พอสมุดกลาง ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

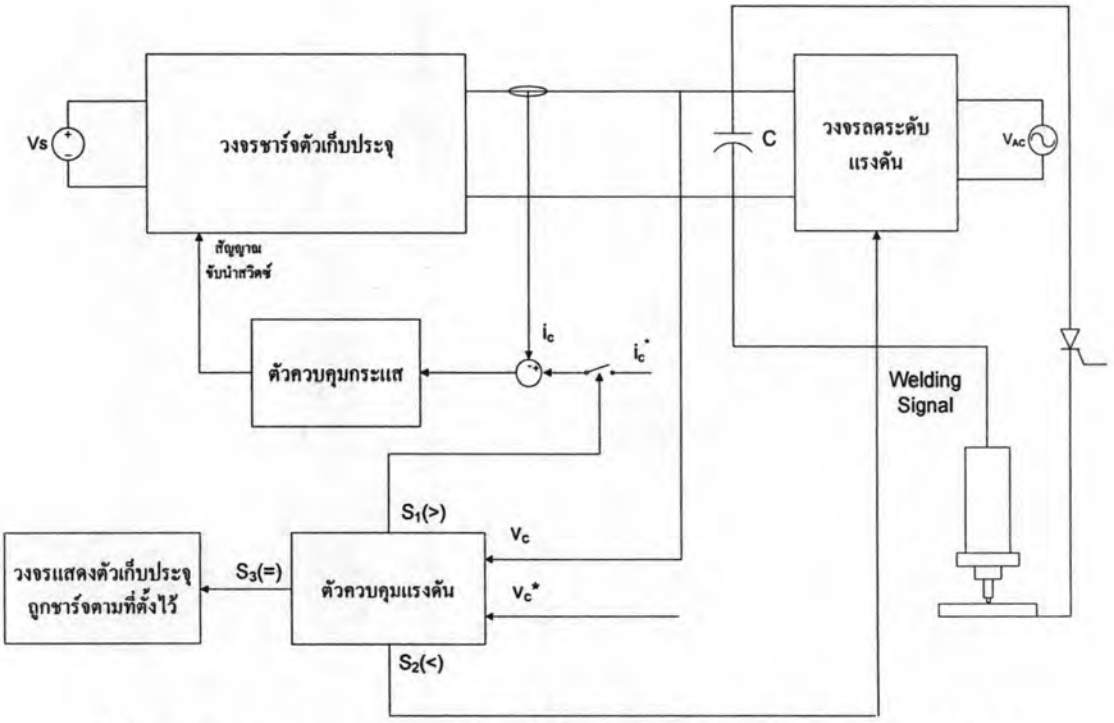
บทที่ 3

การออกแบบอุปกรณ์การทดลองเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบอุปกรณ์การเชื่อมสตัดและการออกแบบการทดลองการเชื่อมสตัด เพื่อใช้ในการทดสอบอุปกรณ์และใช้พิจารณาผลของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับการเชื่อม

3.1 บล็อกไดอะแกรมอุปกรณ์การเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ

อุปกรณ์การเชื่อมสตัดประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟการเชื่อมสตัดและปืนเชื่อมสตัด โดยตัวอุปกรณ์มีรูปแบบการทำงานดังรูปที่ 3.1



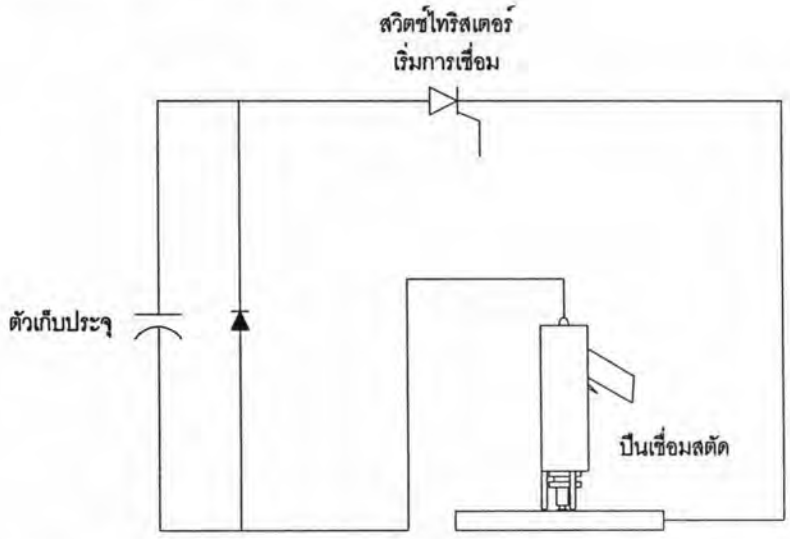
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมอุปกรณ์การเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ

แหล่งจ่ายไฟการเชื่อมสตัดทำหน้าที่ควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุให้เป็นไปตามที่ต้องการ การทำงานของแหล่งจ่ายไฟการเชื่อมสตัดประกอบด้วยวงจรชาร์จตัวเก็บประจุ ทำหน้าที่ชาร์จตัวเก็บประจุจนมีระดับแรงดันตามที่ต้องการ วงจรลดระดับแรงดัน ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุในกรณีที่ต้องการลดแรงดันการเชื่อมและทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเป็นศูนย์ในกรณีที่ไม่มีการใช้งาน และวงจรควบคุมทำหน้าที่ควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุให้มีค่าตามที่ปรับตั้งไว้ และทำหน้าที่ควบคุมลำดับการทำงานของอุปกรณ์การเชื่อมสตัด

นอกจากตัวควบคุมแรงดันแล้วแหล่งจ่ายไฟยังมีตัวควบคุมการทำงานคอยลำดับการทำงานในกระบวนการเชื่อมสตัดได้แก่การรับสัญญาณและควบคุมปืนเชื่อมสตัด การขับนำสวิตช์ไทริสเตอร์ และการลำดับการทำงานของแหล่งจ่ายไฟ

3.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และการเลือกอุปกรณ์การเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ

ในที่นี้จะเสนอการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมสตัดได้แก่ ความจุไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม และการเลือกอุปกรณ์การทำงานการเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ อันได้แก่ สวิตช์ไทริสเตอร์และปืนเชื่อมสตัด (รูปที่ 3.2)

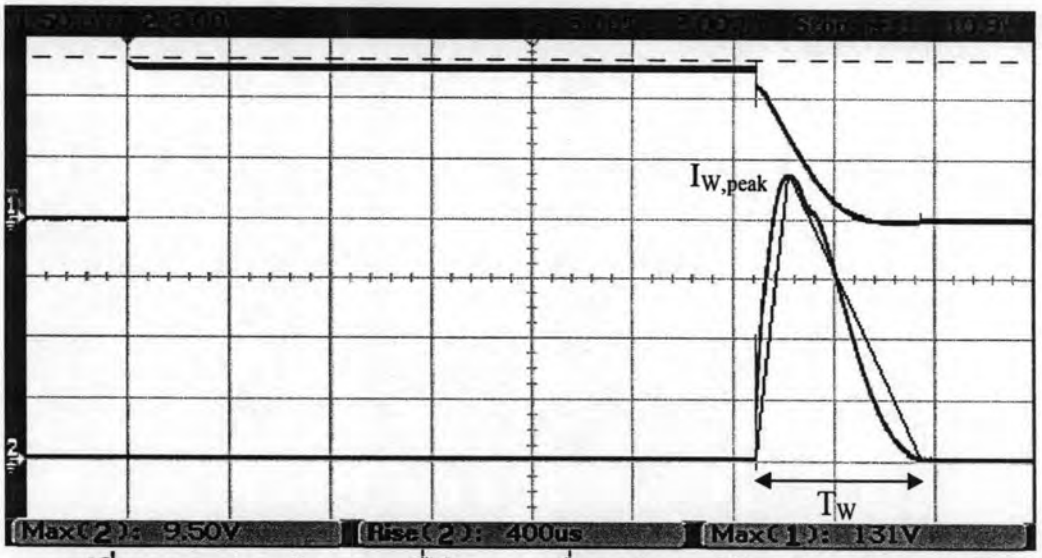


รูปที่ 3.2 อุปกรณ์การทำงานของอุปกรณ์เชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ

การทำงานของอุปกรณ์การเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุทำหน้าที่เก็บพลังงานไฟฟ้าและสร้างพัลส์กระแสที่ใช้ในการเชื่อม สวิตช์ไทริสเตอร์ทำหน้าที่ต่อวงจรโหลดการเชื่อมกับตัวเก็บประจุเพื่อทำให้เกิดการดิสชาร์จ ปืนเชื่อมสตัดทำหน้าที่ขับดันสลักเกลียวลงบนแผ่นโลหะฐานเพื่อให้เกิดการอาร์คและเชื่อมติด และไดโอดป้องกันทำหน้าที่ป้องกันตัวเก็บประจุถูกไบแอสย้อนกลับทั้งขณะชาร์จตัวเก็บประจุและขณะดิสชาร์จตัวเก็บประจุ กระบวนการเชื่อมสตัดจะใช้การต่อขั้วตรง (straight polarity) โดยต่อกราวด์การเชื่อมกับแผ่นโลหะฐานไว้ที่ขั้วบวก และต่อปืนเชื่อมสตัดกับเกลียวไว้ที่ขั้วลบ

3.2.1 การกำหนดค่าความจุไฟฟ้า

การกำหนดค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ จะพิจารณาจากค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องเชื่อมสตัด Köco KST8 ดังนี้



รูปที่ 3.3 กราฟแรงดัน-กระแสที่ได้จากการเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 3.3 ค่ากระแสการเชื่อมจะถูกนำมาพิจารณาค่าประจุไฟฟ้าที่ได้จากการดิสชาร์จ โดยการประมาณเป็นกราฟสามเหลี่ยม ค่าประจุไฟฟ้าที่ได้จากการเชื่อมสามารถพิจารณาได้จากสมการ

$$Q = \frac{1}{2} I_{W,peak} T_W$$

และสามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้าได้จากสมการ

$$C = \frac{Q}{V_C}$$

จากรูปแสดงการเชื่อมที่ค่าแรงดัน V_C = 124 V ได้กระแสการเชื่อม $I_{W,peak}$ = 5737 A และคาบการไหลของกระแส T_W = 3.24 mS ได้ว่า

$$Q = \frac{1}{2} \cdot (5737A) \cdot (3.24mS)$$
$$= 9.29\,\text{c}$$

และ
$$C = \frac{9.29}{124}$$
$$= 74{,}919uF$$

ค่าแรงดันที่ใช้ในการเชื่อมจะอยู่ระหว่าง 50-170 V

ในที่นี้เลือกใช้ค่าความจุไฟฟ้าขนาด 16,000 µF 250 VDC จำนวน 5 ตัว มีค่าความจุไฟฟ้ารวม 80,000 µF กำหนดค่าแรงดันการใช้งานไว้ที่ 70% ของค่าแรงดันพังทลาย โดยกำหนดค่าแรงดันการเชื่อมระหว่าง 0-170 V

3.2.2 การเลือกสวิตช์ไทริสเตอร์

สวิตช์ไทริสเตอร์มีพิกัดการทำงานหลายอย่างด้วยกัน ในการเลือกสวิตช์ไทริสเตอร์สำหรับการเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ จะพิจารณาจากพิกัดทนแรงดันไปหน้าและพิกัดทนแรงดันย้อนกลับ $V_{DRM,RRM}$ พิกัดกระแสเสิร์จ I_{TSM} พิกัดฟิวส์ I^2t

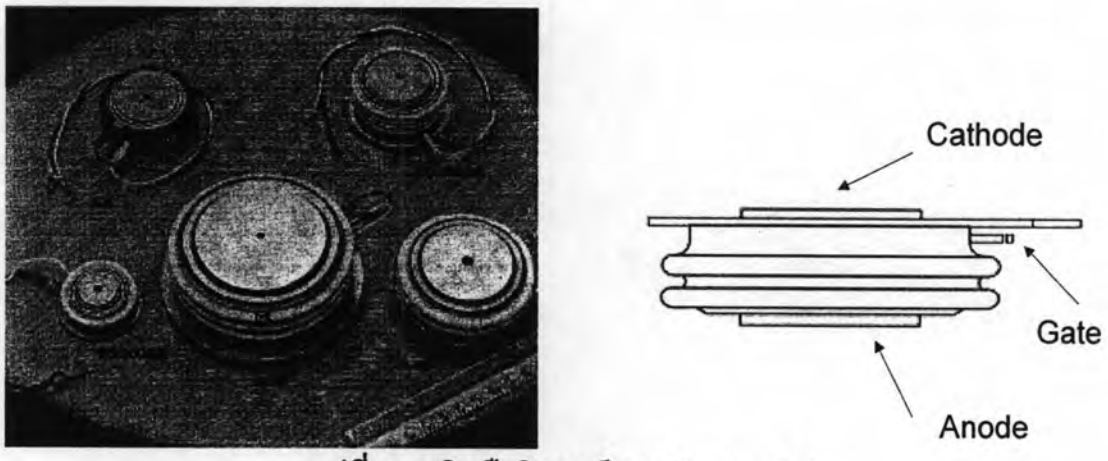
ตารางที่ 3.1 พิกัดที่ได้จากการทดสอบและพิกัดการใช้งานสวิตช์ไทริสเตอร์

พิกัดสวิตช์ไทริสเตอร์	พิกัดใช้งานสูงสุด	พิกัดเลือกใช้งาน
$V_{DRM,RRM}$ (V)	170	250
I_{TSM} (A)	8808	8808
I^2t (A^2S)	135×10^3	270×10^3

ในที่นี้เลือกใช้สวิตช์ไทริสเตอร์แบบ Hockey-Puk เบอร์ ST330C12C มีพิกัดการทำงานดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พิกัดการใช้งานสวิตช์ไทริสเตอร์แบบ Hockey-Puk เบอร์ ST330C12C

$V_{DRM,RRM}$ (V)	dI_T/dt (A/S)	I_{TSM} (A)	I^2t (A^2S)
1200	1000	9000	405×10^3

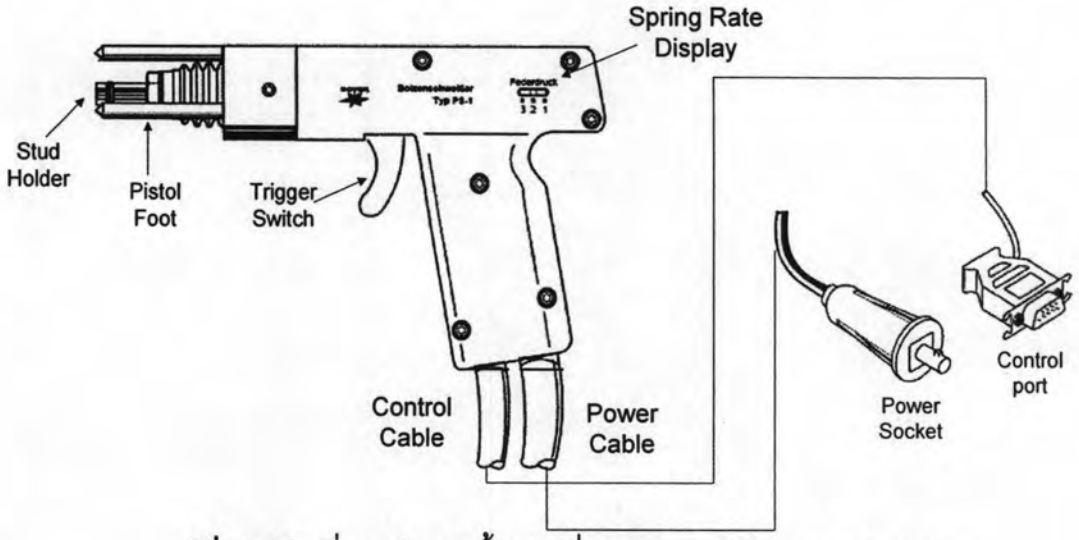


รูปที่ 3.4 สวิตช์ไทริสเตอร์แบบ Hockey-Puk

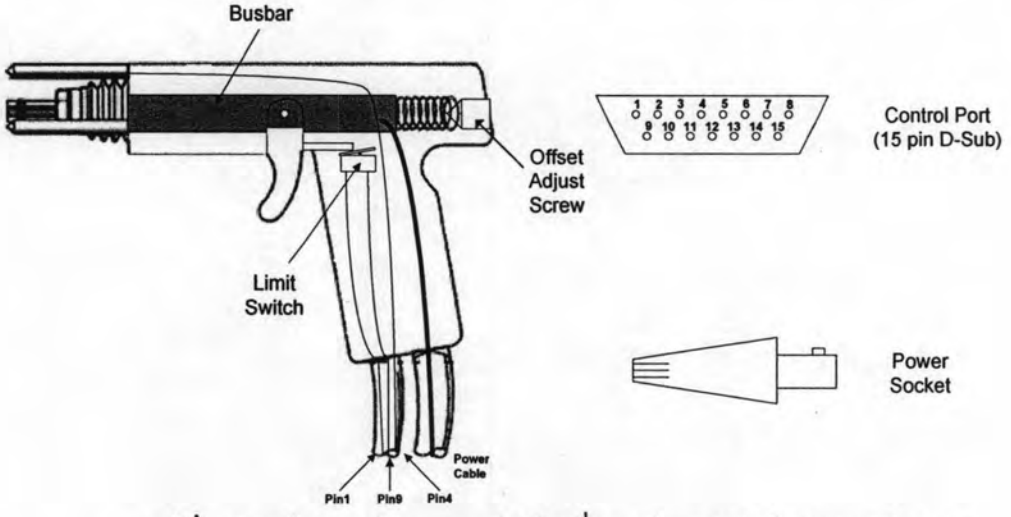
โดยส่วนใหญ่สวิตช์ไทริสเตอร์แบบ Hockey-Puk (รูปที่ 3.4) จะมีพิกัดทนแรงดันไปหน้า-ย้อนกลับ $V_{DRM,RRM}$ ดังนั้นพิกัดกระแสเสิร์จและพิกัดฟิวส์จึงมีความสำคัญในการเลือกใช้สวิตช์ไทริสเตอร์

3.2.3 ปืนเชื่อมสตัด

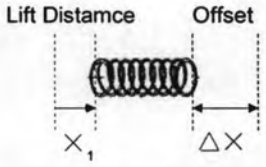
ปืนเชื่อมสตัดเป็นอุปกรณ์สำหรับจับและขับดันสลักเกลียวไปติดกับแผ่นโลหะฐาน ในที่นี้จะใช้ปืนเชื่อมสตัดของบริษัท Soyer รุ่น PS-1 ที่ใช้สำหรับกระบวนการเชื่อมสตัดแบบเริ่มต้นเว้นช่องว่าง (initial gap) โดยปืนเชื่อมสตัดมีการทำงานดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ปืนเชื่อมสตัดและขั้วสายเชื่อมต่อของบริษัท Soyer รุ่น PS-1



รูปที่ 3.6 กลไกการทำงานภายในปืนเชื่อมสตัดของบริษัท Soyer รุ่น PS-1



รูปที่ 3.7 ระยะออฟเซตและระยะยกของสปริง

จากรูปแสดงปืนเชื่อมสตัดจากบริษัท Soyer รุ่น PS-1 ตัวปืนเชื่อมสตัดจะใช้การง้างไกเพื่อดึงตัวจับสลักเกลียว (stud holder) แทนการใช้ขดลวดโซลินอยด์ (รูปที่ 3.6) สปริงที่ใช้ขับดันตัวจับสลักเกลียวมีค่าคงตัวสปริง k =2.34 kN/m ขณะง้างไกปลายหัวต่อ (tip) จะถูกยกขึ้นจากแผ่นโลหะฐานประมาณ 4 มิลลิเมตร สลักเกลียวจะถูกขับดันลงบนแผ่นโลหะฐานหลังง้างไกปืนเชื่อมจนสุด ตัวปืนเชื่อมสตัดสามารถปรับระยะออฟเซต Δx ได้ 3 ระดับ (รูปที่ 3.7) ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ระดับการตั้งแรงสปริง

