บทที่ 3

ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ

3.1 คำนำ

ในบทนี้จะขอกล่าวถึงรายละเอียดของการออกแบบและสร้างเครื่องไซโคลคอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ ซึ่งจะสามารถแปลงผันแรงดันกระแสสลับสามเฟส ขนาด 380 V, 50 Hz ไปเป็นแรงดันกระแสสลับสามเฟสขนาด 38 - 220 V, 5 - 16.7 Hz และจ่ายกระแสด้านออกได้ประมาณ 8 A ซึ่งหมายถึงว่าไซโคลคอนเวอร์เตอร์นี้จะสามารถจ่ายโหลดได้ประมาณ 5 kVA (อย่างไรก็ตาม ในการทดลองใช้งานจริงจะมีการจำกัดกระแสไว้ ไม่ให้เกินประมาณ 8 แอมแปร์ ดังนั้นถ้าโหลดของไซโคลคอนเวอร์เตอร์มีตัวประกอบกำลังต่ำ อย่างเช่นมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ยังไม่รับภาระทางกล และเริ่มเดินเครื่องที่ความถี่ต่ำ ๆ แรงดันที่ใช้จริงก็อาจจำเป็นต้องต่ำกว่าค่าทางทฤษฎี ทำให้ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ไม่อาจจ่ายโหลดได้เต็มตามพิกัด)

ระบบไซโคลคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น เป็นดังแผนภาพในรูปที่ 20 ซึ่งเป็นผลมาจากการขยายรายละเอียดเพิ่มขึ้นจากแผนภาพในรูปที่ 1 ในบทที่ผ่านมา ในระบบตามรูปที่ 20 นี้ หม้อแปลงสามเฟส ทำหน้าที่ลดแรงดันสามเฟส V_s ขนาด 380 V ลงเป็นค่าที่พอเหมาะ ทั้งนี้ก็เพื่อให้เอสซีอาร์ ในวงจรเรียงกระแสของไซโคลคอนเวอร์เตอร์รับแรงดันไปหน้าเป็นค่าต่ำ ๆ ในกรอบ 1 ของแผนภาพ วงจรเรียงกระแสซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 ชุด คือชุดบวกกับชุดลบ ทำหน้าที่แปลงผันแรงดันกระแสสลับสามเฟสเป็นแรงดันทิศทางเดียว 2 แรงดันซึ่งจะตกคร่อมโหลดในทิศทางกลับกัน กรอบ 2 เป็นวงจรจุดชนวนเอสซีอาร์ ซึ่งทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปกระตุ้นเกตของเอสซีอาร์ในวงจรเรียงกระแส กรอบ 3 เป็นวงจรตรวจสัญญาณสามเฟสซึ่งสร้างสัญญาณพัลส์ ที่บอกตำแหน่งค่าศูนย์ของแรงดันสามเฟส รวม 6 แรงดัน ของกระแสโหลด กรอบ 5 เป็นวงจรสวิตช์ควบคุมการเดินเครื่อง หยุดเครื่อง กลับทิศทางการหมุน และเปลี่ยนแปลงความถี่แรงดันด้านออกของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ กรอบ 6 เป็นวงจรอินเตอร์เฟซสำหรับ

I 10303040

ไมโครโปรเซสเซอร์ ใช้ทำหน้าที่รับสัญญาณตรรกจากวงจรตรวจสัญญาณสามเฟส (กรอบ 3) วงจรตรวจสถานะกระแสโหลด (กรอบ 4) วงจรสวิตช์ควบคุม (กรอบ 5) และจากไมโครโปรเซสเซอร์ (กรอบ 7) ซึ่งรับสัญญาณตรรกจากวงจรอินเตอร์เฟซมาประมวลผลตามโปรแกรมควบคุม กรอบ 8 เป็นวงจรลดสัญญาณรบกวนในสาย ทำหน้าที่ลดส่วนเกินปรกติของแรงดันกระแสสลับสามเฟส ซึ่งอาจเป็นสัญญาณรบกวนที่ผ่านมาจากระบบแหล่งจ่ายสามเฟส หรือสัญญาณรบกวนจากการปิดเปิดกระแสของเอสซีอาร์ในวงจรเรียงกระแสก็ได้

