อม จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า มุมการเชื่อมสามารถเอียงได้ตั้งแต่ -11.09° ถึง +8.91° ที่การปรับความยาวขาปืนเชื่อมสตัด -5 ม.ม. ถึง +4 ม.ม.

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต.....ชินภัทร อิงคะประดิษฐ์.....
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ธ.....
ปีการศึกษา 2549

## 4670287021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: STUD WELDING/CAPACITOR DISCHARGE/WELDING BALANCE/ ALUMINUM WELDING

CHINNAPHAT INGKAPRADIT : STUDY OF RELATION BETWEEN WELDING BALANCE AND TENSILE STRENGTH OF CAPACITOR DISCHARGE STUD WELDING AND DESIGN OF WELDING SYSTEM WITH WELDING BALANCE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. TARA CHOLPRANEE, Ph. D., 103 pp. ISBN 974-14-3001-9.

This thesis presents a design and construction of capacitor discharge stud welding equipment. A current-control circuit with hysteresis controller is used as a capacitor charging circuit. Phase-controlled rectifier working in inverter mode is used as a decreasing voltage circuit. Microcontroller with internal A/D converter is used as a power supply controller. As a result, the designed system can deal with complicated job in the future and has input and display ability.

The designed power supply can charge 80,000 μF-capacitor. Charging capacitor from 0V to 170V takes 3.4 seconds with input AC current of 3.5 A. Voltage control error is within ±2%. It takes 11 seconds to reduce capacitor voltage from 170V to 50V by using phase-control rectifier. Energy recovery to AC source lasts 4 seconds when recovery current is 4 A. In the experiment of stud welding with M6 aluminum stud, welded studs have average tensile strength of 4,400 N for the case of capacitor voltage 170V. Welding balance is tested by comparison of stud inclining angle and average tensile strength. Test results show that welded studs can incline between -11.09° and +8.91°, with adjustable pistol foot distance between -5 mm. and +4 mm.

Department of Electrical Engineering Student's signature ชินภัทร อิงคประดิษฐ์

Field of study Electrical Engineering Advisor's signature Tara Cholpranee

Academic year 2006

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธารา ชลปราณี อาจารย์ที่ปรึกษา และครูถาวร สุวรรณกิจ ที่กรุณาให้คำปรึกษาในการทำงาน ให้คำแนะนำในการแก้ปัญหา ตลอดจนความช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดมา นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณคณาจารย์ทั้งหลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่กรุณาช่วยสอนสั่งวิชาความรู้ให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ และอาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์ ที่ช่วยกรุณาติดตามและตรวจสอบงานวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าตลอดจนสั่งสอนและให้ข้อเสนอแนะต่างๆ งานวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าจึงสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย และครูสราวุธ อาปถากะพันธ์ แห่งภาควิชาเครื่องกล ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ระหว่างการทดสอบ

ขอขอบคุณคุณปิติ จันทนไพรวัน แห่งบริษัทคราสเทค ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับเครื่องเชื่อมสตัด ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบอุปกรณ์ อีกทั้งยังช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์และเอกสารต่างๆ ตั้งแต่เริ่มต้นการวิจัย

ขอขอบคุณครูถาวร เอื้อดี แห่งห้องปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าแรงสูง ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์ต่างๆ ระหว่างทำวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า

ขอขอบคุณอาจารย์และเพื่อนๆ ห้องปฏิบัติการวิจัยไบโอเอิเล็กทรอนิกส์ และห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์ ตลอดจนให้คำแนะนำต่างๆ ระหว่างการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า และช่วยสนับสนุนให้การดำเนินงานวิจัยของข้าพเจ้าเป็นไปได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดขอกราบของพระคุณคุณพ่อ-คุณแม่ ที่กรุณาให้คำสั่งสอน ตลอดจนให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าเสมอมา วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่มีทางสำเร็จลุล่วงไปได้เลยถ้าขาดกำลังใจและการสนับสนุนจากคุณพ่อ-คุณแม่ของข้าพเจ้า