ระดับการตั้งแรงสปริง	ระยะออฟเซต Δx (mm)
1	0
2	5
3	10

ในการรับสัญญาณจากปืนเชื่อมสตัด ตัวปืนเชื่อมจะตรวจจับการวางปืนเชื่อมสตัดลงบนแผ่นโลหะฐาน (lay check) โดยการรับสัญญาณจากขาปืนเชื่อมและส่งไปยังพอร์ตควบคุม (control port) ตัวลิมิตสวิตช์ภายในจะตรวจจับการเหนี่ยวไกปืนเชื่อมสตัด (trigger) เมื่อไกปืนเชื่อมถูกง้างจนสุดและสลักเกลียวเริ่มถูกขับดันลงมาตัวลิมิตสวิตช์จะถูกต่อวงจร สัญญาณขาออกจากลิมิตสวิตช์จะถูกส่งไปยังพอร์ตควบคุม

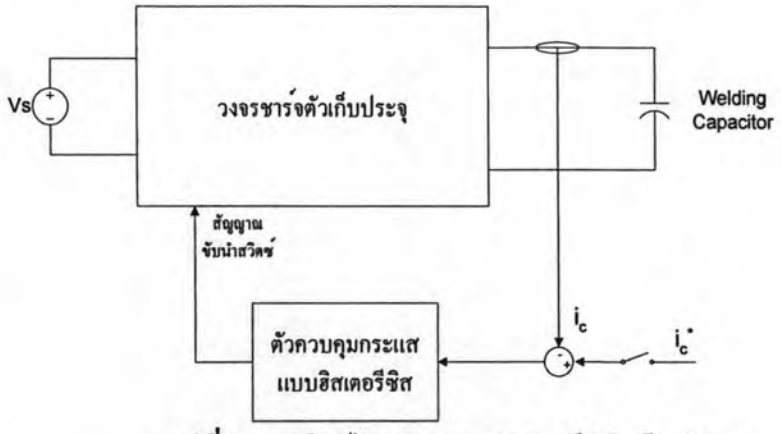
ปืนเชื่อมสตัดสามารถเชื่อมสลักเกลียวได้ตั้งแต่ขนาด M2-M8 โดยสามารถใช้กับสลักเกลียวชนิดที่เป็นเหล็ก สเตนเลส อลูมิเนียมและทองเหลือง

3.3 วงจรแหล่งจ่ายไฟการเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุ

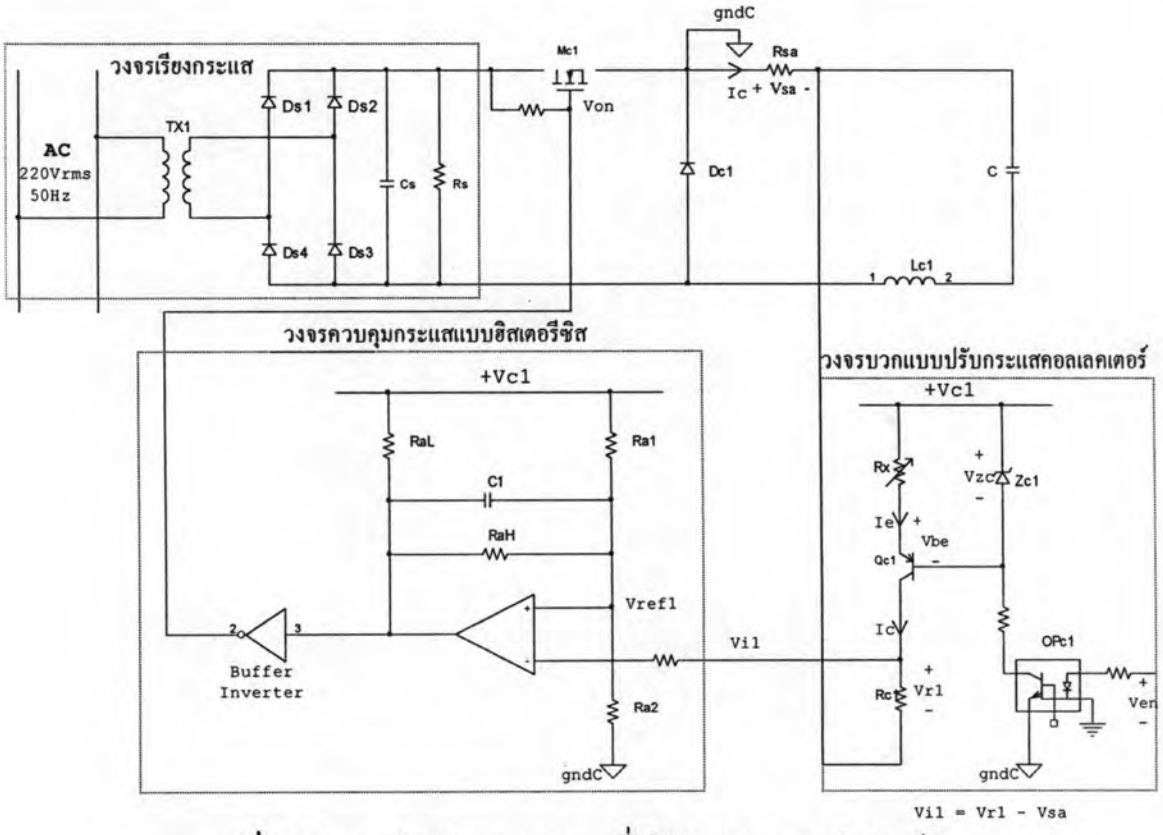
ในที่นี้จะกล่าวถึงวงจรการทำงานของแหล่งจ่ายไฟการเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุประกอบด้วยวงจรชาร์จตัวเก็บประจุ วงจรลดระดับแรงดัน วงจรขับนำสวิตช์ไทริสเตอร์ และวงจรตรวจจับสถานะปืนเชื่อมสตัด

3.3.1 วงจรชาร์จตัวเก็บประจุ

การเชื่อมสตัดแบบใช้การดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุจำเป็นต้องมีการชาร์จตัวเก็บประจุและการควบคุมแรงดัน อย่างไรก็ตามโหลดตัวเก็บประจุขนาดใหญ่จะมีลักษณะลัดวงจร ขณะเริ่มต้นชาร์จตัวเก็บประจุ จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมกระแสขณะชาร์จตัวเก็บประจุ ในที่นี้จะใช้วงจรสวิตช์ควบคุมกระแส และตัวควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิสในการชาร์จตัวเก็บประจุ เพื่อเก็บพลังงานไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมสตัด (รูปที่ 3.8)



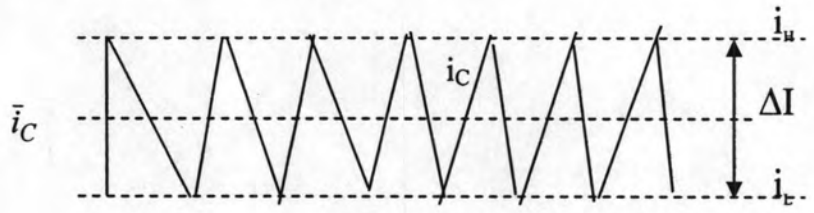
รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมวงจรชาร์จตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.9 วงจรสวิตช์ควบคุมกระแสที่ใช้ตัวควบคุมแบบฮิสเตอรีซิส

รูปที่ 3.9 แสดงวงจรชาร์จตัวเก็บประจุที่ใช้ตัวควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิส ภาคกำลังเป็นวงจรสวิตช์ควบคุมกระแสคล้ายวงจรทอนระดับ สวิตช์ M_{C1} ทำหน้าที่ควบคุมกระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ L_{C1} ทำหน้าที่ดึงกระแสไหลเข้าตัวเก็บประจุไม่ให้เปลี่ยนแปลงเร็วเกินไป และไดโอด D_{C1} ทำหน้าที่เป็นทางผ่านให้กระแสในตัวเหนี่ยวนำไหลต่อเนื่อง (freewheel) ขณะสวิตช์ M_{C1} เปิดวงจร ตัวต้านทานค่าเล็ก R_{SA} ใช้สุ่มกระแสไหลเข้าตัวเก็บประจุเพื่อส่งไปให้ตัวควบคุม

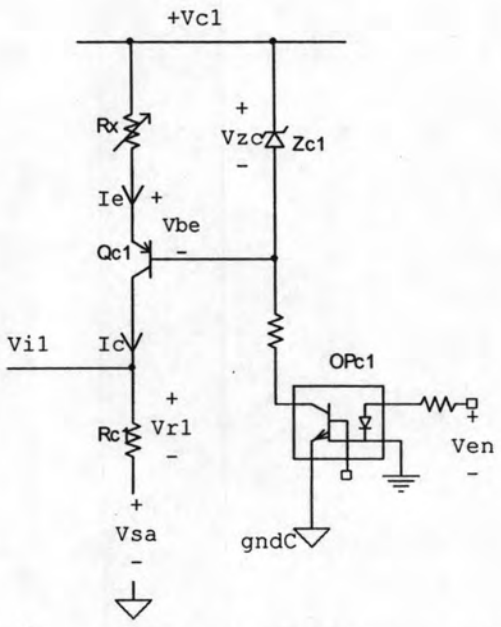
3.3.1.1 การควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิส



รูปที่ 3.10 การควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิส

รูปที่ 3.10 แสดงการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิส กระแสชาร์จตัวเก็บประจุ i_C ที่ไหลผ่านความต้านทาน R_{SA} จะถูกควบคุมให้ไหลในช่วงแถบฮิสเตอรีซิส ΔI ค่าหนึ่ง [9] เริ่มแรกสวิตช์ M_{C1} จะถูกไบแอสให้ต่อวงจร กระแสไหลเข้าตัวเก็บประจุจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อกระแสชาร์จตัวเก็บประจุมีค่าสูงกว่าค่ากระแสขอบบน I_H แล้ว สวิตช์ M_{C1} จะถูกหยุดขับนำ กระแสชาร์จตัวเก็บประจุ i_C จะมีค่าลดลง จนกระทั่งเมื่อกระแสชาร์จตัวเก็บประจุมีค่าต่ำกว่าค่า กระแสขอบล่าง I_L สวิตช์ M_{C1} จะถูกขับนำใหม่ เพื่อให้กระแสชาร์จประจุ i_C เพิ่มขึ้น ในการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิสกระแสโหลด i_C จะไหลอยู่ในช่วงใดช่วงหนึ่ง และได้กระแสชาร์จประจุเฉลี่ยตามสมการ

$$\bar{i}_C = \frac{I_H + I_L}{2}$$



รูปที่ 3.11 วงจรบวกแบบปรับกระแสคอลเลกเตอร์

3.3.1.2 วงจรบวกแบบปรับกระแสคอลเลกเตอร์

วงจรบวกแบบปรับกระแสคอลเลกเตอร์จะทำหน้าที่กำหนดออฟเซตการสุ่มกระแส วงจรทำงานโดยการคงค่าแรงดันตกคร่อมความต้านทานที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ Q1 โดยใช้ไดโอดซีเนอร์ Z_{C1} ค่าแรงดันตกคร่อมความต้านทานปรับค่าได้ R_X จะถูกคงค่าเป็น V_{ZC}-V_{BE} การปรับความต้านทานปรับค่าได้ R_X จะส่งผลให้กระแสอิมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_{C1} เปลี่ยนแปลงเป็นผลให้กระแสคอลเลกเตอร์ที่ผ่านความต้านทาน R_{C1} มีค่าเปลี่ยนแปลงตาม กระแสคอลเลกเตอร์จะไหลผ่านความต้านทาน R_{C1} ผ่านความต้านทานค่าต่ำ R_{SA} และไหลลงกราวด์ในวงจรชาร์จตัวเก็บประจุ ค่าแรงดันขาเข้าของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ (V_{i1}) มีค่า

$$V_{i1} = V_{r1} - V_{SA}$$

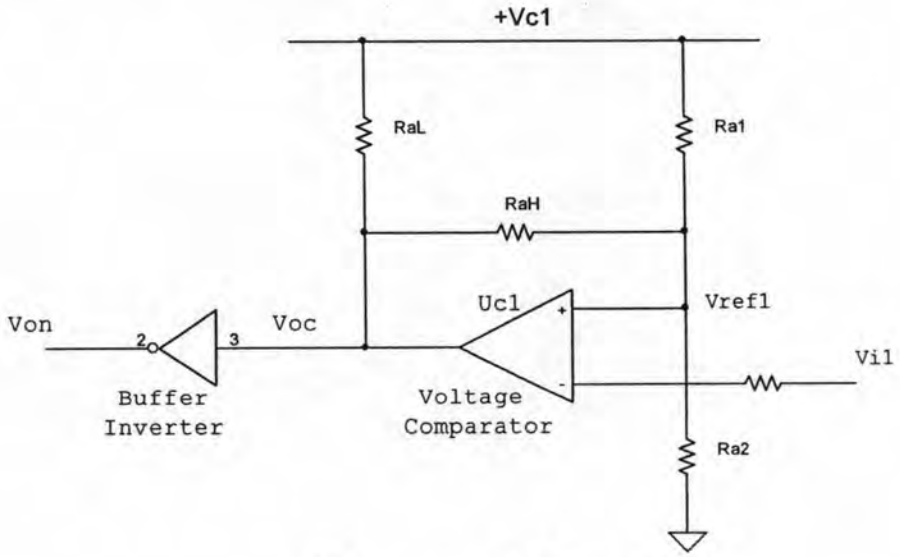
เมื่อ V_{r1} คือแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_{C1} มีค่า $V_{r1} = (V_Z - V_{BE}) \cdot \frac{R_{C1}}{R_X}$

V_{SA} คือแรงดันสุ่มกระแสชาร์จตัวเก็บประจุ มีค่า $V_{SA} = I_C \cdot R_{SA}$

ในที่นี้ตัวเชื่อมโยงผ่านแสง OP_{C1} จะทำหน้าที่กำหนดการทำงานของวงจรบวกและการไหลของกระแสชาร์จประจุในวงจรชาร์จตัวเก็บประจุ โดยรับสัญญาณมาจากตัวควบคุมแรงดัน

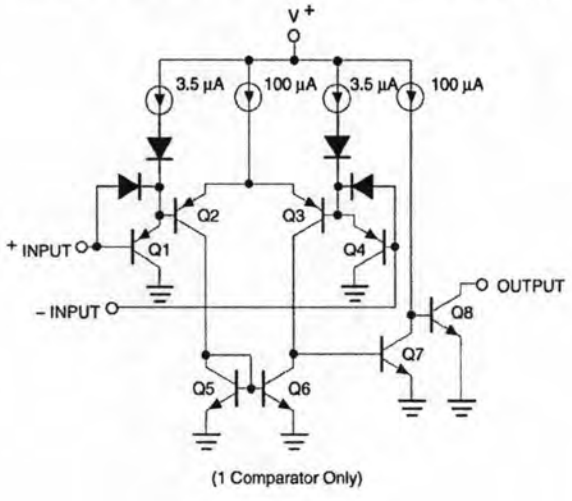
3.3.1.3 วงจรควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิส

ในการควบคุมกระแสชาร์จประจุ I_C ให้อยู่ภายในแถบฮิสเตอรีซิส จะใช้วงจรชมิตต์ทริกเกอร์รับค่าแรงดันสุ่มกระแส V_i ที่ได้จากวงจรบวก ตัวชมิตต์ทริกเกอร์จะนำค่าแรงดันขาเข้า V_i ไปเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิง V_{REF1} ที่มีลักษณะเป็นแบบฮิสเตอรีซิส เพื่อกำหนดการทำงานของทรานซิสเตอร์ M1 โดยวงจรชมิตต์ทริกเกอร์จะทำงาน ดังรูปที่ 3.12

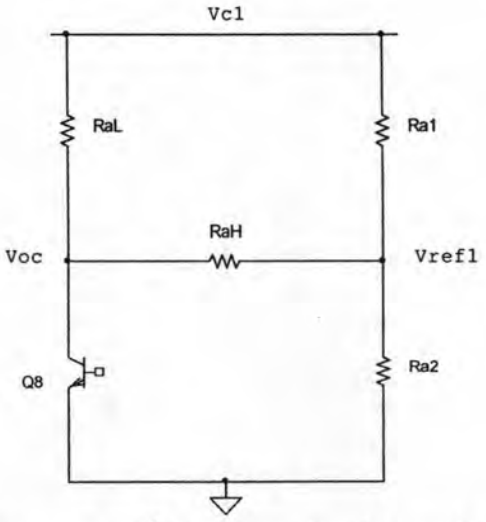


รูปที่ 3.12 วงจรชมิตต์ทริกเกอร์

จากรูปแรงดันขาเข้า (V_{i1}) ที่ได้จากวงจรบวกจะถูกส่งให้ขาลบของตัวเปรียบเทียบแรงดัน (voltage comparator) U_{C1} (รูปที่ 3.13) เพื่อนำค่าแรงดันขาเข้าไปเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิง V_{REF1} เนื่องจากวงจรด้านบวกของตัวเปรียบเทียบแรงดันจะเป็นแบบเปิดวงจรที่ขาคอลเลกเตอร์ (open collector) จึงจำเป็นต้องมีตัวต้านทาน R_{aL} ต่อกับไฟเลี้ยง V_{C1} เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสที่ขาออกของตัวเปรียบเทียบแรงดัน (V_{OC})



รูปที่ 3.13 วงจรภายในของตัวเปรียบเทียบแรงดัน U_{C1} (ทรานซิสเตอร์ขาออก Q8 ถูกเปิดวงจรที่ขาคอลเลกเตอร์ (open collector))



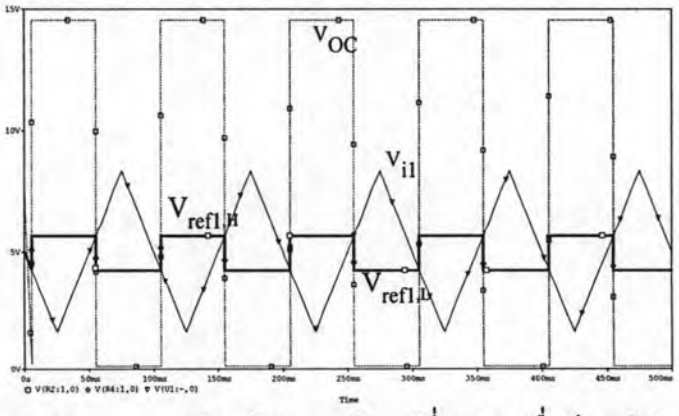
รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลที่ได้จากวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ในรูปที่ 3.12