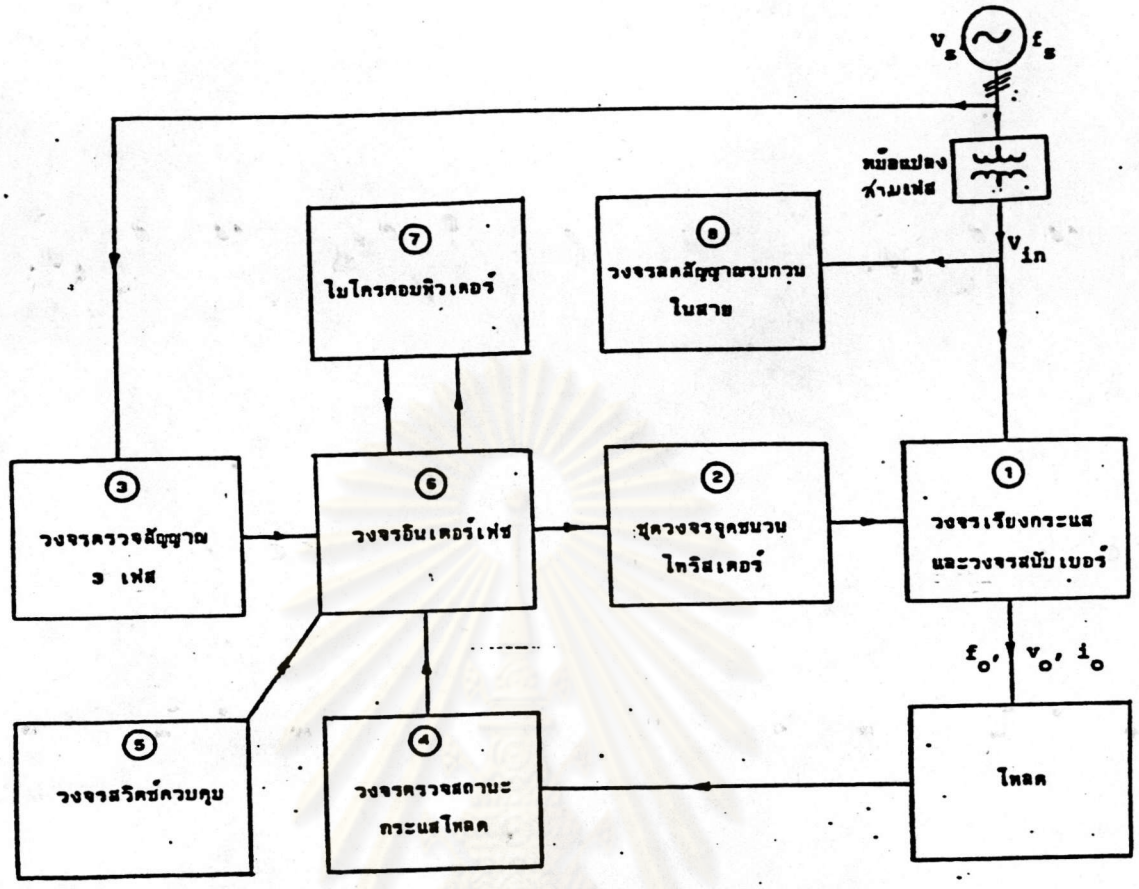
รายละเอียดในการออกแบบวงจรส่วนประกอบแต่ละส่วนจะมีกล่าวไว้ในหัวข้อต่าง ๆ ดังที่จะได้กล่าวถึงต่อไป