# สารบัญ

หน้า


บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญภาพ ..... ญ

บทที่

1. บทนำ ..... 1
    1.1 แนวเหตุผล ..... 1
    1.2 วัตถุประสงค์ ..... 1
    1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน ..... 2
    1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์ ..... 2
    1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ..... 2
2. การเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ ..... 3
    2.1 การเชื่อม ..... 3
    2.2 การเชื่อมสตัด ..... 9
    2.3 การเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ ..... 12
    2.4 วัสดุอลูมิเนียม ..... 18
    2.5 การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงาน ..... 22
    2.6 การศึกษาความสมดุลการเชื่อม ..... 23
3. การออกแบบอุปกรณ์การทดลองการเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ ..... 26
    3.1 บล็อกไดอะแกรมอุปกรณ์การเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ ..... 26
    3.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และการเลือกอุปกรณ์การเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ ..... 27
    3.3 วงจรแหล่งจ่ายไฟการเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ ..... 31
    3.4 การควบคุมแหล่งจ่ายไฟการเชื่อมสตัดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ..... 49

4. ผลการทดลอง ..... 66
4.1 การทดลองแหล่งจ่ายไฟการเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ ..... 66
4.2 การทดลองการเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ ..... 84
5. สรุปและข้อเสนอแนะ ..... 92
รายการอ้างอิง ..... 94
ภาคผนวก ..... 96
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 103

# สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

ตารางที่ 2.1 กระบวนการเชื่อมในกลุ่มต่างๆ (อักษรทางด้านขวามือเป็นอักษรย่อของกระบวนการ) 8
ตารางที่ 2.2 ชนิดของโลหะผสมอลูมิเนียมและส่วนประกอบอัลลอยหลัก 18
ตารางที่ 3.1 พิกัดที่ได้จากการทดสอบและพิกัดการใช้งานสวิตช์ไทริสเตอร์ 29
ตารางที่ 3.2 พิกัดการใช้งานสวิตช์ไทริสเตอร์แบบ Hockey-Puk เบอร์ ST330C12C 29
ตารางที่ 3.3 ระดับการตั้งแรงสปริง 31
ตารางที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง $V_{REF1}$ เนื่องจากการป้อนกลับ 36
ตารางที่ 4.1 การกำหนดค่าขั้นและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขาออกที่ได้จากการควบคุมแรงดันโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 71
ตารางที่ 4.2 การกำหนดค่าขั้นและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขาออกที่ได้จากการควบคุมแรงดันโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เมื่อมีการตรวจเช็คระดับแรงดัน 73
ตารางที่ 4.3 การตั้งค่ามุมจุดชนวนในการลดระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ 77
ตารางที่ 4.4 การตั้งค่ามุมจุดชนวนในการคืนพลังงานจากตัวเก็บประจุไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับ 78
ตารางที่ 4.5 การตั้งค่าหมายเลขสปริงเทียบกับระยะเวลาการอาร์คและค่าแรงดึง 85
ตารางที่ 5.1 การกำหนดค่าความจุไฟฟ้าสำหรับสลักเกลียวขนาดต่างๆ 93

# สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 2.1 รอยต่อพื้นฐาน 5 รูปแบบ 3
รูปที่ 2.2 รอยต่อการเชื่อมและตำแหน่งการเชื่อม 4
รูปที่ 2.3 การจัดกลุ่มการเชื่อมและกระบวนการอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง 5
รูปที่ 2.4 กระบวนการเชื่อมอาร์ค (gas tungsten arc welding) 6
รูปที่ 2.5 กระบวนการเชื่อมออกซีอะเซทีลีน (oxyacetylene welding) 6
รูปที่ 2.6 กระบวนการเชื่อมความต้านทาน (resistance spot welding) 7
รูปที่ 2.7 วงจรไฟฟ้าการเชื่อมอาร์ค 9
รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลการเชื่อมอาร์ค 9
รูปที่ 2.9 การเกิดกระแสอาร์คเมื่อใช้การต่อขั้วแบบตรง 10
รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการเชื่อมสตัด 11
รูปที่ 2.11 อุปกรณ์การเชื่อมสตัด 11
รูปที่ 2.12 วงจรการดิสชาร์จตัวเก็บประจุ 12
รูปที่ 2.13 สลักเกลียวที่ใช้ในการเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ 13
รูปที่ 2.14 ลำดับการเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุแบบเริ่มต้นสัมผัส 13
รูปที่ 2.15 ลำดับการเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุแบบเริ่มต้นเว้นช่องว่าง 14
รูปที่ 2.16 อุปกรณ์การเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ 15
รูปที่ 2.17 ปืนเชื่อมสตัดที่ใช้ในกระบวนการการเชื่อมแบบการดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ 15
รูปที่ 2.18 กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ 16
รูปที่ 2.19 กราฟกระแส-แรงดันที่ได้จากการเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ
ในกระบวนการเชื่อมแบบเริ่มต้นเว้นช่องว่าง 16
รูปที่ 2.20 ลักษณะของรอยเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ 21
รูปที่ 2.21 การทดสอบการงอโดยใช้ค้อน 22
รูปที่ 2.22 การทดสอบค่าแรงดึง (tensile test) 23
รูปที่ 2.23 การทดสอบค่าแรงบิด (torque test) 23
รูปที่ 2.24 การเชื่อมสตัดที่สลักเกลียวมีความสมดุล 24
รูปที่ 2.25 การเชื่อมสตัดที่สลักเกลียวไม่สมดุล 24
รูปที่ 2.26 ปืนเชื่อมสตัดด้านข้าง (side view) 25
รูปที่ 2.27 ปืนเชื่อมสตัดด้านล่าง (bottom view) 25
รูปที่ 2.28 ปืนเชื่อมสตัดที่ขาปืนเชื่อมเกิดการสึกหรอ ส่งผลให้เกิดความเอียง 25

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมอุปกรณ์การเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ 26
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์การทำงานของอุปกรณ์เชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ 27
รูปที่ 3.3 กราฟแรงดัน-กระแสที่ได้จากการเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ 28
รูปที่ 3.4 สวิตช์ไทริสเตอร์แบบ Hockey-Puk 29
รูปที่ 3.5 ปืนเชื่อมสตัดและขั้วสายเชื่อมต่อของบริษัท Soyer รุ่น PS-1 30
รูปที่ 3.6 กลไกการทำงานภายในปืนเชื่อมสตัดของบริษัท Soyer รุ่น PS-1 30
รูปที่ 3.7 ระยะออฟเซตและระยะยกของสปริง 30
รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมวงจรชาร์จตัวเก็บประจุ 32
รูปที่ 3.9 วงจรสวิตช์ควบคุมกระแสที่ใช้ตัวควบคุมแบบฮิสเตอรีซิส 32
รูปที่ 3.10 การควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิส 33
รูปที่ 3.11 วงจรบวกแบบปรับกระแสคอลเลกเตอร์ 33
รูปที่ 3.12 วงจรชมิตต์ทริกเกอร์ 34
รูปที่ 3.13 วงจรภายในของตัวเปรียบเทียบแรงดัน $U_{C1}$ 35
รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลที่ได้จากวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ ในรูปที่ 3.12 35
รูปที่ 3.15 แรงดันขาออกของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ ในรูปที่ 3.12 36
รูปที่ 3.16 กระแสชาร์จประจุ $i_C$ และสัญญาณขับนำสวิตช์ทรานซิสเตอร์ $M_{C1}$ เมื่อมีการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิส 37
รูปที่ 3.17 กราฟกระแสชาร์จตัวเก็บประจุและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่ได้จากวงจรชาร์จตัวเก็บประจุ 38
รูปที่ 3.18 กราฟกระแสชาร์จตัวเก็บประจุ (ขยาย) ที่เวลา 1.5 วินาทีหลังเริ่มชาร์จตัวเก็บประจุ 38
รูปที่ 3.19 บล็อกไดอะแกรมการลดระดับแรงดันผ่านการเชื่อมต่อไฟตรง 39
รูปที่ 3.20 วงจรเรียงกระแสควบคุมเฟส กำหนดทิศทางกระแส $I_{AC}$ ไหลออกจากแหล่งจ่ายไฟสลับ 39
รูปที่ 3.21 แรงดัน-กระแสที่ได้จากวงจรเรียงกระแสควบคุมเฟสเมื่อใช้มุมจุดชนวน 36° 40
รูปที่ 3.22 วงจรเรียงกระแสภาคอินเวอร์เตอร์ ในที่นี้กำหนดทิศทาง $I_{AC}$ ไหลเข้าแหล่งจ่ายไฟสลับ 41
รูปที่ 3.23 แรงดัน-กระแสที่ได้จากวงจรเรียงกระแสภาคอินเวอร์เตอร์เมื่อมุมจุดชนวน $\alpha$=126° 42
รูปที่ 3.24 วงจรคืนพลังงานจากตัวเก็บประจุ 43