รูปที่ 3.14 เป็นวงจรสมมูลที่ได้จากวงจรในรูปที่ 3.12 Q8 คือทรานซิสเตอร์ขาออกของตัวเปรียบเทียบแรงดัน U_{C1} จากรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่ามีการป้อนกลับไปยังขาไม่กลับเฟสของตัวเปรียบเทียบแรงดัน U_{C1} เป็นผลให้ค่าแรงดันเปรียบเทียบ V_{REF1} มีค่าเปลี่ยนไปตามค่าแรงดันขาออก V_{OC} ขณะที่แรงดันขาออกมีค่าเป็นลอจิกสูง ($V_{OC}=V_{C1}$) ทรานซิสเตอร์ขาออก Q8 จะถูกเปิดวงจร เป็นผลให้ตัวต้านทาน R_{a1} ถูกต่อขนานโดยตัวต้านทาน R_{aH} และ R_{aL} และความต้านทานแบ่งแรงดัน R_{a1} ที่ขาแรงดันไม่กลับเฟสมีค่าเปลี่ยนแปลงเป็น $R_{a1}' = R_{a1} // (R_{aH} + R_{aL})$ และแรงดัน V_{REF1}ที่ขาไม่กลับเฟสของตัวเปรียบเทียบแรงดัน U_{C1} จะมีค่าเป็น

$V_{REF1,H} = \frac{R_{a2}}{R_{a1}'+R_{a2}} \cdot V_{C1}$ และขณะที่แรงดันขาออกของตัวเปรียบเทียบแรงดัน U_{C1} มีค่าเป็นลอจิกต่ำ (Low) ทรานซิสเตอร์ขาออก Q8 จะอิ่มตัว เป็นผลให้ความต้านทาน R_{aH} และ R_{aL} เสมือนถูกต่อลงกราวด์ ในที่นี้ความต้านทาน R_{a2} จะถูกต่อขนานโดยความต้านทาน R_{aH} ได้ว่า $R_{a2}' = R_{a2} // R_{aH}$ และแรงดัน V_{REF1} ที่ขาไม่กลับเฟสจะเปลี่ยนแปลงเป็น $V_{REF1,L} = \frac{R_{a2}'}{R_{a1} + R_{a2}'} V_{C1}$ (ตารางที่ 3.4)

ตารางที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง V_{REF1} เนื่องจากการป้อนกลับ

V_{oc} - high	V_{oc} - low
$R_{a1}' = \frac{1}{\frac{1}{R_{a1}} + \frac{1}{R_{aH} + R_{aL}}}$	$R_{a2}' = \frac{1}{\frac{1}{R_{a2}} + \frac{1}{R_{aH}}}$
$V_{ref1,H} = \frac{R_{a2}}{R_{a1}'+R_{a2}} V_{C1}$	$V_{ref1,L} = \frac{R_{a2}'}{R_{a1} + R_{a2}'} V_{C1}$

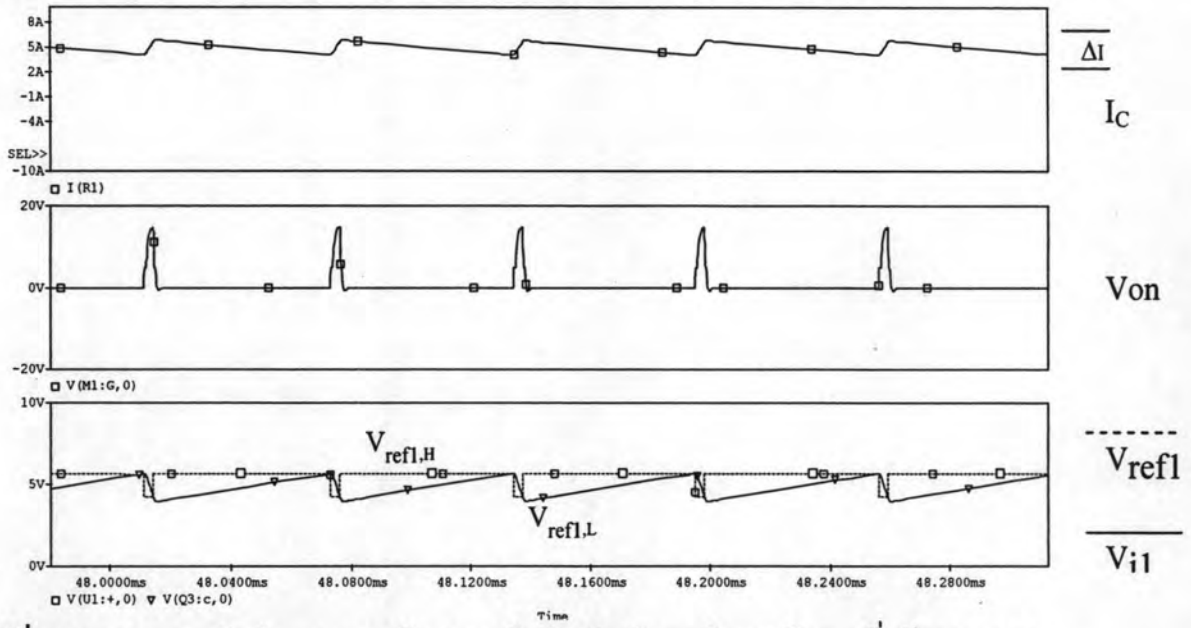


รูปที่ 3.15 แรงดันขาออกของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ในรูปที่ 3.12 (เมื่อมีการใส่แรงดันขาเข้าแบบสามเหลี่ยมเข้าไป (เส้นปกติ) แทนแรงดันขาเข้า V_{i1} (เส้นทึบ) แทนแรงดันอ้างอิง V_{REF1} (เส้นประ) แทนแรงดันขาออก V_{OC})

จากรูปที่ 3.15 จะเห็นได้ว่าแรงดัน V_{REF1} มีค่าเปลี่ยนแปลงตามแรงดันขาออก V_{OC} ของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ เมื่อแรงดันขาออกมีค่าเป็นลอจิกต่ำ (Low) แรงดัน V_{REF1} จะมีค่าเป็น $V_{REF1} = V_{REF1,L}$ และเมื่อแรงดันขาออกมีค่าเป็นลอจิกสูง (High) แรงดัน V_{REF1} จะมีค่าเป็น $V_{REF1} = V_{REF1,H}$

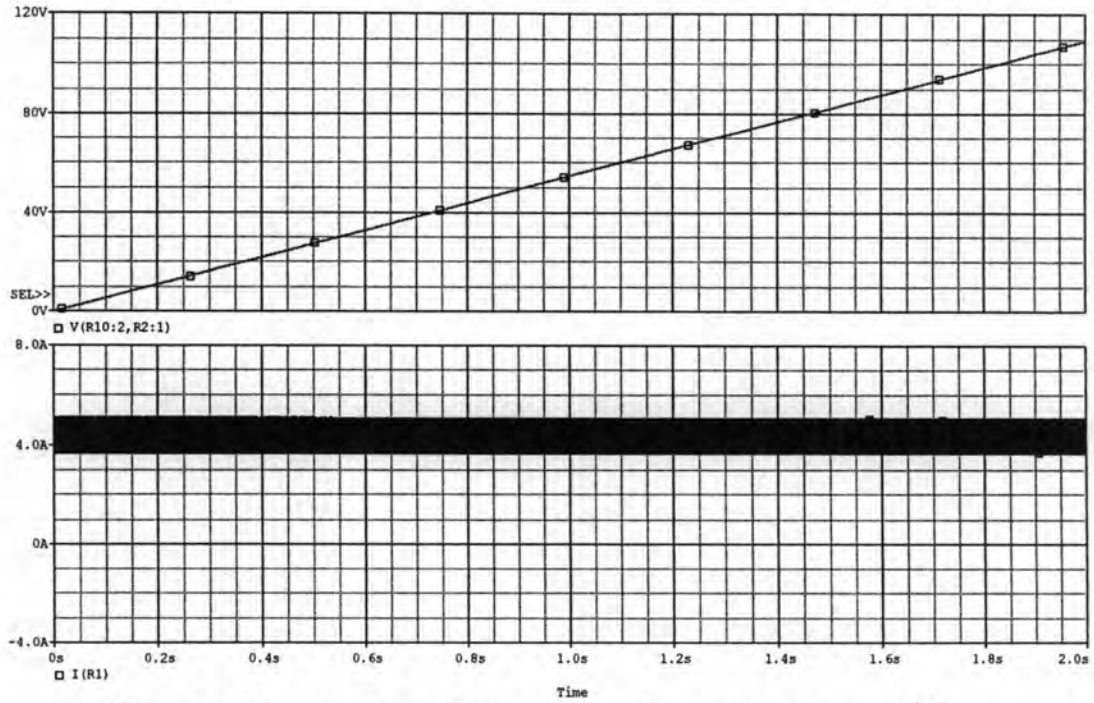
อนึ่งเกตอินเวอร์เตอร์ที่ขาออกของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์จะทำหน้าที่กลับลอจิกในการขับนำสวิตช์ MOSFET M_{C1} เนื่องจากการสุ่มกระแสมีลักษณะการสุ่มแบบลบ

3.3.1.4 ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสที่ได้จากการควบคุมแบบฮิสเตอรีซิส

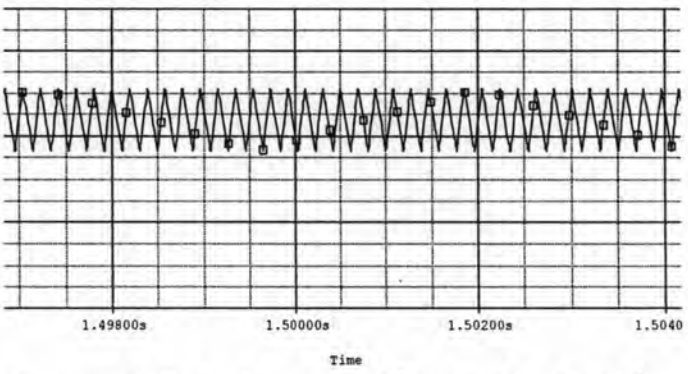


รูปที่ 3.16 กระแสชาร์จประจุ i_C และสัญญาณขับนำสวิตช์ทรานซิสเตอร์ M_{C1} เมื่อมีการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิส (กราฟบนแสดงกระแสชาร์จประจุ i_C กราฟกลางแสดงสัญญาณขับนำสวิตช์ V_{ON} กราฟล่าง (เส้นประ) แสดงแรงดันอ้างอิง V_{REF1} (เส้นปกติ) แสดงแรงดันขาเข้าตัวเปรียบเทียบแรงดัน(V_{i1}))

รูปที่ 3.16 แสดงกระแสโหลด i_C เมื่อมีการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิส รูปกลางคือสัญญาณขับนำสวิตช์ M_{C1} ในวงจรชาร์จตัวเก็บประจุ (V_{ON}) จะเห็นได้ว่ากระแสชาร์จตัวเก็บประจุ I_C จะอยู่ในแถบฮิสเตอรีซิส ΔI ค่าหนึ่ง โดยกระแสจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อแรงดันขาเข้า V_{i1} มีค่าสูงกว่าแรงดันเปรียบเทียบ $V_{REF1,H}$ และจะมีค่าต่ำลงเมื่อแรงดันขาเข้า V_{i1} มีค่าต่ำกว่าแรงดันเปรียบเทียบ $V_{REF1,L}$ เกตอินเวอร์เตอร์ที่ขาออกของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์จะทำหน้าที่กลับลอจิกสัญญาณขับนำให้เป็นตรงกันข้าม เนื่องจากกระแสที่ถูกสุ่มเข้ามามีค่าเป็นลบ ทำให้สัญญาณ V_{i1} ที่ได้จะมีลักษณะกลับเฟสกับสัญญาณกระแส นอกจากนี้เกตอินเวอร์เตอร์ยังทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์เพื่อช่วยในการขับนำสวิตช์ M_{C1}



รูปที่ 3.17 กราฟกระแสชาร์จตัวเก็บประจุและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่ได้จากวงจรชาร์จตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.18 กราฟกระแสชาร์จตัวเก็บประจุ (ขยาย) ที่เวลา 1.5 วินาทีหลังเริ่มชาร์จตัวเก็บประจุ

รูปที่ 3.17 แสดงกราฟกระแสชาร์จประจุ I_C และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ V_C เมื่อกำหนดค่ากระแส I_C= 4.5 A ค่าความจุไฟฟ้า C = 80,000 μF แรงดันหม้อแปลง TX1 ด้านทุติยภูมิ 150 Vrms และกำหนดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าในวงจรชาร์จตัวเก็บประจุ (L_{C1}) เป็น 6.8 mH แถบสีดำที่เห็นในรูปด้านล่างคือแถบฮิสเตอรีซิสของกระแสที่เกิดจากการสวิตช์ เห็นได้ว่ากระแสชาร์จประจุจะถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสมการ

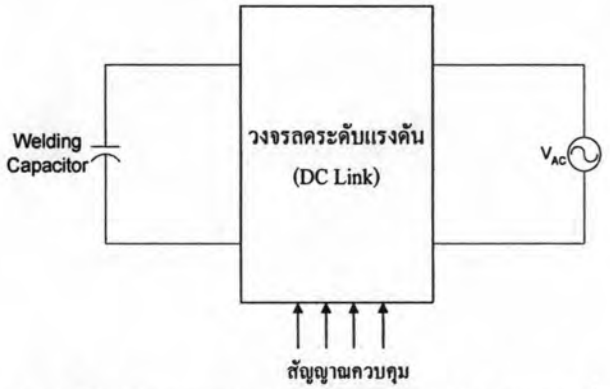
$$V_C = \frac{i_C}{C} \cdot t$$

เมื่อ t คือเวลาเริ่มต้นชาร์จตัวเก็บประจุ

3.2.2 วงจรลดระดับแรงดัน

ในขณะทำการเชื่อมสลักเกลียวอาจจำเป็นต้องมีการลดระดับแรงดันลงมา อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนชนิดหรือขนาดของสลักเกลียวที่ใช้เชื่อม หรือเนื่องจากแผ่นโลหะฐานที่ใช้

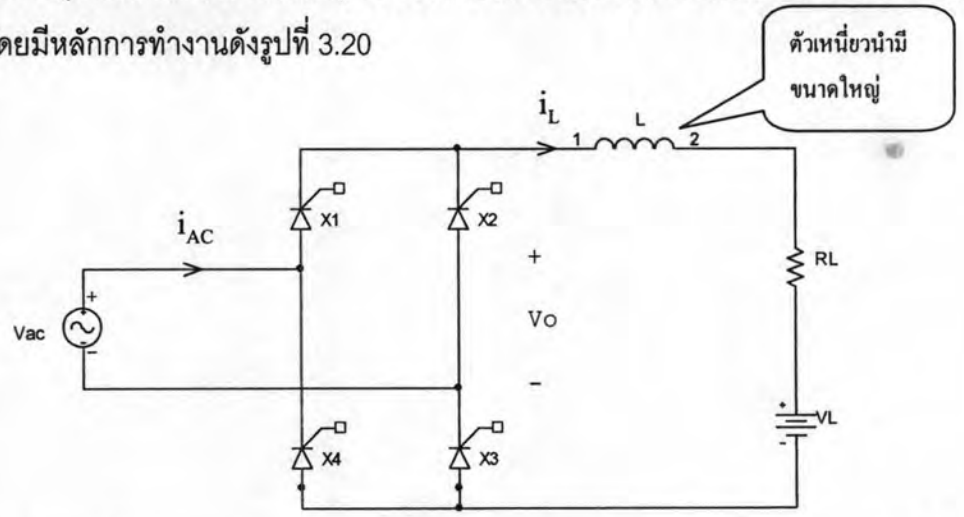
เชื่อมมีความหนาลดลง ในที่นี้การลดระดับแรงดันจะถูกกระทำผ่านวงจรเชื่อมต่อไฟตรง (DC Link) โดยวงจรจะทำหน้าที่ดึงพลังงานออกจากตัวเก็บประจุเมื่อต้องการลดระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และจะคืนพลังงานหลงเหลือในตัวเก็บประจุสู่ระบบไฟฟ้าเมื่อสิ้นสุดหรือไม่มีการใช้งานเครื่องเชื่อมสตัด (รูปที่ 3.19)



รูปที่ 3.19 บล็อกไดอะแกรมการลดระดับแรงดันผ่านการเชื่อมต่อไฟตรง

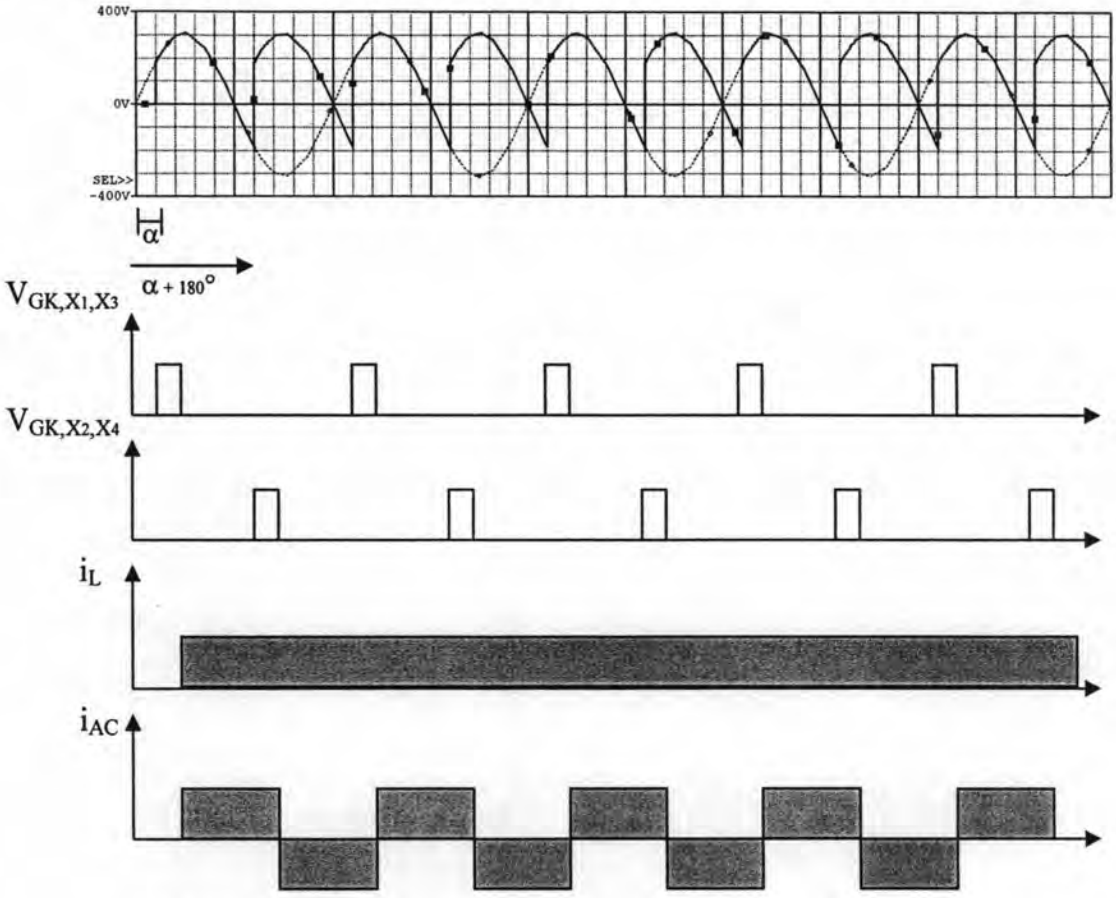
3.3.2.1 **วงจรเรียงกระแสควบคุมเฟส**

ในการออกแบบวงจรลดระดับแรงดันผ่านการเชื่อมต่อไฟตรง (DC Link) วงจรเรียงกระแสควบคุมเฟส (phase-control rectifier) จะทำหน้าที่ลดระดับแรงดัน และคืนพลังงานภายในตัวเก็บประจุ โดยมีหลักการทำงานดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 วงจรเรียงกระแสควบคุมเฟส กำหนดทิศทางกระแส I_{AC} ไหลออกจากแหล่งจ่ายไฟสลับ