3.2 หม้อแปลงสามเฟส

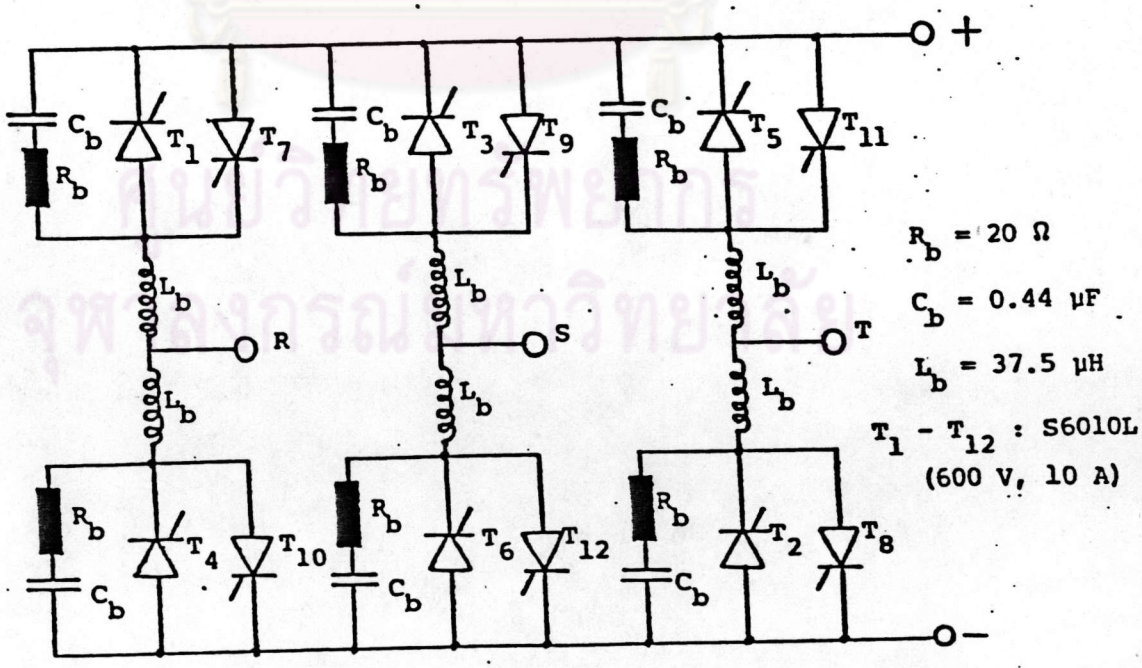
หม้อแปลงสามเฟส ในแผนภาพตามรูปที่ 15 ใช้สำหรับลดแรงดันด้านเข้าขนาด 380 V ลงเป็นค่าที่เหมาะสม เหตุผลของการลดแรงดันก็คือ (1) เพื่อให้เอสซีอาร์ในวงจรเรียงกระแสรับแรงดันไปหน้าเป็นค่าต่ำ ๆ (2) เพื่อจำกัดกระแสของเอสซีอาร์ไว้ไม่ให้เกิน 8 แอมแปร์ และ (3) เพื่อจะได้ใช้มุมประจุงการจุดชนวนเอสซีอาร์ในวงจรเรียงกระแสเป็นค่าต่ำเทียบกับเมื่อใช้แรงดันค่าสูงกว่า

เพื่อความสะดวกในการทดลอง จึงได้ใช้หม้อแปลงสามเฟสแบบปรับค่าแรงดันด้านออกได้ (variac) หม้อแปลงตัวนี้มีพิกัด (rating) ดังต่อไปนี้ คือ

ขนาดกำลังปรากฏ	8 kVA
แรงดันระหว่างสายด้านเข้า	380 V
แรงดันระหว่างสายด้านออก	0 - 380 V
กระแสสูงสุดทางด้านออก	10 A



รูปที่ 20 แผนภาพของระบบไซโคลคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น



รูปที่ 21 วงจรเรียงกระแสและวงจรสนับเบอร์ที่ออกแบบขึ้น

3.3 วงจรเรียงกระแสและวงจรสนับเบอร์

วงจรเรียงกระแสชุดบวกและชุดลบ พร้อมทั้งวงจรสนับเบอร์ ที่ออกแบบขึ้นในที่นี้มีแผนภาพตามรูปที่ 21 รูปลักษณ์ของวงจรเรียงกระแสในรูปนี้เป็นอย่างเดียวกันกับที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 ข ข้อดีของการต่อวงจรตามรูปลักษณ์นี้ก็คือ ไทริสเตอร์ 2 ตัวที่ต่อขนานกลับทิศทางกันนั้น สามารถใช้วงจรสนับเบอร์ชุดเดียวร่วมกันได้ ทำให้เราใช้วงจรสนับเบอร์รวมทั้งหมดเพียง 18 ชุดเท่านั้น แทนที่จะเป็น 36 ชุดเท่าจำนวนของไทริสเตอร์

ไทริสเตอร์ทั้งหมด 12 ตัว คือ $T_1 - T_{12}$ (สำหรับเฟสหนึ่งในจำนวน 3 เฟสของแรงดันด้านออก) ในวงจรเรียงกระแสตามรูปที่ 21 เป็นเอสซีอาร์ (SCR) เบอร S6010L ซึ่งทนแรงดันสูงสุดได้ 600 V และรับกระแสอาร์เอ็มเอสสูงสุดได้ 10 A เหตุผลที่ใช้เอสซีอาร์เบอร์นี้ก็เพื่อให้สามารถทดลองใช้กับระบบแรงดันสามเฟส 380 V โดยตรงได้ด้วย นอกเหนือจากการใช้กับแรงดันค่าต่ำที่ผ่านหม้อแปลงสามเฟสมาแล้ว