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 3.25 กการจำลองการทำงานของวงจรเรียงกระแสควบคุมเฟสที่มุมจุดชนวน 144° 43
รูปที่ 3.26 กราฟการจำลองการทำงาน (ขยาย) ของวงจรเรียงกระแสควบคุมเฟสในช่วงที่กระแสต่อเนื่อง 44
รูปที่ 3.27 กราฟการจำลองการทำงาน (ขยาย) ของวงจรเรียงกระแสควบคุมเฟสในช่วงที่กระแสไม่ต่อเนื่อง 45
รูปที่ 3.28 วงจรขับนำสวิตช์ไทริสเตอร์ 46
รูปที่ 3.29 การตรวจสอบสถานะปืนเชื่อมสตัด 47
รูปที่ 3.30 วงจรตรวจสอบสถานะปืนเชื่อมสตัด 47
รูปที่ 3.31 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 50
รูปที่ 3.32 บล็อกไดอะแกรมตัวเชื่อมโยงผ่านแสงแบบแอนาลอก 51
รูปที่ 3.33 วงจรสุ่มแรงดันแบบแยกโดด 51
รูปที่ 3.34 วงจรสุ่มกระแสแบบแยกโดด 52
รูปที่ 3.35 การสุ่มแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุโดยใช้วงจรสุ่มกระแสแบบแยกโดด 53
รูปที่ 3.36 การแปลงค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็นค่าขั้นโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 54
รูปที่ 3.37 วงจรควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 55
รูปที่ 3.38 การต่อไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมอุปกรณ์การเชื่อมสตัด 56
รูปที่ 3.39 การต่อไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อรับค่าขณะมีการเชื่อมสตัด 57
รูปที่ 3.40 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของอุปกรณ์การเชื่อมสตัด 58
รูปที่ 3.41 โฟลว์ชาร์ตการเพิ่ม-ลดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ 59
รูปที่ 3.42 โฟลว์ชาร์ตการจุดชนวนสวิตช์ไทริสเตอร์เมื่ออินเตอร์รัปต์ Timer T1 เริ่มทำงาน 60
รูปที่ 3.43 โฟลว์ชาร์ตการคงค่าระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ 61
รูปที่ 3.44 โฟลว์ชาร์ตเริ่มกระบวนการเชื่อมสตัด 63
รูปที่ 3.45 โฟลว์ชาร์ตการทำงานย่อย (sub-routine) ในการชาร์จและตรวจเช็คแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ 64
รูปที่ 4.1 กราฟแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ($V_C$) และกระแสชาร์จตัวเก็บประจุ ($I_C$) ขณะชาร์จตัวเก็บประจุ 67
รูปที่ 4.2 กราฟแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ($V_C$) และกระแสชาร์จตัวเก็บประจุ ($I_C$) ที่เวลาเริ่มชาร์จตัวเก็บประจุ 68