รูปที่ 3.20 แสดงวงจรเรียงกระแสควบคุมเฟส วงจรเรียงกระแสแบบใช้สวิตช์ไทริสเตอร์จะต่ออยู่ระหว่างแหล่งจ่ายไฟสลับและโหลดคือความต้านทาน R_L กับแหล่งจ่ายแรงดัน V_L และตัวเหนี่ยวนำ L สมมุติฐานเบื้องต้นว่าตัวเหนี่ยวนำ L มีขนาดใหญ่มาก จนทำให้กระแสโหลด I_L มีค่าคงที่ จากรูปสวิตช์ไทริสเตอร์ X_1 และ X_3 จะถูกจุดชนวนสลับกับสวิตช์ไทริสเตอร์ X_2 และ X_4 โดยอ้างอิงมุมจุดชนวนจากตำแหน่งที่ใช้ได้โอดเป็นสวิตช์แทนสวิตช์ไทริสเตอร์และไดโอดแต่ละคู่เริ่มนำกระแส ($V_{AC} = 0$)



รูปที่ 3.21 แรงดัน-กระแสที่ได้จากวงจรเรียงกระแสควบคุมเฟสเมื่อใช้มุมจุดชนวน 36° (รูปบน (เส้นปกติ) แสดงแรงดันขาออก V_O (เส้นประ) แสดงค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟสลับ V_{AC} รูปที่สอง แสดงแรงดันจุดชนวนสวิตช์ไทริสเตอร์ X_1,X_3 รูปที่สามแสดงแรงดันจุดชนวนสวิตช์ไทริสเตอร์ X_2,X_4 รูปที่สี่แสดงกระแสโหลด I_L และรูปที่ห้าแสดงกระแสฝั่งไฟสลับ I_{AC})

รูปที่ 3.21 แสดงกราฟแรงดัน-กระแสของวงจรเรียงกระแสแบบใช้สวิตช์ไทริสเตอร์ สวิตช์ไทริสเตอร์จะถูกจุดชนวนที่มุมจุดชนวน α โดยมุมจุดชนวนจะถูกสลับกันที่ละคู่ระหว่างมุมจุดชนวน X_1-X_3 และ X_2-X_4 ไทริสเตอร์แต่ละคู่จะถูกจุดชนวนห่างกัน 180° จากรูป (ก) แสดงแรงดันขาออก V_O ของวงจรเรียงกระแสแบบใช้สวิตช์ไทริสเตอร์ เห็นได้ว่าเมื่อเริ่มต้นสวิตช์ไทริสเตอร์จะไม่มีการนำกระแส จนกระทั่งเริ่มมีการจุดชนวนสวิตช์ไทริสเตอร์เป็นครั้งแรก (X_1,X_3) สวิตช์ไทริสเตอร์จะเริ่มนำกระแสเป็นผลให้แรงดันขาออกจากวงจรเรียงกระแสเป็นรูปคลื่นไซน์ตามแรงดันไฟสลับ V_{AC} แรงดันขาออกจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลงตามรูปคลื่นไซน์จนกลายเป็นลบ สวิตช์ไทริสเตอร์จะยังคงนำกระแสแม้แรงดันตกคร่อมเป็นลบเนื่องจากการเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ L จากนั้นสวิตช์ไทริสเตอร์อีกคู่หนึ่ง (X_2,X_4) จะถูกจุดชนวนห่างจากมุมจุดชนวนแรก 180° ที่มุม 180°+α เป็นผลให้สวิตช์ไทริสเตอร์ X_2,X_4 นำกระแส แรงดันขาออกของวงจรเรียงกระแสจะกลับเป็นบวกและเพิ่มขึ้นเป็นรูปไซน์ตามแรงดันไฟสลับ V_{AC}

สวิตช์ไทริสเตอร์แต่ละคู่จะถูกจุดชนวนสลับกัน โดยจุดชนวนห่างกัน 180° เป็นผลให้เกิดการสลับการนำกระแสตามการจุดชนวน ค่าแรงดันเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสแบบใช้สวิตช์ไทริสเตอร์จะมีค่าตามสมการ [9]

$$\langle V_O \rangle = \frac{2V_m}{\pi} COS\alpha$$

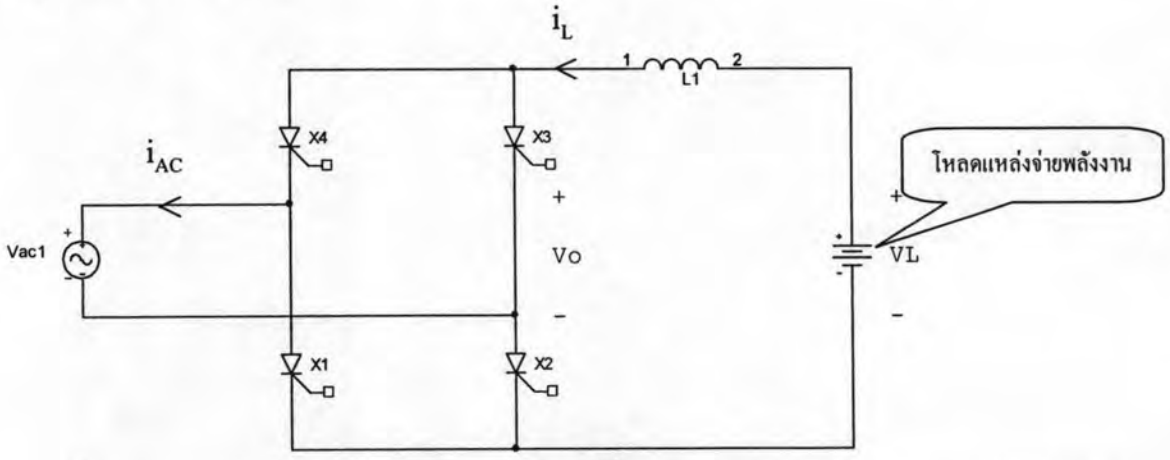
โดย V_m คือแอมพลิจูดสูงสุดของแรงดันไฟสลับ

α คือมุมจุดชนวนเริ่มต้นของสวิตช์ไทริสเตอร์

กระแสโหลดของวงจรเรียงกระแสจะถูกประมาณเป็นค่าคงที่ เนื่องจากการเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ และกระแสจากแหล่งจ่ายไฟสลับจะมีทิศทางสลับกันตามการจุดชนวนสวิตช์ไทริสเตอร์

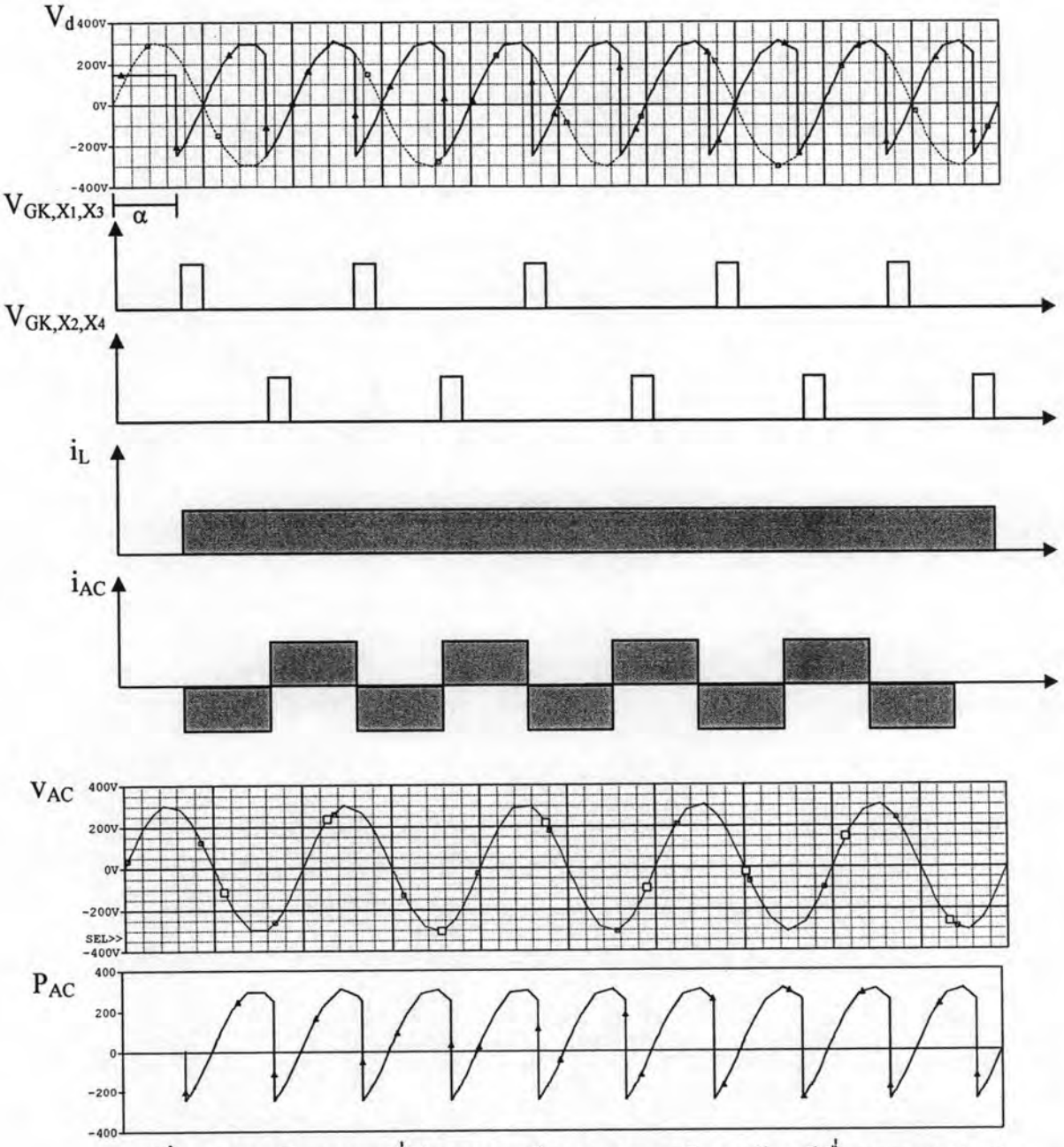
3.2.2.2 วงจรเรียงกระแสภาคอินเวอร์เตอร์

จากที่กล่าวมาเห็นได้ว่าแรงดันเฉลี่ยจะขึ้นกับมุมจุดชนวนสวิตช์ไทริสเตอร์ โดยเมื่อเพิ่มค่ามุมจุดชนวนมากขึ้นจะเป็นผลให้แรงดันขาออกเฉลี่ยมีค่าลดลง และเมื่อมุมจุดชนวนมีค่าเป็น 90° จะส่งผลให้แรงดันขาออกเฉลี่ย $<V_O>$ มีค่าเป็นศูนย์ แต่เมื่อกำหนดมุมจุดชนวน α มากกว่า 90° จะส่งผลให้แรงดันขาออกเฉลี่ยมีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าพลังงานมีการไหลย้อนกลับจากโหลดไปสู่แหล่งจ่ายไฟสลับ



รูปที่ 3.22 วงจรเรียงกระแสภาคอินเวอร์เตอร์ ในที่นี้กำหนดทิศทาง I_{AC} ไหลเข้าแหล่งจ่ายไฟสลับ

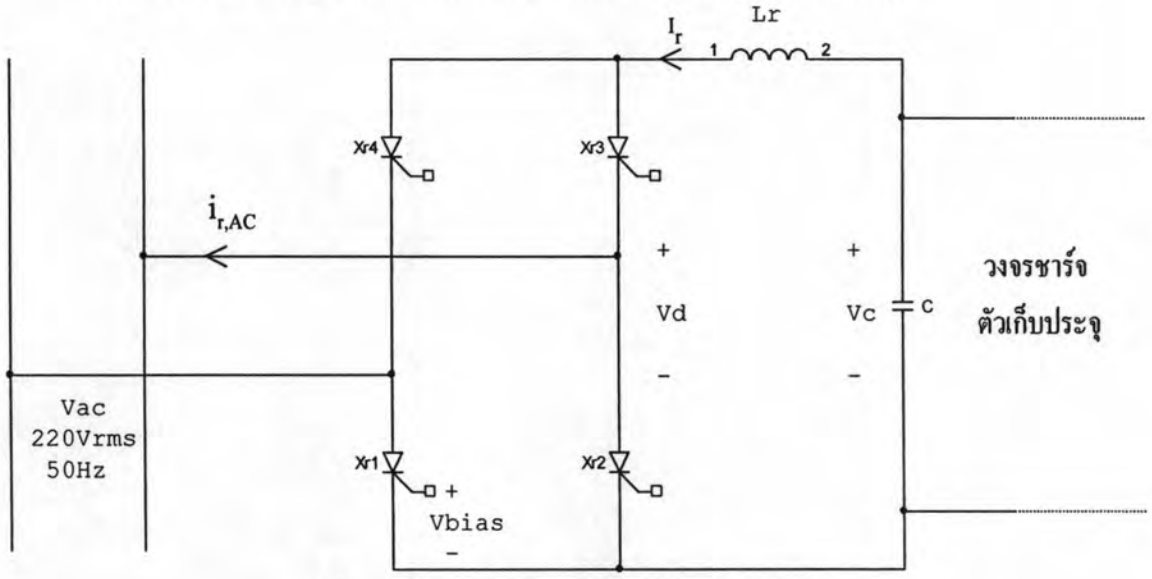
รูปที่ 3.22แสดงวงจรเรียงกระแสภาคอินเวอร์เตอร์ วงจรเรียงกระแสจะถูกวางกลับทิศทางกระแสโหลดจะยังคงไหลในทิศทางเดิม ในที่นี้ $V_d = -V_O$ การทำงานภาคอินเวอร์เตอร์ของวงจรเรียงกระแสควบคุมเฟส โหลดของวงจรเรียงกระแสจะต้องเป็นโหลดจ่ายพลังงานหรือโหลดสะสมพลังงาน และต้องมีมุมจุดชนวนมากกว่า 90° เพื่อให้แรงดันขาออกเฉลี่ย $<V_d>$ มีค่าเป็นบวก ($<V_O>$ มีค่าเป็นลบ) เห็นได้ว่ากระแสโหลด I_L จะไหลเข้าทางด้านบวกของแรงดัน V_d วงจรเรียงกระแสจึงเปรียบเสมือนรับพลังงาน



รูปที่ 3.23 แรงดัน-กระแสที่ได้จากวงจรเรียงกระแสภาคอินเวอร์เตอร์เมื่อมุมจุดชนวน α= 126° (รูปบน (เส้นปกติ) แสดงแรงดันขาออก V_O (เส้นประ) แสดงค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟสลับ V_{AC} รูปที่สองแสดงแรงดันจุดชนวนสวิตช์ไทริสเตอร์ X_1,X_3 รูปที่สามแสดงแรงดันจุดชนวนสวิตช์ไทริสเตอร์ X_2,X_4 รูปทีสี่แสดงกระแสโหลด I_L และรูปที่ห้าแสดงกระแสฝั่งไฟสลับ I_{AC} รูปที่หกแสดงแรงดันไฟสลับ VAC รูปที่เจ็ดแสดงพลังงานไหลเข้าแหล่งจ่ายไฟสลับ ค่าบวกหมายถึงแหล่งจ่ายไฟรับพลังงาน)

จากรูปที่ 3.23 เห็นได้ว่ากระแสไหลเข้าในช่วงที่แรงดันขาออก V_d มีค่าเป็นบวกมากกว่าช่วงที่เป็นลบ เมื่อพิจารณาที่แหล่งจ่ายไฟสลับเห็นได้ว่ากระแสที่ไหลเข้าแหล่งจ่ายไฟสลับส่วนใหญ่มีค่าเป็นบวกช่วงที่แรงดันจากแหล่งจ่ายไฟสลับ V_{AC} มีค่าเป็นบวก และมีค่าเป็นลบช่วงที่แรงดันจากแหล่งจ่ายไฟสลับมีค่าเป็นลบ จากกราฟเห็นได้ว่าในที่นี้แหล่งจ่ายไฟสลับจะมีการรับพลังงาน

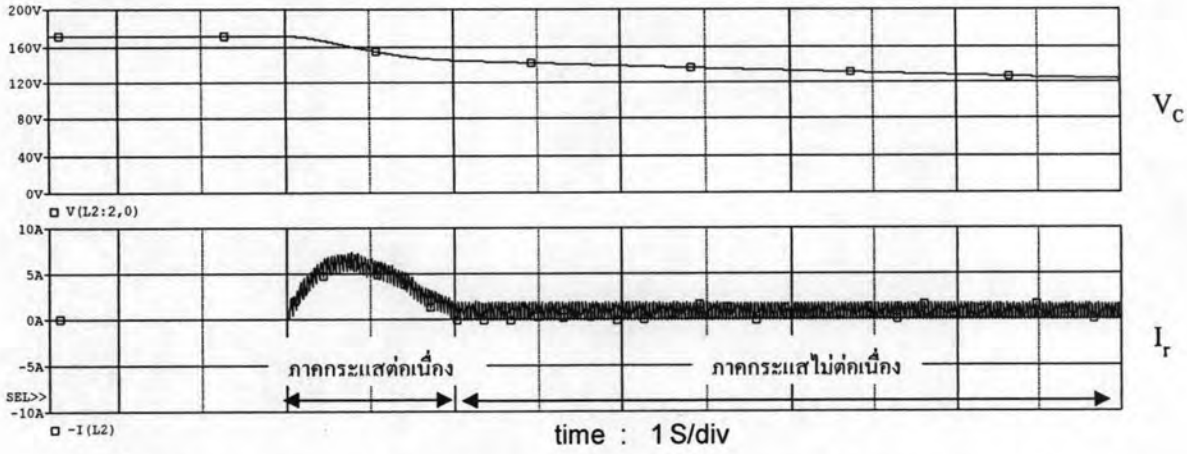
3.3.2.3 การลดระดับแรงดันและการคืนพลังงานจากตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.24 วงจรคืนพลังงานจากตัวเก็บประจุ

ในการลดระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ วงจรเรียงกระแสจะทำงานในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง ในที่นี้จะยังไม่มีการคืนพลังงานจากตัวเก็บประจุสู่แหล่งจ่ายไฟสลับ แต่ในขณะที่ไม่มีการใช้งานหรือหยุดการใช้งานอุปกรณ์การเชื่อม วงจรเรียงกระแสควบคุมเฟสจะทำงานภาคกระแสต่อเนื่อง พลังงานภายในตัวเก็บประจุจะถูกคืนไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับ (รูปที่ 3.24)