สำหรับวงจรสนับเบอร์ในรูปที่ 21 ซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ L_b, ตัวต้านทาน R_b และตัวเก็บประจุ C_b นั้น L_b ทำหน้าที่จำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแส (di/dt) ไม่ให้สูงเกินค่าที่ไทริสเตอร์จะสามารถรับได้ ส่วน R_b กับ C_b ทำหน้าที่จำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันคร่อมไทริสเตอร์ (dv/dt) ไม่ให้สูงเกินค่าที่ไทริสเตอร์จะสามารถรับได้ ค่าของ L_b, R_b และ C_b ที่แสดงไว้ เป็นผลจากการคำนวณออกแบบตามวิธีของ Rice [17] ดังต่อไปนี้คือ

$$L_b > nE_{acp}/[(n+1)/(di/dt)_{rated}] \qquad (21)$$

โดยที่

n = จำนวนของไทริสเตอร์ที่ต่อขนานกันในแต่ละกิ่ง = 1

E_{acp} = 1.4142x(ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันระหว่างสาย)

= 1.4142x(380) = 537 V

$(di/dt)_{rated}$ = ค่าพิกัด di/dt ของไทริสเตอร์

= 100 A/μS (จากเอกสารอ้างอิง[18])

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในอสมการ (21) เราจะได้

$$L_b > 2,7 \ \mu H \qquad (22)$$

ในการสร้างตัวเหนี่ยวนำ L_b ซึ่งรับกระแสได้สูงสุด 10 แอมแปร์นั้น เมื่อพันขดลวดโดยให้แกนเป็นเฟอร์ไรต์แล้วก็ปรากฏว่าวัดค่าความเหนี่ยวนำได้เป็น $L_b = 37.5 \ \mu H$ ซึ่งยังสอดคล้องกับอสมการ (22) อยู่

ค่าความต้านทานในสนับเบอร์นั้น ได้ใช้เป็น $R_b = 20 \ \Omega$ ตามคำแนะนำในเอกสารอ้างอิง [17] ส่วนค่าความจุไฟฟ้า C_b เอกสารอ้างอิงดังกล่าวได้ให้สูตรไว้เป็น

$$C_b > 4L_b/(R_b)^2 \qquad (23)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่า $L_b = 37.5 \ \mu H$ และ $R_b = 20 \ \Omega$ แล้ว ผลก็คือ

$$C_b > 0.375 \ \mu F \qquad (24)$$

วงจรที่สร้างขึ้นจริงนั้นใช้ตัวเก็บประจุที่ทนแรงดันได้ 1000 V และมีค่าความจุไฟฟ้าเป็น $C_b = 0.44 \ \mu F$

ขนาดกำลังของตัวต้านทาน R_b คำนวณได้จากสูตรของเอกสารอ้างอิง [17] คือ

$$W_{Rb} = 79C_b(E_{eff})^2 \qquad (25)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่า $C_b = 0.44 \times 10^{-6} \ F$ และ $E_{eff} = 537 \ V$ แล้ว จะให้ผลเป็น $W_{Rb} = 10.02 \ W$ ดังนั้นตัวต้านทาน R_b จึงต้องมีพิกัดกำลังอย่างต่ำ 10 วัตต์ ในวงจรสนับเบอร์ที่สร้างขึ้นได้เลือกใช้ $R_b = 20 \ \Omega$, 20 W