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.3 กราฟแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ($V_C$) และกระแสชาร์จตัวเก็บประจุ ($I_C$) ที่เวลา 1 วินาทีหลังจากการเริ่มชาร์จตัวเก็บประจุ ..... 68
รูปที่ 4.4 กราฟแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ($V_C$) และกระแสชาร์จตัวเก็บประจุ ($I_C$) ที่เวลา 2 วินาทีหลังจากการเริ่มชาร์จตัวเก็บประจุ ..... 69
รูปที่ 4.5 กราฟแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ($V_C$) และกระแสชาร์จตัวเก็บประจุ ($I_C$) ที่เวลา 3 วินาทีหลังจากการเริ่มชาร์จตัวเก็บประจุ ..... 69
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนขั้น (step) ที่ป้อนเข้ามาและค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขาออกในกรณีที่มีการตรวจเช็คระดับแรงดัน ..... 74
รูปที่4.7 กราฟการลดระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ..... 75
รูปที่ 4.8 กราฟการลดระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่เวลาเริ่มต้น ..... 76
รูปที่ 4.9 กราฟการลดระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ หลังจากเริ่มลดระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ 4 วินาที ..... 76
รูปที่ 4.10 กราฟการลดระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ หลังจากเริ่มลดระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ 8 วินาที ..... 77
รูปที่ 4.11 กราฟแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ($V_C$) และกระแสคืนพลังงาน ($I_r$) ..... 79
รูปที่ 4.12 กราฟขยายเชิงเวลาของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ($V_C$) และกระแสคืนพลังงาน ($I_r$) ที่เวลาเริ่มต้นการคืนพลังงาน ..... 80
รูปที่ 4.13 กราฟแรงดันไฟสลับ ($V_{AC}$) และกระแสคืนพลังงานฝั่งไฟสลับ ($I_{r,AC}$) และกำลังไฟฟ้าการคืนพลังงานกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับ ($P_{r,AC}$) ที่เวลาเริ่มต้น ..... 80
รูปที่ 4.14 กราฟขยายเชิงเวลาของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ($V_C$) และกระแสคืนพลังงาน ($I_r$) ที่เวลาเริ่มต้น 1.5 วินาทีหลังเริ่มการคืนพลังงาน ..... 81
รูปที่ 4.15 กราฟแรงดันไฟสลับ ($V_{AC}$) และกระแสคืนพลังงานฝั่งไฟสลับ ($I_{r,AC}$) และกำลังไฟฟ้าการคืนพลังงานกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับ ($P_{r,AC}$) ที่เวลา 1.5 วินาที ..... 81
รูปที่ 4.16 กราฟขยายเชิงเวลาของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ($V_C$) และกระแสคืนพลังงาน ($I_r$) ที่เวลาเริ่มต้น 3 วินาทีหลังเริ่มการคืนพลังงาน ..... 82
รูปที่ 4.17 กราฟแรงดันไฟสลับ ($V_{AC}$) และกระแสคืนพลังงานฝั่งไฟสลับ ($I_{r,AC}$) และกำลังไฟฟ้าการคืนพลังงานกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับ ($P_{r,AC}$) ที่เวลา 3 วินาที ..... 82
รูปที่ 4.18 ชุดการทดลองการเชื่อมสลักเกลียวเพื่อพิจารณาค่าสปริงใช้งาน ..... 84
รูปที่ 4.19 ชุดการทดลองการเชื่อมสตัดเพื่อพิจารณาค่าแรงดัน-ความแข็งแรง ..... 86
รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันการเชื่อมและค่าความแข็งแรงการเชื่อมสตัด ..... 87

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.21 การปรับขาปืนเชื่อมในการทดลองเชื่อมสตัด ..... 88
รูปที่ 4.22 ความเอียงของสลักเกลียวในการทดสอบ ..... 88
รูปที่ 4.23 ชุดทดลองการเชื่อมสตัดเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสมดุลปืนเชื่อม และค่าแรงดึง ..... 89
รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของสลักเกลียวและค่าแรงดึงที่ได้จาก การเชื่อมสตัด ..... 90