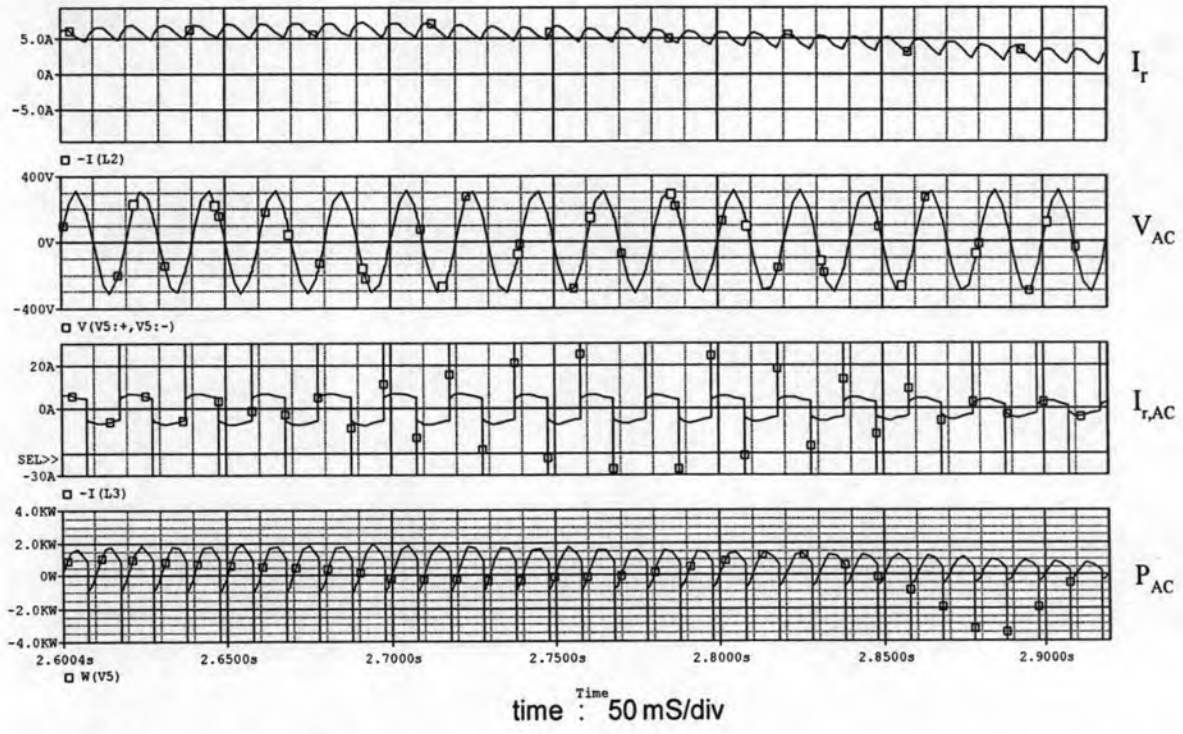
3.3.2.4 ผลการจำลองการลดระดับแรงดันและการคืนพลังงานภายในตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.25 การจำลองการทำงานของวงจรเรียงกระแสควบคุมเฟสที่มุมจุดชนวน 144°

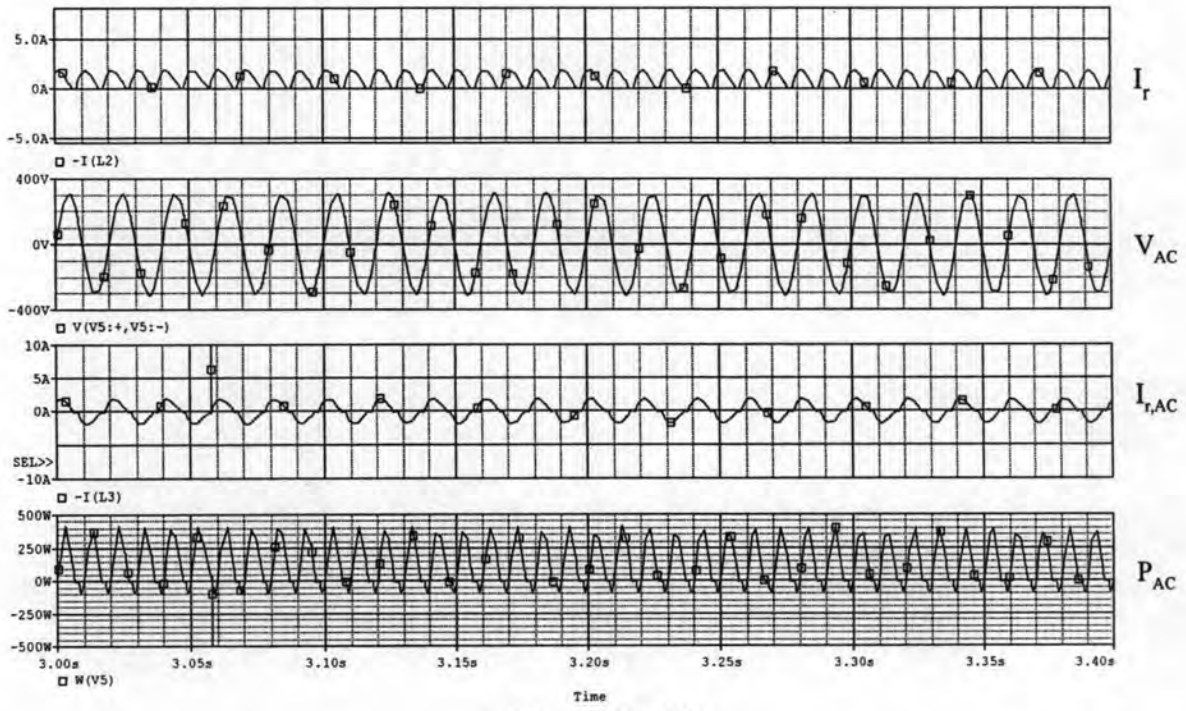
รูปที่ 3.25 แสดงการจุดชนวนลดระดับแรงดัน โดยกำหนดค่าความจุไฟฟ้า 80,000 μF ค่าตัวเหนี่ยวนำ (L_r) 300 mH เริ่มทำการจุดชนวนที่แรงดันเริ่มต้น 170 โวลต์และใช้มุมจุดชนวนที่มุม 144° คงที่ จะเห็นได้ว่าที่เริ่มการจุดชนวน กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะไหลต่อเนื่องและค่อยๆ

เพิ่มสูงขึ้นและค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_C) จะลดลง เมื่อกระแสในตัวเหนี่ยวนำสูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่งจะเริ่มมีค่าลดลงและจะลดต่ำจนเข้าสู่ภาคกระแสไม่ต่อเนื่องเมื่อแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุต่ำกว่า 150 โวลต์



รูปที่ 3.26 กราฟการจำลองการทำงาน (ขยาย) ของวงจรเรียงกระแสควบคุมเฟสในช่วงที่กระแสต่อเนื่อง

เมื่อพิจารณาในช่วงกระแสต่อเนื่อง (รูปที่ 3.26) จะเห็นได้ว่ากระแสในตัวเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นทุก 8 มิลลิวินาที จากจุดที่แรงดันไฟสลับมีค่า 0° อันเป็นผลจากการจุดชนวนที่มุมจุดชนวน 144° และกระแสคืนพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟสลับจะมีค่าเปลี่ยนแปลงจากบวกเป็นลบและจากลบเป็นบวก เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าที่เข้าสู่แหล่งจ่ายไฟสลับ (P_{AC}) จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่เข้าสู่แหล่งจ่ายไฟสลับจะมีค่าส่วนใหญ่ในช่วงที่เป็นบวก อันแสดงให้เห็นว่ามีการไหลของพลังงานจากตัวเก็บประจุสู่แหล่งจ่ายไฟสลับ



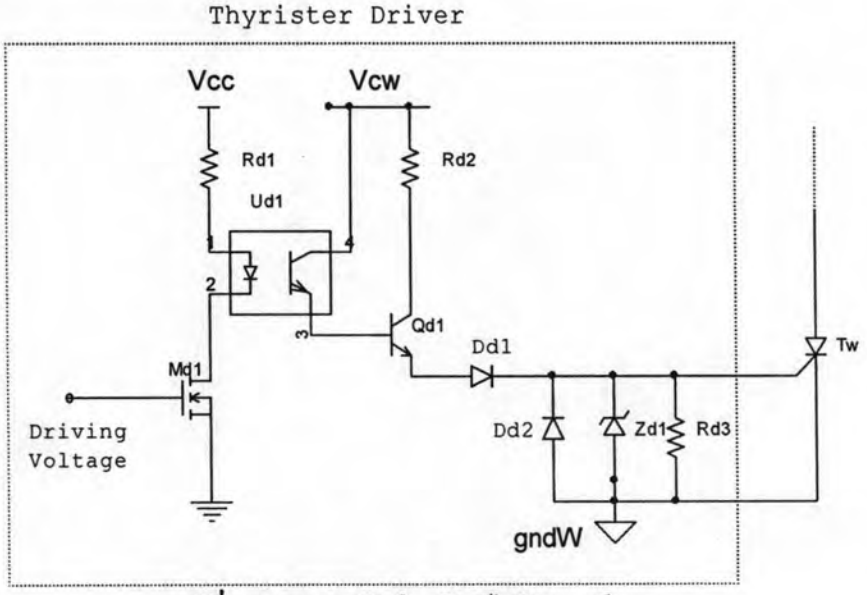
รูปที่ 3.27 กราฟการจำลองการทำงาน (ขยาย) ของวงจรเรียงกระแสควบคุมเฟสในช่วงที่กระแสไม่ต่อเนื่อง

เมื่อพิจารณาในช่วงกระแสไม่ต่อเนื่อง (รูปที่ 3.27) ที่ระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุประมาณ 140 โวลต์ จะเห็นได้ว่ากระแสในตัวเหนี่ยวนำ (I_r) จะเพิ่มขึ้นทุก 8 มิลลิวินาที จากจุดที่แรงดันไฟสลับมีค่า 0° และจะลดลงเป็นศูนย์ก่อนการจุดชนวนครั้งถัดไป ส่วนกระแสคืนพลังงานที่ไหลเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟสลับจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงบวกและช่วงลบตามการจุดชนวน และจะมีค่าลดลงเป็นศูนย์ก่อนการจุดชนวนครั้งถัดไปเช่นกัน เมื่อพิจารณาจากกำลังไฟฟ้าไหลเข้าแหล่งจ่ายไฟสลับ (P_{AC}) จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าไหลเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟสลับจะมีค่าส่วนใหญ่ในช่วงที่เป็นบวก อันแสดงให้เห็นถึงมีการไหลของพลังงานจากตัวเก็บประจุไปสู่แหล่งจ่ายไฟสลับ อย่างไรก็ดีการไหลของพลังงานในภาคกระแสไม่ต่อเนื่องมีค่าน้อยมาก และมีประสิทธิภาพการคืนพลังงานต่ำ

ดังนั้นในการคืนพลังงานจากตัวเก็บประจุไปสู่แหล่งจ่ายไฟสลับจะต้องกำหนดให้วงจรเรียงกระแสควบคุมเฟสทำงานในภาคกระแสต่อเนื่อง โดยกำหนดให้ลดมุมจุดชนวน (α) ลงเมื่อระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุลดลง อันจะมีผลให้กระแสที่ไหลในวงจรเรียงกระแสควบคุมเฟสเพิ่มขึ้นและทำงานในภาคกระแสต่อเนื่อง ส่วนการทำงานในภาคกระแสไม่ต่อเนื่องจะมีประโยชน์ในการลดระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุระหว่างที่เครื่องเชื่อมสตัดทำงาน

3.3.3 วงจรขับนำสวิตช์ไทริสเตอร์

ในการขับนำสวิตช์ไทริสเตอร์สำหรับการดิสชาร์จจากตัวเก็บประจุในการเชื่อมสตัด และสวิตช์ไทริสเตอร์ในวงจรลดระดับแรงดัน ชุดขับนำจะต้องถูกแยกโดดจากวงจรควบคุม โดยวงจรขับนำสวิตช์ไทริสเตอร์ [9] จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.28

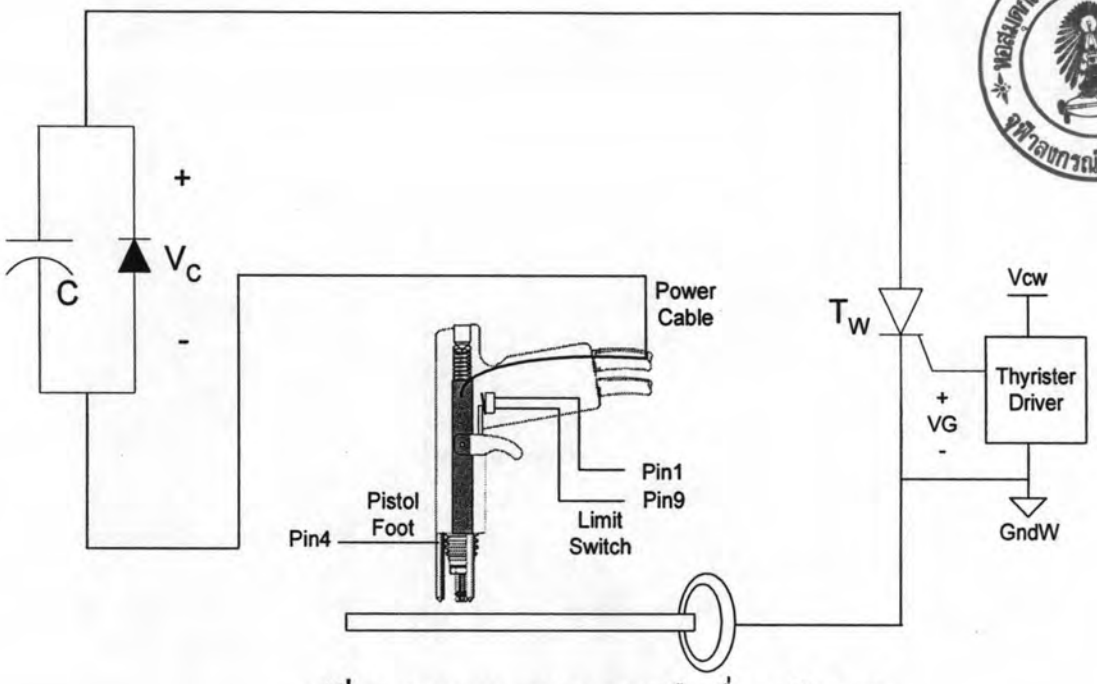


รูปที่ 3.28 วงจรขับนำสวิตช์ไทริสเตอร์

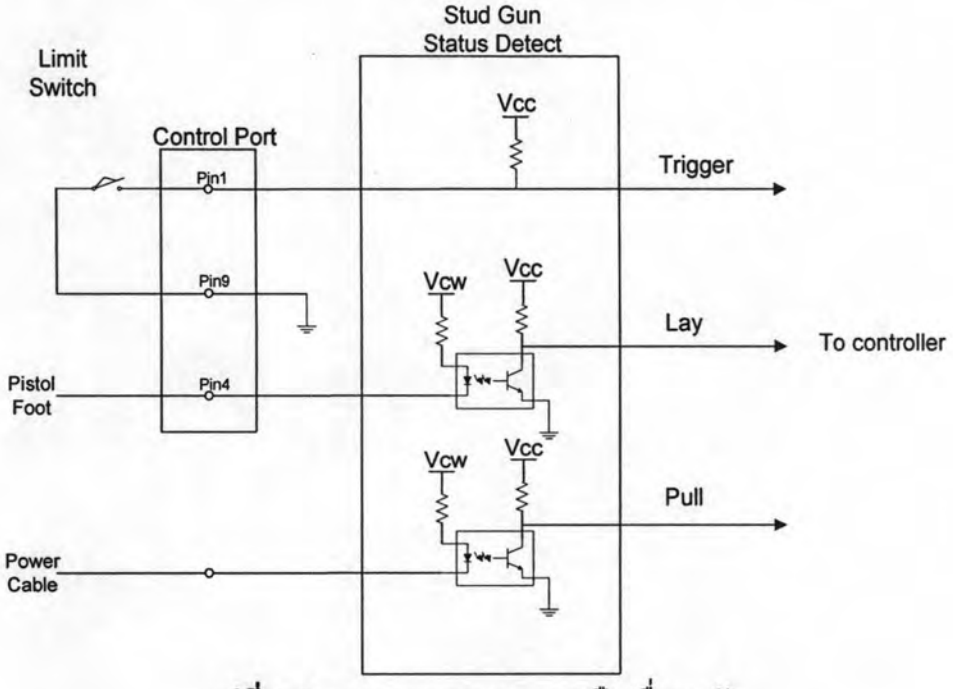
รูปที่ 3.28 แสดงวงจรขับนำสวิตช์ไทริสเตอร์แบบแยกโดดผ่านตัวเชื่อมโยงผ่านแสง ขาออกของตัวเชื่อมโยงผ่านแสงจะถูกต่อแบบดาร์ลิงตันเพื่อให้มีการขับนำกระแสเกตเพียงพอ ไดโอดถูกต่อเพื่อป้องกันการไบแอสขาเกตกลับขั้ว ซีเนอร์ไดโอดถูกต่อเพื่อป้องกันแรงดันเกิน และความต้านทานขนาด 100 Ω จะถูกต่อเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมสวิตช์ไทริสเตอร์ V_{AK} ฉับพลัน

3.3.4 วงจรรับสัญญาณปืนเชื่อมสตัด

ระหว่างการเชื่อมสตัดปืนเชื่อมสตัดจะทำหน้าที่ขับดันสลักเกลียวให้เกิดการอาร์กและติดกับแผ่นโลหะฐาน นอกจากการขับดันสลักเกลียวแล้วปืนเชื่อมสตัดยังทำหน้าที่ส่งสัญญาณสถานะการเชื่อมสตัดไปให้หน่วยควบคุม เพื่อนำไปกำหนดลำดับการทำงานของปืนเชื่อมสตัด การตรวจจับสถานการณ์เชื่อมสตัดของปืนเชื่อมสตัดและอุปกรณ์การเชื่อมสตัด เป็นดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 การตรวจสอบสถานะปืนเชื่อมสตัด [10]



รูปที่ 3.30 วงจรตรวจสอบสถานะปืนเชื่อมสตัด

3.3.4.1 **การตรวจจับสัญญาณเหนี่ยวไกเริ่มการเชื่อมสตัด** (trigger check)

ในการเชื่อมสตัดปืนเชื่อมสตัดจะทำการเชื่อมหลังจากที่มีการเหนี่ยวไกเริ่มกระบวนการเชื่อม เริ่มแรกเมื่อเหนี่ยวไกตัวจับสลักเกลียวและสลักเกลียวจะถูกยกขึ้นเหนือแผ่นโลหะฐาน เมื่อมีการเหนี่ยวไกจนสุดตัวจับสลักเกลียวและสลักเกลียวจะถูกขับดันลงมายังแผ่นโลหะฐาน ลิมิตสวิตช์ภายในปืนเชื่อมสตัดจะส่งสัญญาณมายังหน่วยควบคุม (รูปที่ 3.30) โดยสัญญาณจากลิมิตสวิตช์จะเปลี่ยนสถานะก่อนสลักเกลียวจะเริ่มสัมผัสแผ่นโลหะฐานประมาณ 5 มิลลิวินาที

3.3.4.2 **การตรวจจับสัญญาณการวางปืนเชื่อมสตัดบนแผ่นโลหะฐาน** (lay check)

ในขณะที่มิได้มีการเชื่อมบางครั้งผู้เชื่อมอาจทำการเหนี่ยวไกปืนเชื่อมสตัด ทำให้สวิตช์ไทริสเตอร์ถูกขับนำเองและอาจเป็นอันตรายต่อผู้เชื่อม จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบสถานะการวางปืนเชื่อมบนแผ่นโลหะฐาน เพื่อเป็นการยืนยันว่าผู้เชื่อมต้องการทำการเชื่อมจริงๆ มิใช่เป็นการเหนี่ยวไกปืนเชื่อมสตัดจากความพลั้งเผลอหรือความบังเอิญ