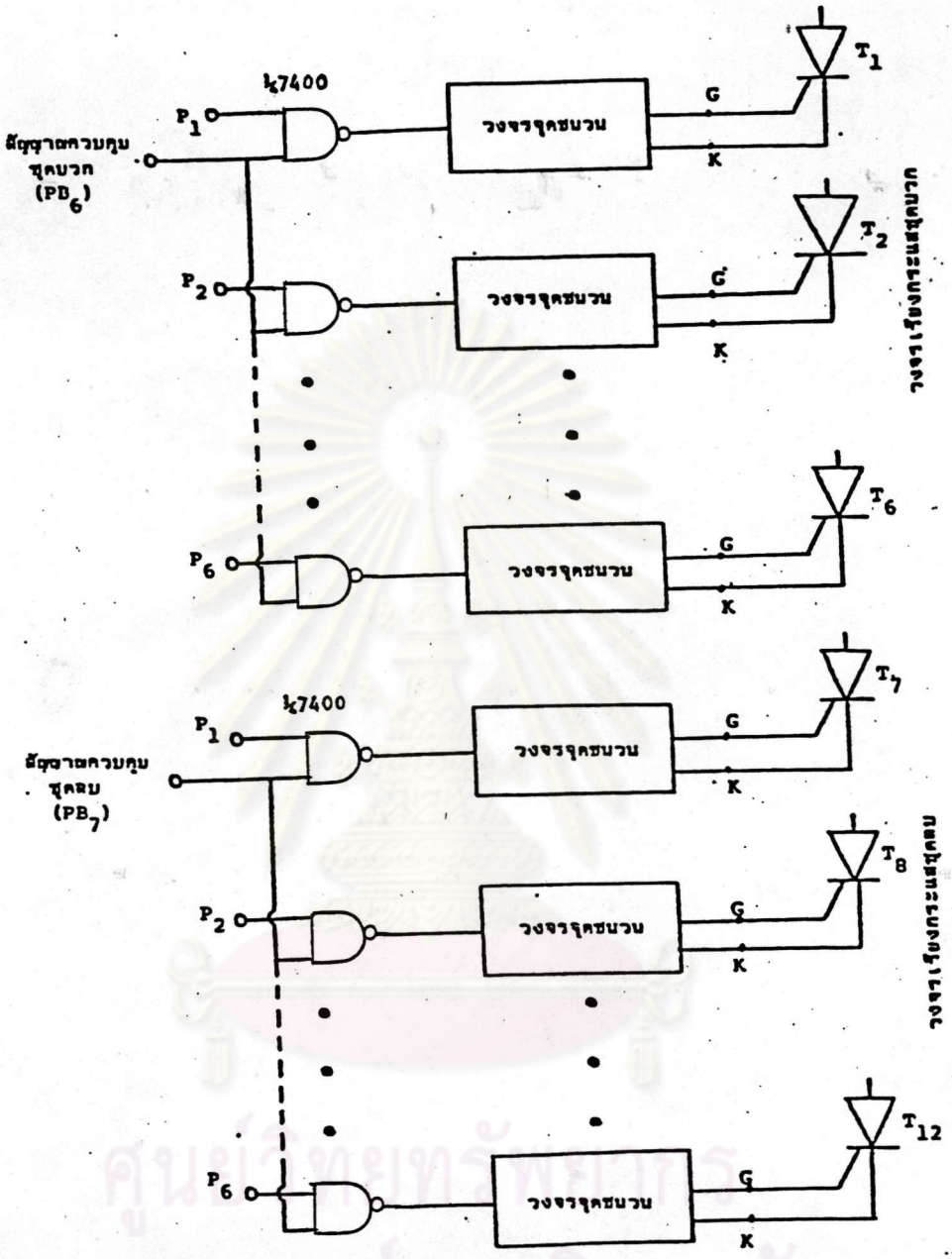
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 ชุดวงจรจุดชนวนไทริสเตอร์

ชุดวงจรจุดชนวนไทริสเตอร์ในแต่ละเฟสของชุดแรงดันด้านออก ประกอบด้วยวงจรจุดชนวนไทริสเตอร์จำนวน 12 วงจร สำหรับไทริสเตอร์ 12 ตัว ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 22

เนื่องจากสัญญาณบังคับวงจรจุดชนวนให้ทำงานเป็นแรงดัน 5 โวลต์ (สัญญาณตรรก "0") เราจึงใช้เกตแบบแนนด์ (ไอซีเบอร์ 7400 ซึ่งมีข้อมูลรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก 1 ท้ายรายงานนี้) เพื่อรับสัญญาณตรรกควบคุมที่จะเป็นต้องใช้รวม 2 สัญญาณ วงจรจุดชนวนจะทำงานเฉพาะเมื่อสัญญาณเข้าทั้งสองของเกตแบบแนนด์ เป็นสัญญาณตรรก "1" (5 โวลต์) พร้อมกันเท่านั้น วงจรนี้มีรายละเอียดดังในรูปที่ 23 ก ส่วนรูปที่ 23 ข แสดงถึงรูปคลื่นพัลส์ที่ได้จากวงจรนี้

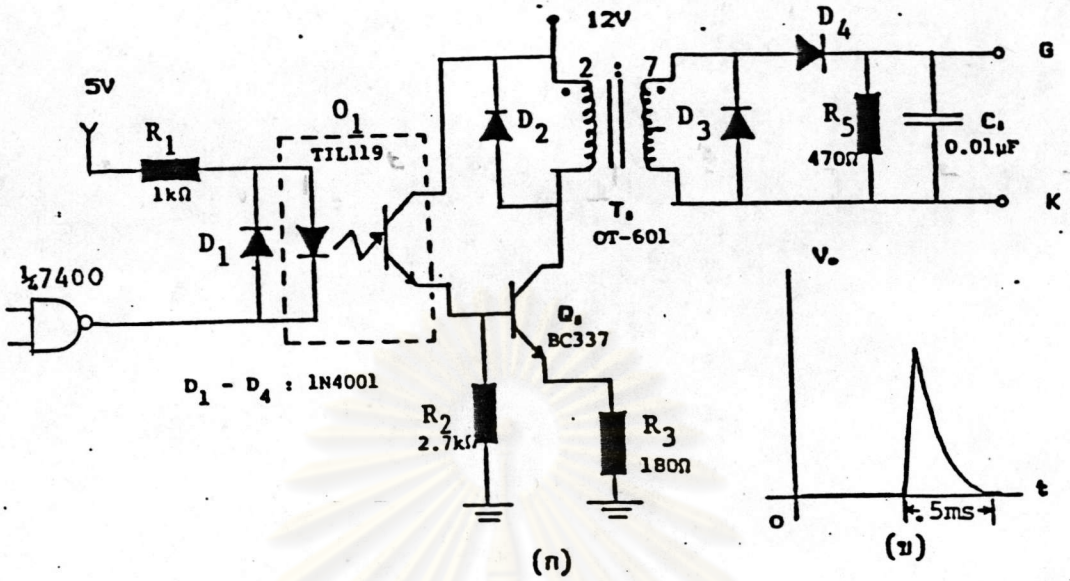
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 22 ชุดวงจรจุดชนวนไทริสเตอร์ของวงจรเรียงกระแส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 23 (ก) รายละเอียดของวงจรจุดชนวนเอสซีอาร์
(ข) สัญญาณพัลส์สำหรับจุดชนวนเอสซีอาร์

ในรูปที่ 23 ก ออปโตคัปเปลอร์ (optocoupler) เบอร์ TIL119 จะรับสัญญาณเข้าผ่านทางเกตแบบแนนด์ (1/4 7400) และปล่อยกระแสไปขับเบสของทรานซิสเตอร์ Q_1 (เบอร์ BC337) เป็นการเริ่มการทำงานของวงจรสร้างพัลส์ ซึ่งประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ดังกล่าว หม้อแปลง OT-601 (หม้อแปลงสำเร็จรูปขนาดประมาณ 1.5x1.5x2.0 cm^3 สำหรับใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์) วงจรเรียงกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง และไดโอด $D_1 - D_4$ ในระหว่างที่เกตแบบแนนด์มีสัญญาณออกเป็น 0 โวลต์ จะมีกระแสไหลผ่านไดโอดปล่อยแสงหรือแอลอีดี (LED) ของ TIL119 ประมาณ 3.5 mA ทำให้ทรานซิสเตอร์ทางด้านออกของ TIL119 นำกระแส ดังนั้นจะมีกระแสจากแหล่งจ่าย 12 V ไปยังเบสของทรานซิสเตอร์ Q_1 (BC337) ทำให้ทรานซิสเตอร์ตัวนี้นำกระแส และจะมีกระแสไหลผ่านขดลวดทั้งสองของหม้อแปลง OT-601 กระแสในขดทุติยภูมินี้จะอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุ C_1 ผ่านทางไดโอด D_4 อย่างรวดเร็ว และเมื่อสัญญาณออกจากเกตแบบแนนด์เป็นสัญญาณตรรก "1" (คือ 5 โวลต์) ออปโตคัปเปลอร์ TIL119 และทรานซิสเตอร์ Q_1 ในวงจรสร้างพัลส์จะหยุดนำกระแส ทำให้พลังงานแม่เหล็กที่สะสมอยู่ในหม้อแปลง OT-601 เปลี่ยนเป็นความร้อน โดยสร้างกระแสไหลผ่านไดโอด D_2, D_3 และความต้านทานของขดลวดทั้งสอง ในตอนนี้ C_1 จะคายประจุอย่างรวดเร็วผ่านทาง R_5 ผลก็คือวงจรสร้างพัลส์จะให้แรงดันจุดชนวนเอสซีอาร์เป็นพัลส์