การตรวจสอบสถานะการวางปืนเชื่อมบนแผ่นโลหะฐาน (lay check) ขาปืนเชื่อมสตัดจะส่งสัญญาณการวางปืนเชื่อมผ่านสายควบคุมไปยังพอร์ตอนุกรมของปืนเชื่อม เมื่อวางปืนเชื่อมสตัดลงบนแผ่นโลหะฐาน ตัวเชื่อมโยงทางแสงที่ฝั่งขาเข้าจะถูกขับนำ ตัวเชื่อมโยงผ่านแสงจะถูกต่อรับสัญญาณจากปืนเชื่อมสตัดโดยใช้กราวด์ของวงจรขับนำสวิตช์ไทริสเตอร์ (gndW) เมื่อปืนเชื่อมสตัดถูกวางบนแผ่นโลหะฐาน สัญญาณที่ถูกแยกโดด (lay signal) จะมีค่าลอจิกต่ำ (low) เมื่อปืนเชื่อมสตัดถูกยกจากแผ่นโลหะฐาน สัญญาณที่ถูกแยกโดดจะมีค่าลอจิกสูง (high) สัญญาณตรวจจับที่ถูกแยกโดด (lay signal) จะถูกส่งไปยังหน่วยควบคุม

3.3.4.3 **การตรวจจับสัญญาณการดึงปืนเชื่อมสตัดออกจากสลักเกลียว** (pull check)

ภายหลังจากทำการเชื่อมสตัดสลักเกลียวจะเชื่อมติดเป็นเนื้อเดียวกับแผ่นโลหะฐาน ในกรณีนี้ถ้ามีการเหนี่ยวไกเริ่มการเชื่อมซ้ำอีก อาจทำให้สวิตช์ไทริสเตอร์เสียหายหรืออาจทำให้เกิดการอาร์คกันระหว่างตัวจับสลักเกลียวและสลักเกลียวในขณะดึงปืนเชื่อมออกได้

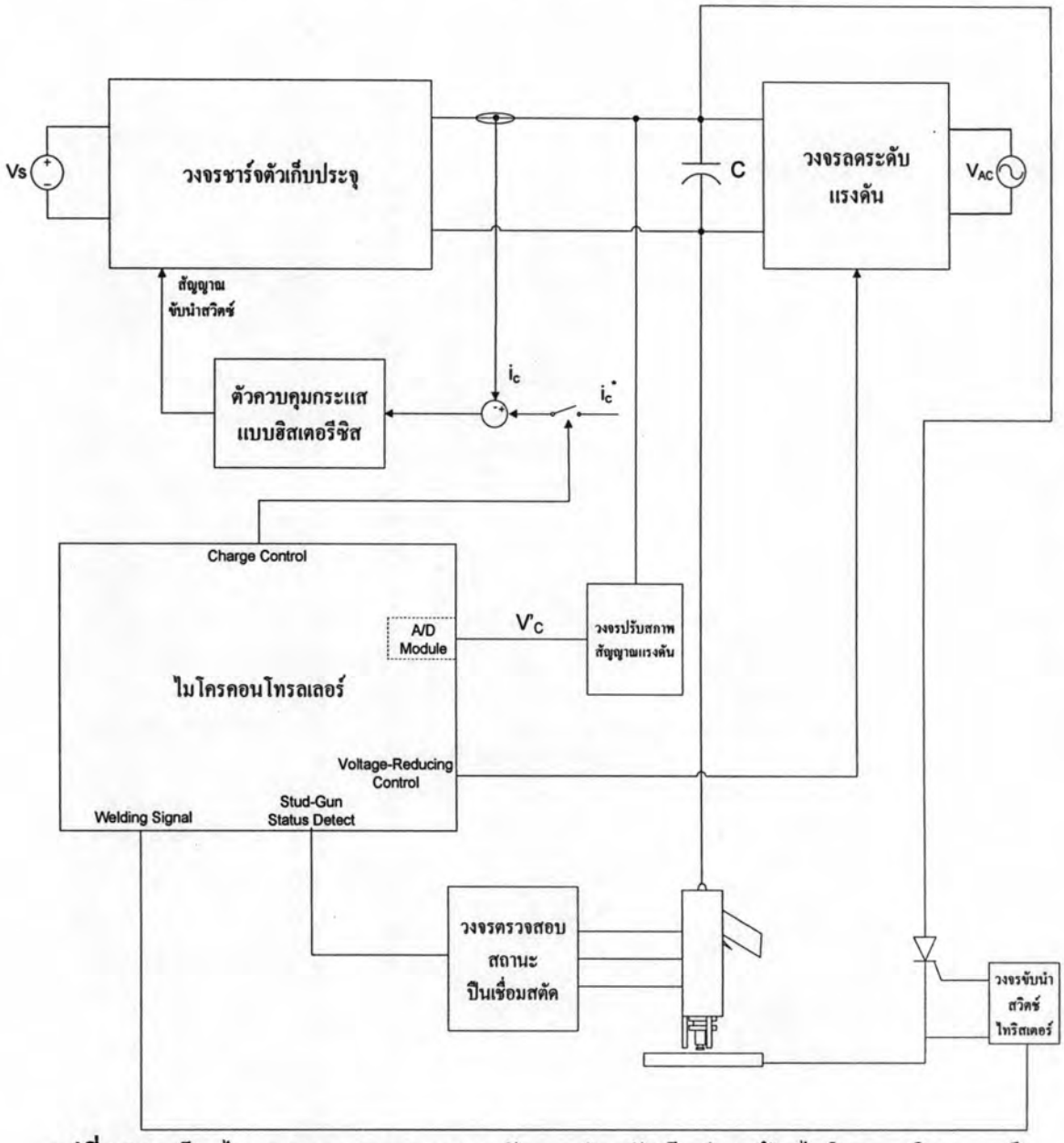
ในที่นี้จะทำการตรวจจับการดึงปืนเชื่อมสตัดออกจากสลักเกลียว (pull check) โดยใช้การตรวจสอบสัญญาณผ่านสายกำลัง (power cable) ของปืนเชื่อมสตัดที่เชื่อมต่อกับตัวจับสลักเกลียว (Stud Holder) และใช้ตัวเชื่อมโยงผ่านแสงต่อรับสัญญาณจากสายกำลังโดยใช้กราวด์ของวงจรขับนำสวิตช์ไทริสเตอร์ (gndW) เมื่อปืนเชื่อมสตัดยังจับสลักเกลียวไว้ ขาเข้าของตัวเชื่อมโยงผ่านแสงจะถูกขับนำ สัญญาณที่ถูกแยกโดด (pull signal) จะมีค่าลอจิกต่ำ (Low) เมื่อปืนเชื่อมสตัดถูกดึงออกจากสลักเกลียว สัญญาณการดึงปืนเชื่อมสตัดจะมีลอจิกสูง (High) สัญญาณตรวจจับที่ถูกแยกโดด (pull signal) จะถูกส่งไปยังหน่วยควบคุม

3.4 การควบคุมแหล่งจ่ายไฟการเชื่อมสตัดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ในการกำหนดการทำงานของอุปกรณ์การเชื่อมสตัด จำเป็นต้องมีการควบคุมการทำงาน (sequence control) เพื่อลำดับการทำงานของอุปกรณ์การเชื่อมสตัดให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ และรับค่าจากอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อนำไปตัดสินใจในการทำงานของอุปกรณ์ ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์การเชื่อมสตัด เนื่องจากมีความสามารถในการลำดับการทำงานที่ดี และมีความยืดหยุ่นในการกำหนดการทำงานของอุปกรณ์ ไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่มีตัวแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล (ADC) ภายใน จึงมีการนำมาใช้ในการควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุโดยตรง ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการควบคุมการทำงานและการแสดงผล

การนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการควบคุมแหล่งจ่ายไฟ มักเกิดปัญหาการรบกวนจากวงจรกำลังไปยังอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ จึงจำเป็นต้องมีการแยกโดดวงจรควบคุมกับวงจรกำลังเพื่อป้องกันการรบกวน นอกจากนี้ควรมีการต่อกำบัง (shield) ให้กับวงจรควบคุมและตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อป้องกันการแทรกสอดทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กในวงจรกำลัง

3.4.1 การควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์



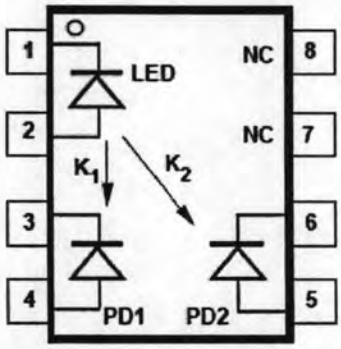
รูปที่3.31 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

รูปที่ 3.31 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจะถูกสุ่มแบบแยกโดดโดยใช้ตัวเชื่อมโยงผ่านแสงแบบแอนาลอก และแปลงสัญญาณแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุให้อยู่ในช่วง 0-5 โวลต์ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะควบคุมวงจรชาร์จตัวเก็บประจุและวงจรลดระดับแรงดัน โดยส่งสัญญาณผ่านตัวเชื่อมโยงผ่านแสงแบบแอนาลอกเพื่อแยกโดดวงจรควบคุมกับวงจรกำลัง

เมื่อเริ่มมีการเชื่อมเชื่อมไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับสัญญาณจากปืนเชื่อมสตัด ผ่านวงจรตรวจสอบสถานะปืนเชื่อมสตัด และเมื่อเหนี่ยวไกเริ่มการเชื่อมไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณไปยังวงจรขับนำสวิตช์ไทริสเตอร์การเชื่อมเพื่อเริ่มกระบวนการเชื่อมสตัด

3.4.1.1 การสุ่มแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุแบบแยกโดด

เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์จำเป็นต้องมีการแยกโดดจากวงจรกำลัง วงจรปรับสภาพแรงดันที่ทำหน้าที่แปลงค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุให้อยู่ในช่วง 0-5 โวลต์ จำเป็นต้องมีการแยกโดดด้วย ในที่นี้จะใช้ตัวเชื่อมโยงผ่านแสงแบบแอนาลอกในการสุ่มและการแยกโดดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (รูปที่ 3.32) [11,12]



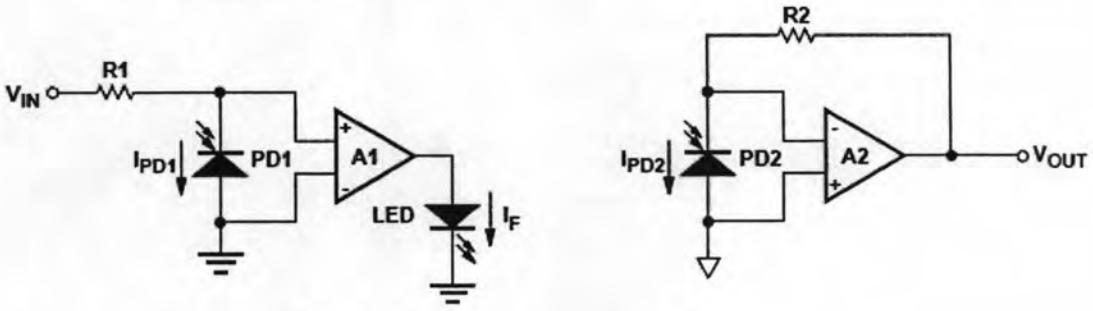
รูปที่ 3.32 บล็อกไดอะแกรมตัวเชื่อมโยงผ่านแสงแบบแอนาลอก

จากรูปตัวเชื่อมโยงผ่านแสงแบบแอนาลอกประกอบด้วยไดโอดเปล่งแสง (LED) และโฟโตไดโอดจำนวน 2 ตัว (PD1, PD2) ไดโอดเปล่งแสงจะกระจายแสงให้กับโฟโตไดโอดทั้งสองตัวเป็นสัดส่วนเท่ากัน ได้ว่า

$$K_n = \frac{I_{PDn}}{I_F} \qquad \text{และ} \qquad K_3 = \frac{K_2}{K_1} = \frac{I_{PD2}}{I_{PD1}}$$

เนื่องจากอัตราขยายระหว่างไดโอดเปล่งแสงและโฟโตไดโอด PD1 และ PD2 (K_1, K2) มีค่าไม่เป็นเชิงเส้น จึงจำเป็นต้องมีการชดเชยอัตราขยายให้เป็นเชิงเส้นด้วยออปแอมป์ ดังนี้

1.1) วงจรสุ่มแรงดันแบบแยกโดด



รูปที่ 3.33 วงจรสุ่มแรงดันแบบแยกโดด [13]

จากรูปที่ 3.33 เมื่อมีการป้อนแรงดันที่ขาเข้า V_{in} จะส่งผลให้แรงดันที่ขาบวกของออปแอมป์มีค่ามากกว่าแรงดันที่ขาลบ ออปแอมป์จะทำการชดเชยโดยยอมให้กระแสไหลผ่านไดโอดเปล่งแสง (LED) ค่าหนึ่ง เพื่อให้ไดโอดรับแสงนำกระแส เป็นผลให้แรงดันที่ขาบวกและ

แรงดันที่ขาลบของออปแอมป์มีค่าเท่ากันเหมือนเดิม โดยที่ $I_{PD1} = \frac{V_{in}}{R_1}$ และเนื่องจากไดโอดรับแสง PD2 มีอัตราขยายกระแสเป็นสัดส่วนกับไดโอดรับแสง PD1 ได้ว่า

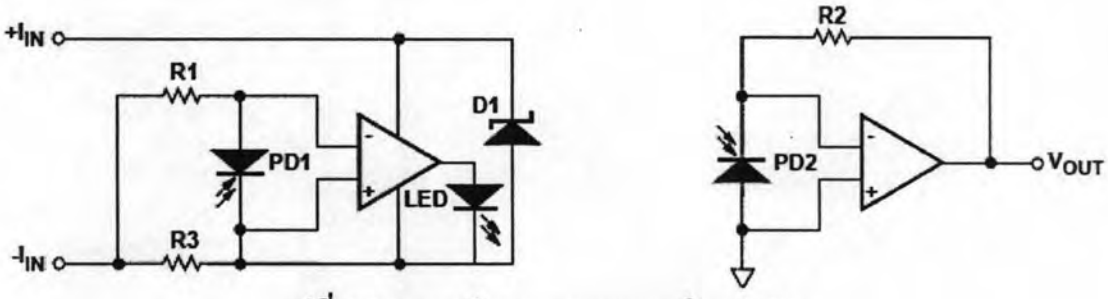
$$Vout = I_{PD2} \cdot R_2 = K_3 \cdot I_{PD1} \cdot R_2$$

และ

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = K_3 \frac{R_2}{R_1}$$

จะเห็นได้ว่าอัตราขยายของวงจรสุ่มแรงดันแบบแยกโดดมีค่าคงที่

1.2) วงจรสุ่มกระแสแบบแยกโดด



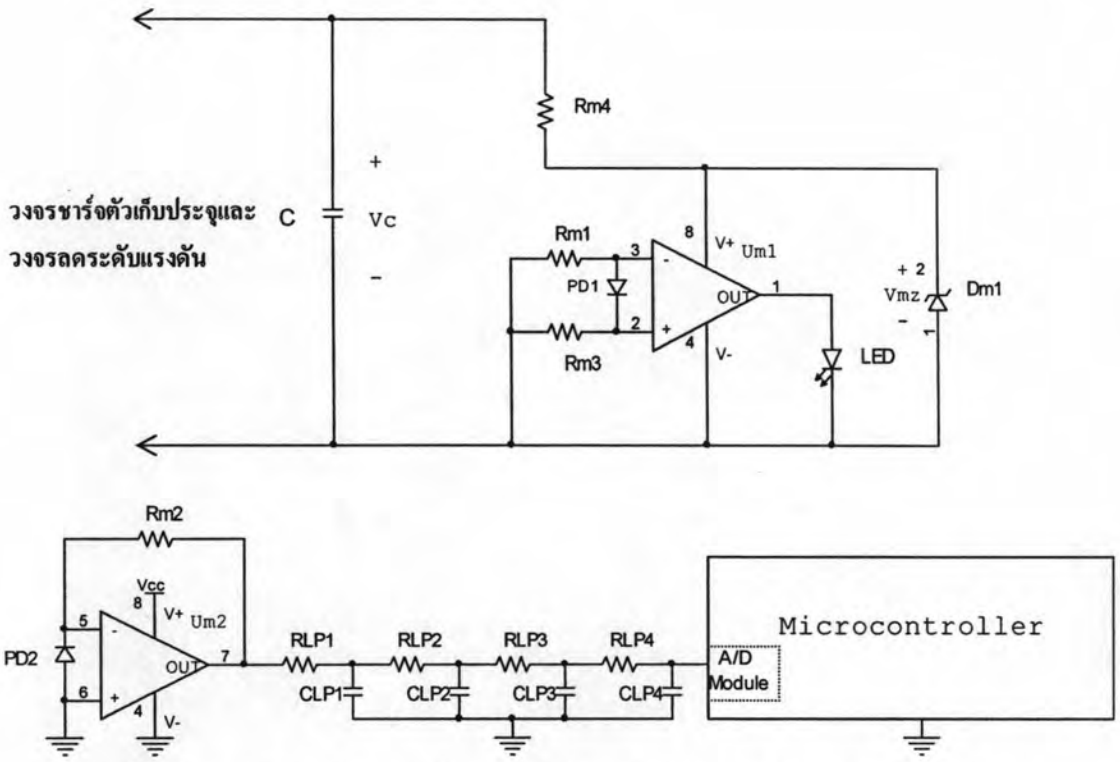
รูปที่ 3.34 วงจรสุ่มกระแสแบบแยกโดด [13]

รูปที่ 3.34 แสดงวงจรสุ่มกระแสแบบแยกโดด ออปแอมป์จะใช้กระแสที่ไหลเพื่อเป็นไฟเลี้ยงในการทำงาน ซีเนอร์ไดโอด D1 ทำหน้าที่ตรึงแรงดันไฟเลี้ยงของออปแอมป์ให้มีค่าคงที่ กระแสจะไหลผ่านตัวต้านทาน R3 เป็นผลให้แรงดันที่ขาบวกของออปแอมป์มีค่ามากกว่าแรงดันที่ขาลบ ในที่นี้ออปแอมป์จะจ่ายกระแสให้ไดโอดเปล่งแสง LED เพื่อให้โฟโตไดโอด PD1 นำกระแสจนแรงดันที่ขาบวกของออปแอมป์มีค่าเท่ากับแรงดันที่ขาลบ ได้ว่า $I_{PD1} = I_{LOOP} \cdot \frac{R3}{R1 + R3}$ และจาก $V_{out} = I_{PD2} \cdot R2$ ได้ว่า $\frac{V_{out}}{I_{LOOP}} = K_3 \frac{R2 \cdot R3}{R1 + R3}$ เมื่อกำหนด R1>> R3 จะสามารถคำนวณอัตราขยายได้ตามสมการ

$$\frac{V_{out}}{I_{LOOP}} = K_3 \cdot \frac{R2 \cdot R3}{R1}$$

2) การสุ่มค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุโดยใช้ตัวเชื่อมโยงผ่านแสงแบบแอนาลอก

ในที่นี้จะใช้วงจรสุ่มกระแสแบบแยกโดดเพื่อทำการสุ่มแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ โดยทำการเปลี่ยนค่าแรงกันตกคร่อมตัวเก็บประจุให้เป็นค่ากระแส และทำการสุ่มกระแสโดยใช้วงจรสุ่มกระแสแบบแยกโดด เพื่อเปลี่ยนค่ากระแสให้เป็นแรงดันส่งให้กับอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์อีกทีหนึ่ง