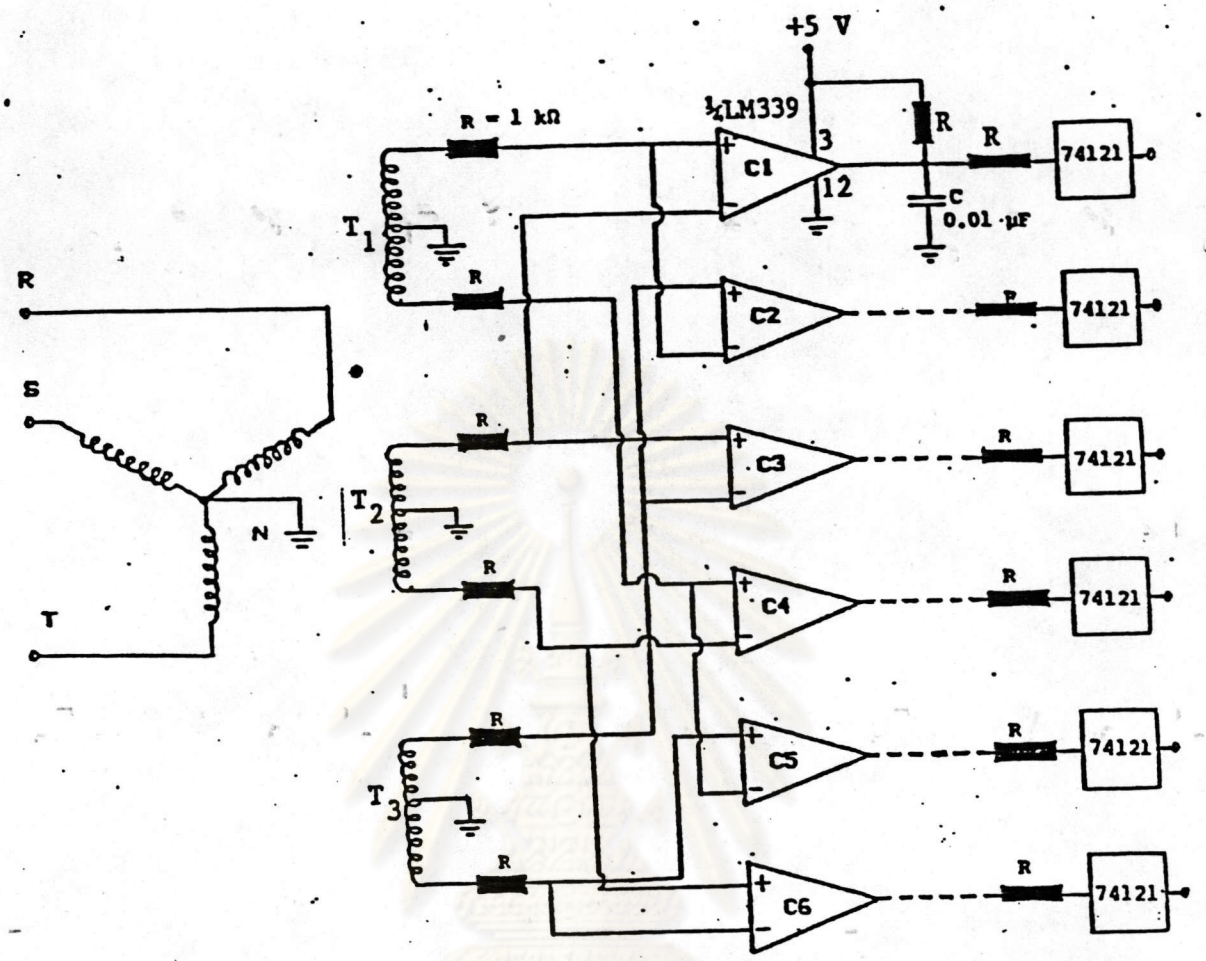
ยอดแหลม ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 23 ข ถ้ายังไม่ต่อปลายข้วด้านออกของวงจรในรูปที่ 23 ก เข้ากับเอสซีอาร์ แรงดันด้านออกจะเป็นพัลส์ที่มีค่ายอดราว 4 โวลต์ แต่เมื่อต่อกับเอสซีอาร์แล้ว ค่ายอดของแรงดันนี้จะลดเหลือเพียง 0.8 โวลต์