รูปที่ 3.35 การสุ่มแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุโดยใช้วงจรสุ่มกระแสแบบแยกโดด

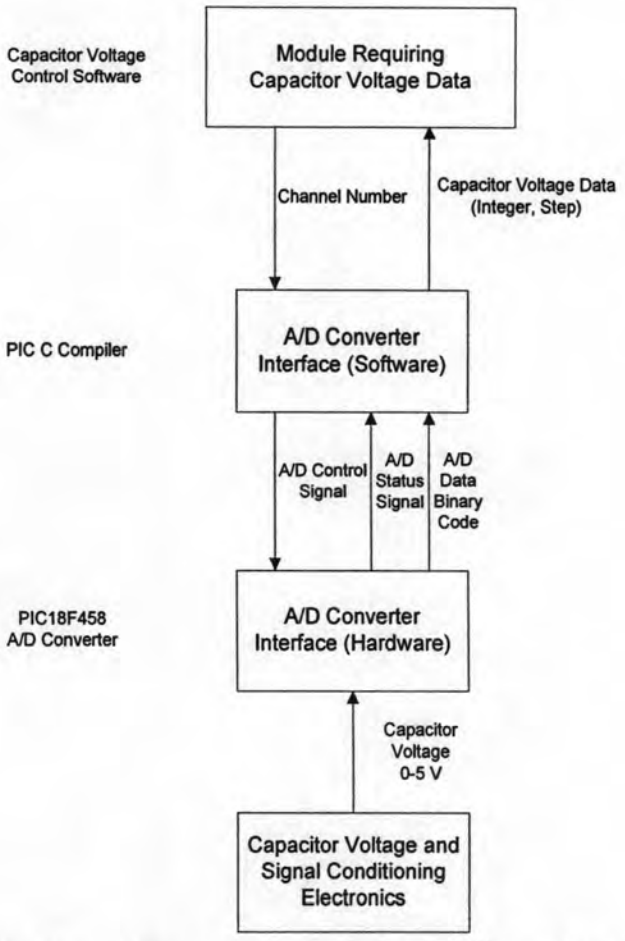
รูปที่ 3.35 กำหนดให้ $R_{M4} >> R_{M1}+R_{M3}$ ได้ว่า $I_{LOOP} = \frac{V_C - V_{MZ}}{R_{M4}}$ และได้ว่า

$$V_{out} = K_3 \cdot \frac{R_{M2} \cdot R_{M3}}{R_{M4}} (V_C - V_{MZ})$$

จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุและแรงดันขาออก (V_{OUT}) ที่ส่งไปให้อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นแบบเชิงเส้น โดยการกำหนดค่า R2 R3 และ R4 สามารถแปลงแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุให้อยู่ในช่วง 0-5 โวลต์ หลังจากการปรับค่าสภาพแรงดันแล้ว สัญญาณสุ่มค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจะถูกส่งผ่านวงจรกรองผ่านต่ำอันดับ 4 เพื่อกรองยอดแหลม (spike) ของแรงดัน ที่อาจเกิดขึ้นจากการสวิตช์ในวงจรชาร์จตัวเก็บประจุ

ข้อได้เปรียบของการใช้ตัวแยกโดดผ่านแสงแบบแอนาลอกนอกจากจะให้อัตราขยายเป็นเชิงเส้นแล้ว อัตราขยายที่ขึ้นกับสัดส่วนอัตราขยายของโฟโตไดโอดทั้งสอง (PD1, PD2) ยังไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ เป็นผลให้การออกแบบมีเสถียรภาพมากขึ้น

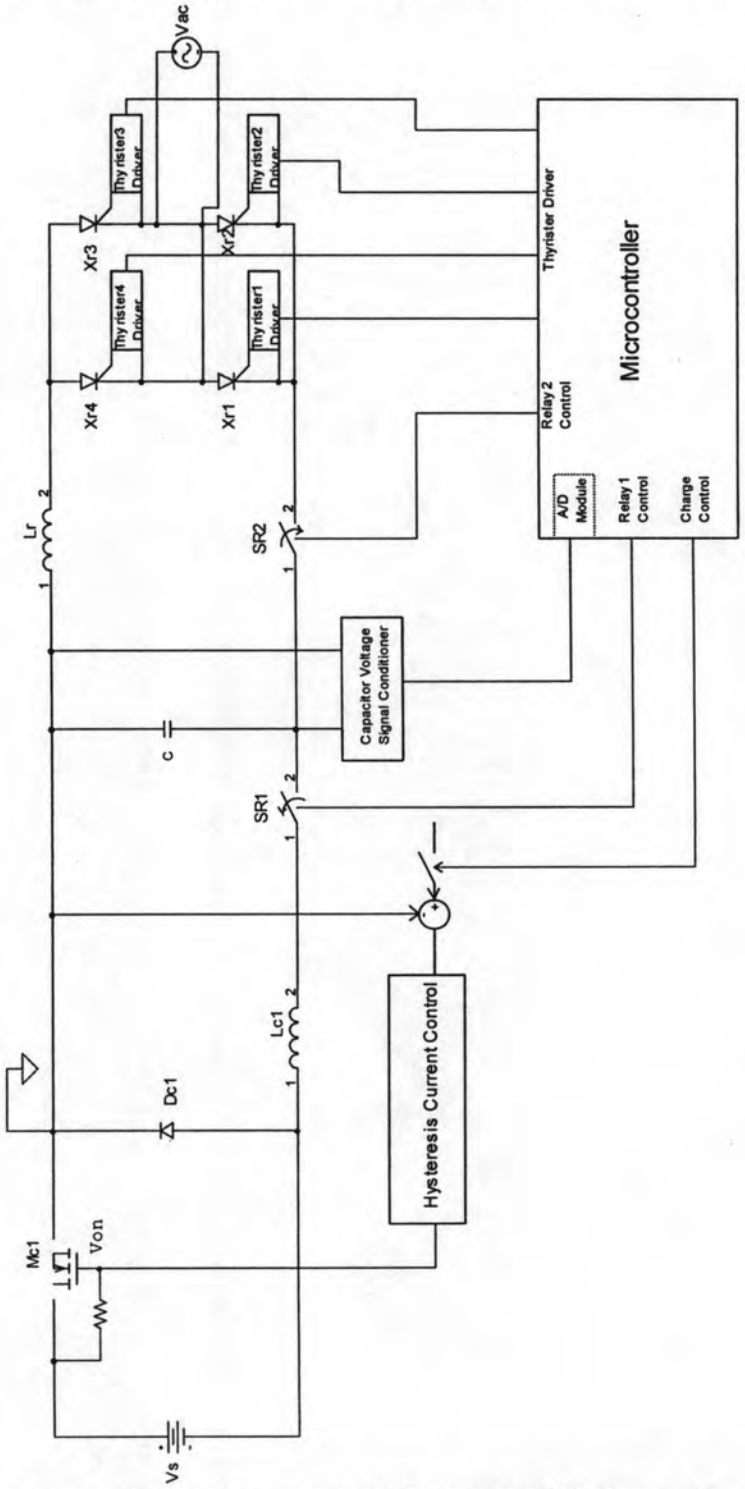
3.4.1.2 การควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.36 การแปลงค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็นค่าขั้นโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในการควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่ผู้ใช้ตั้งค่ามาเก็บไว้ และรับค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุผ่านวงจรสุ่มค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุแบบแยกโดดเข้าสู่หน่วยแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลภายใน (รูปที่ 3.36) ตัวแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล (ADC) จะแปลงแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุให้เป็นค่าขั้น (step) ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ในกรณีที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าต่ำกว่าแรงดันที่ผู้ใช้ป้อนเข้ามา ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้วงจรชาร์จตัวเก็บประจุทำงาน และเมื่อแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้นตามที่กำหนด ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณให้วงจรชาร์จตัวเก็บประจุหยุดทำงาน ในกรณีที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าต่ำกว่าแรงดันที่ผู้ใช้ป้อนเข้ามา ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณให้วงจรลดระดับแรงดันทำงาน ในที่นี้วงจรเรียงกระแสแบบควบคุมเฟสจะทำงานในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง ในการทดลองเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC เบอร์ PIC18F458 ที่มีขาอินพุต/เอาท์พุต จำนวน 32 ขา และมีตัวแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบ 10 บิต จำนวน 8 ช่องทาง (channel) ภายใน [14]

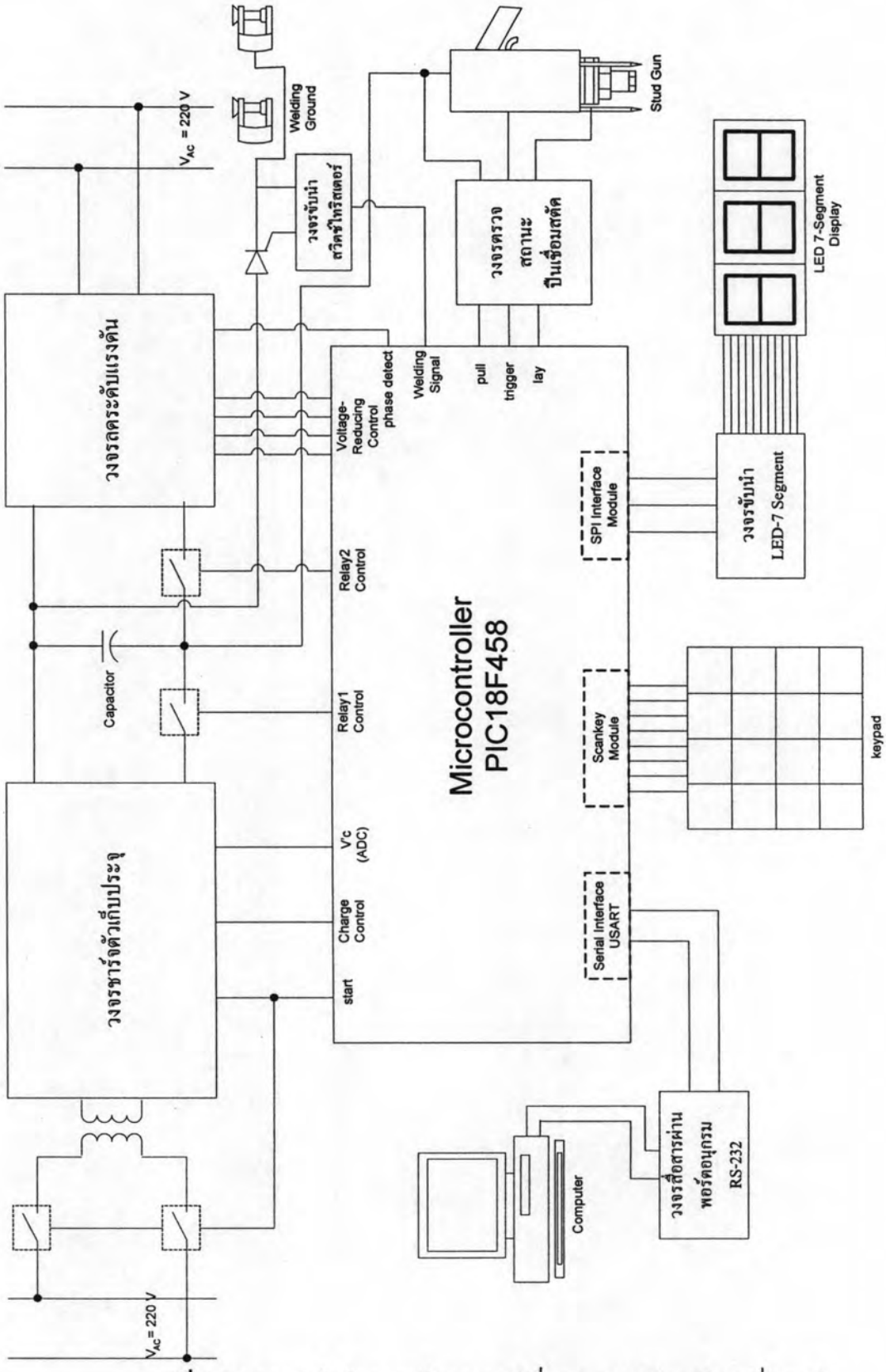
จากรูปที่ 3.37 แสดงวงจรควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรชาร์จตัวเก็บประจุและวงจรลดระดับแรงดันจะถูกแยกโดดจากวงจรควบคุมโดยใช้ตัวเชื่อมโยงผ่านแสง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจะถูกสุ่มเข้าสู่ตัวแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลโดยผ่านตัวเชื่อมโยงผ่านแสงแบบแอนาลอก รีเลย์ SR1 และ SR2 จะทำหน้าที่ตัดต่อวงจรเพื่อสลับการทำงานระหว่างวงจรชาร์จตัวเก็บประจุและวงจรลดระดับแรงดัน และจะตัดการทำงานทั้งวงจรชาร์จตัวเก็บประจุและวงจรลดระดับแรงดันเมื่อเริ่มกระบวนการเชื่อมสตัด



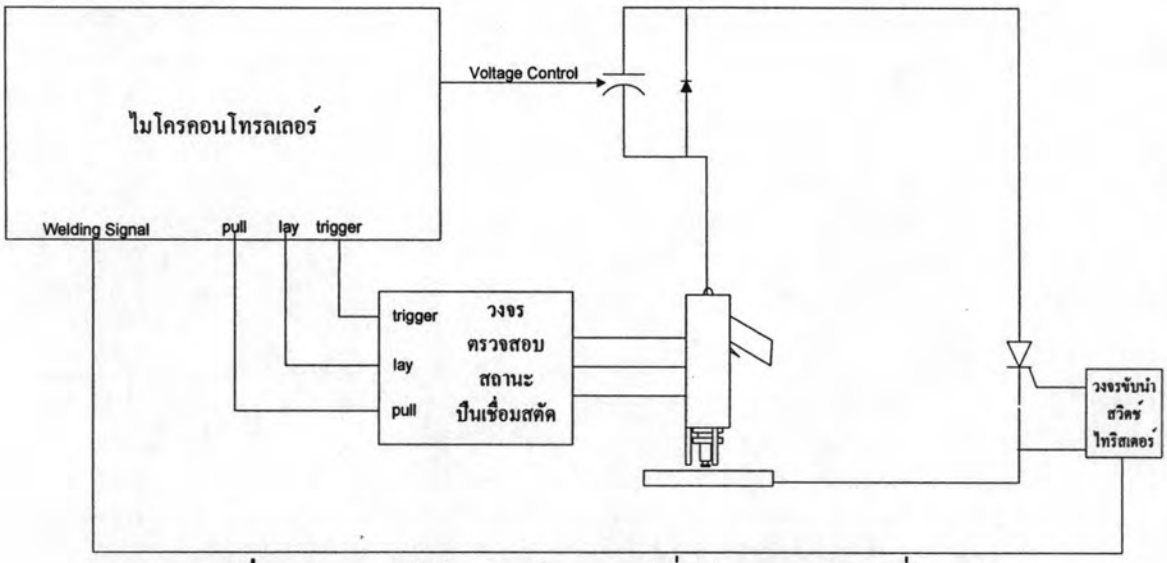
รูปที่ 3.37 วงจรควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

3.4.2 การควบคุมลำดับการทำงานอุปกรณ์การเชื่อมสตัดโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์จะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อรับค่าและกำหนดการทำงาน โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะถูกต่อเพื่อควบคุมการทำงานของแหล่งจ่ายไฟ ดังรูปที่ 3.38

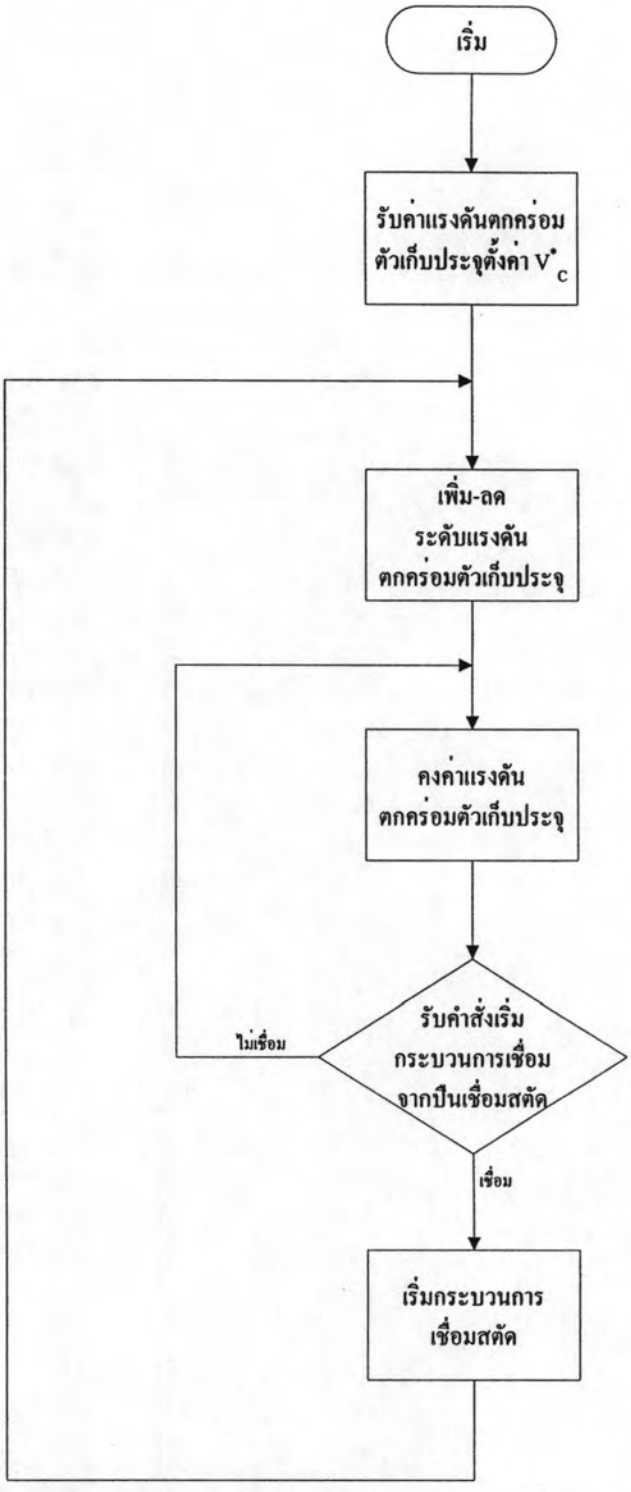


รูปที่ 3.38 การต่อไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมอุปกรณ์การเชื่อมสตัด



รูปที่ 3.39 การต่อไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อรับค่าขณะมีการเชื่อมสตัด

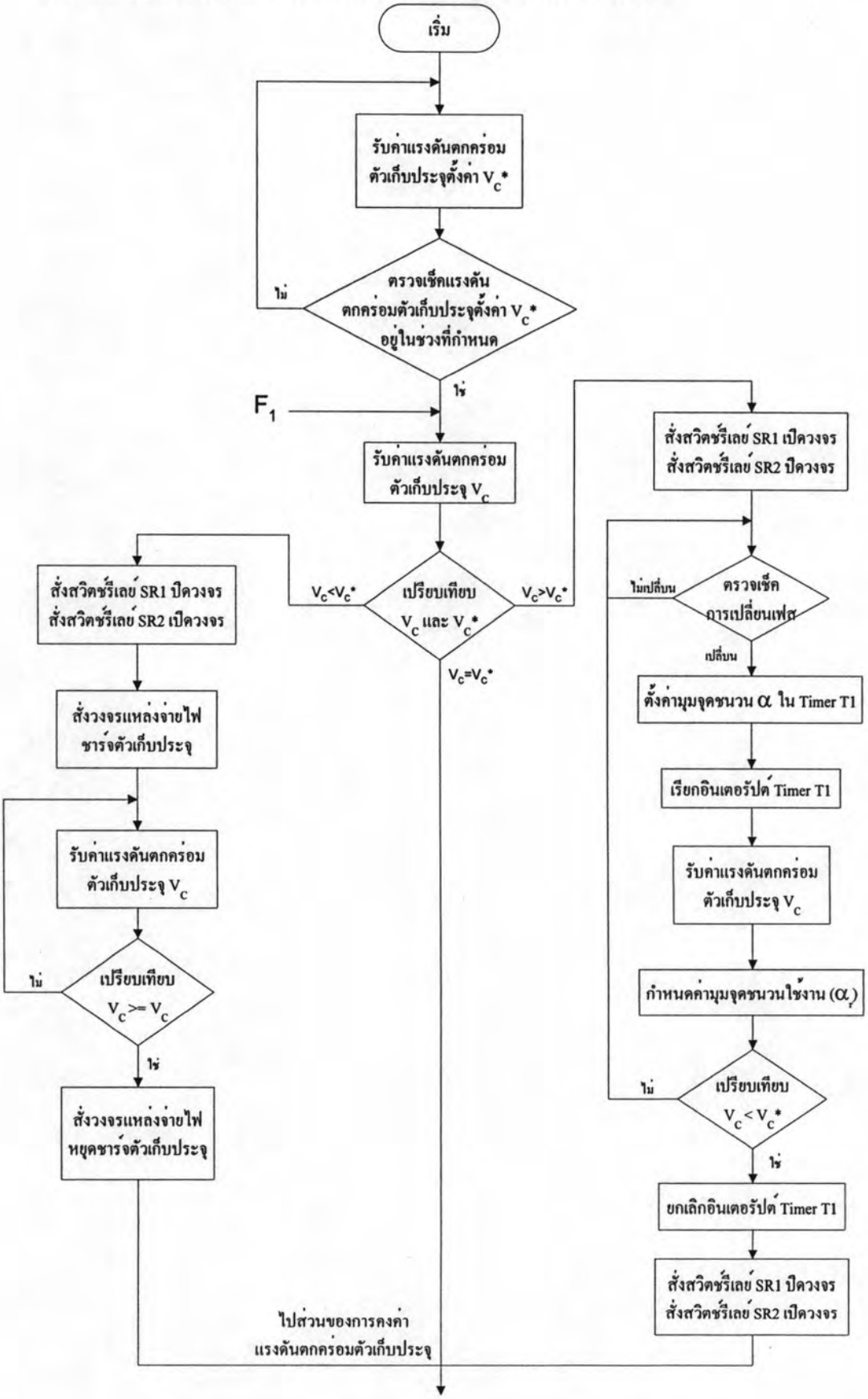
รูปที่ 3.39 แสดงการต่ออุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมอุปกรณ์การเชื่อมสตัด การรับค่าจากปืนเชื่อมสตัดจะผ่านวงจรแสดงสถานะปืนเชื่อมสตัด (stud gun status) การรับค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจะผ่านวงจรสุ่มแรงดันแบบแยกโดด และควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุผ่านวงจรชาร์จตัวเก็บประจุและวงจรลดระดับแรงดัน ในการควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการชาร์จตัวเก็บประจุให้ถึงค่าที่ตั้งไว้และรอรับสัญญาณเหนี่ยวไกปืนเชื่อมสตัดเพื่อเริ่มกระบวนการเชื่อมสตัด การรับค่าและแสดงผลสามารถกระทำได้โดยการใช้คีย์แพด(keypad) และจอ LED 7 ส่วน หรืออาจใช้คอมพิวเตอร์ก็ได้ การควบคุมอุปกรณ์การเชื่อมสตัดมีโฟลว์ชาร์ตการทำงานดังรูปที่ 3.40



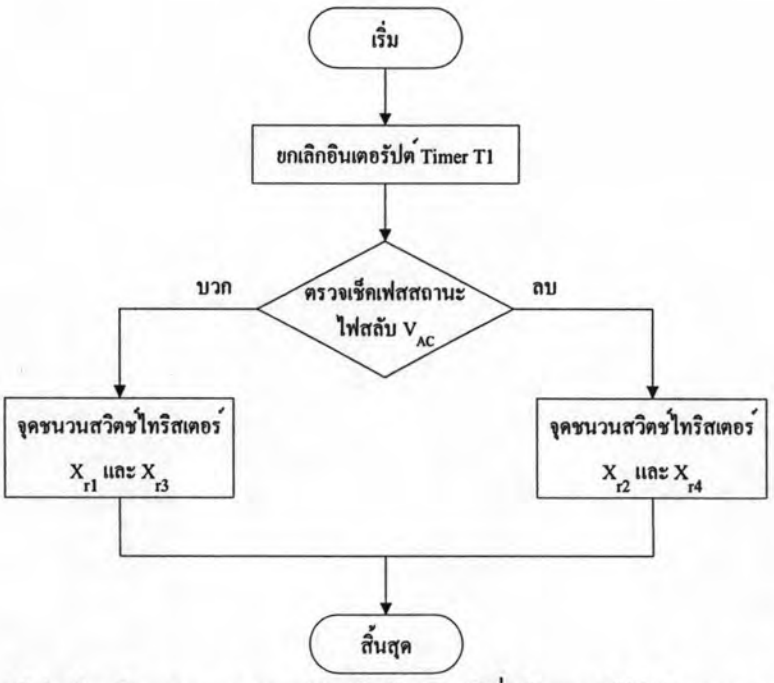
รูปที่ 3.40 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของอุปกรณ์การเชื่อมสตัด

จากรูปอุปกรณ์การเชื่อมสตัดจะมีการทำงาน 3 ช่วงด้วยกัน ได้แก่ช่วงเพิ่ม-ลดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ คือการเพิ่มหรือลดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุให้มีค่าตามที่ตั้งไว้ ช่วงคงระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ คือการคงค่าระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุให้มีค่าคงที่ เนื่องจากตัวเก็บประจุมีการรั่วไหล (leakage) ทำให้แรงดันตกคร่อมลดลง และช่วงเริ่มกระบวนการเชื่อมสตัด คือการเริ่มกระบวนการเชื่อมสตัดหลังจากเหนี่ยวไกปืนเชื่อมสตัดเพื่อเริ่มกระบวนการเชื่อม

3.4.2.1 โฟลว์ชาร์ตการเพิ่ม-ลดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ



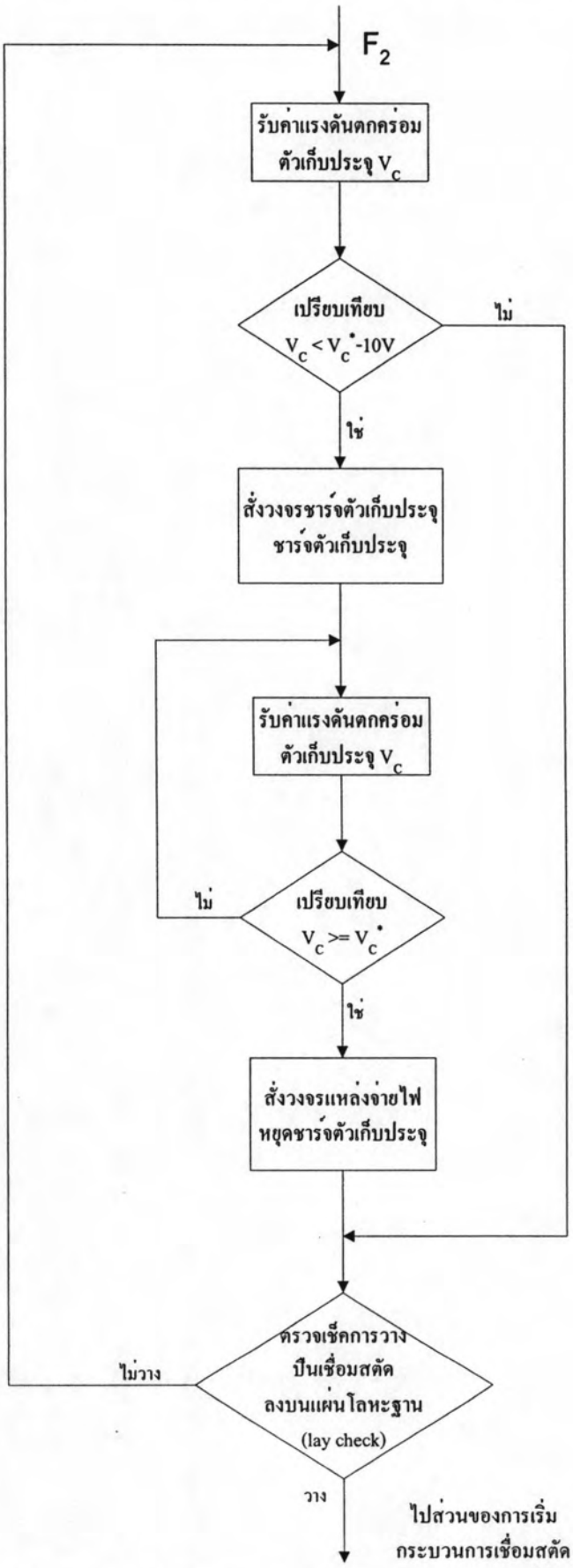
รูปที่ 3.41 โฟลว์ชาร์ตการเพิ่ม-ลดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.42 โฟลว์ชาร์ตการจุดชนวนสวิตช์ไทริสเตอร์เมื่ออินเตอร์รัปต์ Timer T1 เริ่มทำงาน

รูปที่ 3.41 แสดงโฟลว์ชาร์ตการเพิ่ม-ลดระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับแรงดันตั้งค่าจากผู้ใช้งาน และตรวจค่าแรงดันที่ตั้งไว้ว่าอยู่ในช่วงที่กำหนด ในที่นี้ไมโครคอนโทรลเลอร์จะแปลงค่าที่ผู้ใช้ป้อนเข้ามาเป็นค่าขั้นเพื่อใช้ในการพิจารณา จากนั้นจะทำการรับค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ในกรณีที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุต่ำกว่าค่าแรงดันที่กำหนด ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้วงจรชาร์จประจุทำงาน และชาร์จประจุจนกระทั่งแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับที่กำหนดไว้ ในกรณีที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุสูงกว่าแรงดันที่กำหนด ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้วงจรลดระดับแรงดันทำงานในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง ไมโครคอนโทรเลอร์จะตรวจเช็คการเปลี่ยนเฟส และตั้งค่ามุมจุดชนวนโดยใช้อินเตอร์รัปต์ Timer T1 (รูปที่ 3.42) ระหว่างที่รอการตรวจเช็คการเปลี่ยนเฟสไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ V_C ว่าน้อยกว่าที่กำหนดหรือไม่ เมื่อแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าน้อยกว่าที่กำหนด ไมโครคอนโทรลเลอร์จะหยุดการลดระดับแรงดัน และไปที่ช่วงการคงค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุต่อไป

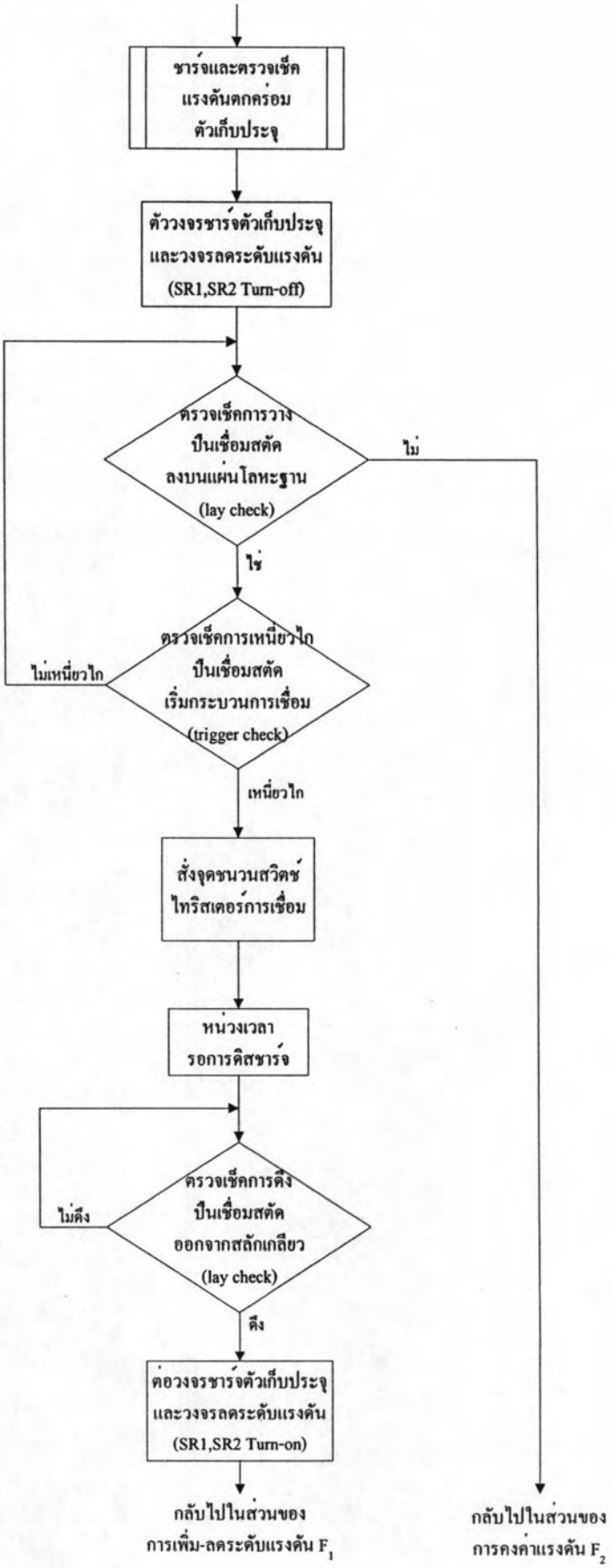
3.4.2.2 โฟลว์ชาร์ตการคงค่าระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ



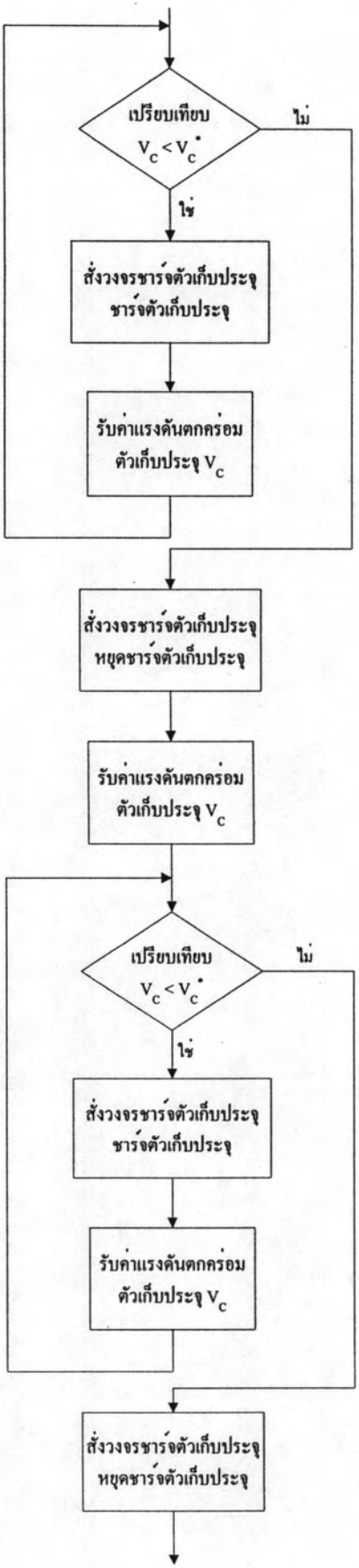
รูปที่ 3.43 โฟลว์ชาร์ตการคงค่าระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ

รูปที่ 3.43แสดงโฟลว์ชาร์ตการคงค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ตัวควบคุมจะรับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ V_C และจะรักษาระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุไม่ให้ลดลงเกิน 10 V จากค่าที่ตั้งไว้ ในกรณีที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าต่ำกว่าที่กำหนดไว้ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้วงจรชาร์จตัวเก็บประจุทำงาน และชาร์จประจุให้มีค่าเท่ากับที่กำหนดไว้ และเมื่อปืนเชื่อมสตัดถูกวางบนแผ่นโลหะฐาน ไมโครคอนโทรลเลอร์จะเข้าสู่ช่วงเริ่มกระบวนการเชื่อม

3.4.2.3 โฟลว์ชาร์ตเริ่มกระบวนการเชื่อมสตัด



รูปที่ 3.44 โฟลว์ชาร์ตเริ่มกระบวนการเชื่อมสตัด



รูปที่ 3.45 โฟลว์ชาร์ตการทำงานย่อย (sub-routine) ในการชาร์จ
และตรวจเช็คระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 3.44 และ 3.45 เมื่อปืนเชื่อมสตัดถูกวางบนแผ่นโลหะฐานแล้ว ตัวเก็บประจุจะถูกชาร์จให้มีระดับแรงดันเท่ากับค่าที่ตั้งไว้ เพื่อเตรียมการดิสชาร์จในกระบวนการเชื่อมสตัด แต่เนื่องจากขณะชาร์จตัวเก็บประจุอาจมีการรบกวนจากวงจรกำลัง และอาจเกิดยอดแหลมในวงจรสุ่มแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงต้องทำการตรวจเช็คระดับแรงดันหลังจากการชาร์จตัวเก็บประจุเพื่อตรวจสอบว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าตามที่ตั้งไว้ ในกรณีที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุต่ำกว่าความเป็นจริง ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการชาร์จประจุใหม่อีกครั้งหนึ่ง จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะตัววงจรชาร์จตัวเก็บประจุและวงจรลดระดับแรงดันออกจากตัวเก็บประจุ หลังจากนั้นจะทำการตรวจสัญญาณการวางปืนเชื่อมลงบนแผ่นโลหะฐาน (lay check) และรอรับค่าการเหนี่ยวไกปืนเชื่อมสตัด ในกรณีที่ปืนเชื่อมสตัดถูกยกขึ้นจากแผ่นโลหะฐาน ไมโครคอนโทรลเลอร์จะต่อวงจรชาร์จตัวเก็บประจุและวงจรลดระดับแรงดัน และกลับเข้าสู่ช่วงคงค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ แต่ในกรณีที่เริ่มมีการเหนี่ยวไกเริ่มกระบวนการเชื่อมสตัด (trigger) ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งสวิตช์ไทริสเตอร์การเชื่อมจุดชนวนเพื่อเริ่มกระบวนการเชื่อม

หลังจากกระบวนการเชื่อมสตัด ไมโครคอนโทรลเลอร์จะต่อวงจรชาร์จตัวเก็บประจุและวงจรลดระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุอีกครั้งหลังดึงปืนเชื่อมสตัดออกจากแผ่นโลหะฐาน โดยการตรวจสอบสัญญาณดึงปืนเชื่อมสตัด (pull signal)