3.5 วงจรตรวจสัญญาณสามเฟส

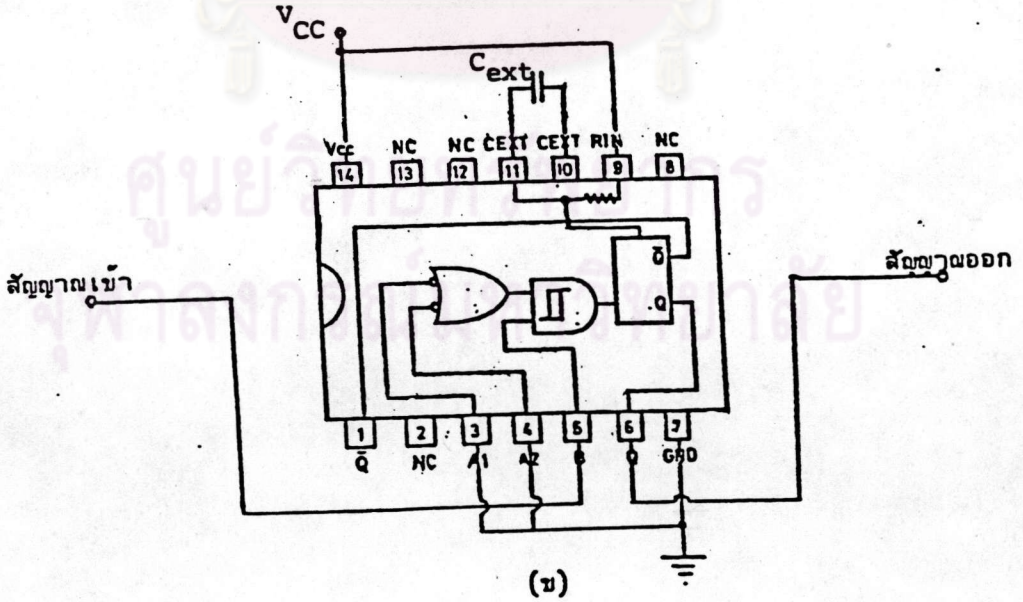
วงจรนี้ทำหน้าที่สร้างพัลส์สำหรับชี้บอกขณะเวลาที่แรงดันของระบบสามเฟส เปลี่ยนจากค่าลบเป็นค่าบวกและเปลี่ยนจากค่าบวกเป็นลบ ใน 1 รอบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในระบบสามเฟส เราจะได้พัลส์ดังกล่าวรวม 6 พัลส์ ซึ่งจะห่างกัน 60° ทางไฟฟ้า รายละเอียดของวงจรเป็นดังแผนภาพในรูปที่ 24

ส่วนประกอบทางด้านซ้ายสุดของรูปที่ 24 เป็นหม้อแปลงเฟสเดียว 3 ตัว ซึ่งทางขดปฐมภูมิมีพิกัดแรงดัน 220 V และต่อกันแบบวาย (Y) โดยมีสายร่วมต่อลงดิน ขดทุติยภูมิของหม้อแปลงทั้ง 3 ตัวมีพิกัดแรงดัน 12 V และมีจุดต่อแยกกลางซึ่งต่อลงดินร่วมกัน หม้อแปลงทุกตัวจะต้องให้แรงดันทุติยภูมิที่มีวัฏภาค (phase) ต่างกับแรงดันปฐมภูมิไม่เกิน 0.5 องศาทางไฟฟ้า เพราะมิฉะนั้นแล้ว การกำหนดตำแหน่งค่าศูนย์ของแรงดันในระบบสามเฟสจะผิดพลาดมากเกินไป แรงดันระหว่างสายของระบบสามเฟส รวม 6 แรงดัน จะเข้าสู่ตัวเปรียบเทียบสัญญาณ (รายละเอียดมีในภาคผนวก 2) ซึ่งจะเปลี่ยนแรงดันรูปคลื่นไซน์ทางด้านเข้าให้เป็นแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า แรงดันนี้จะผ่านวงจร R-C (อันเป็นวงจรกรองผ่านต่ำ ทำหน้าที่กำจัดสัญญาณรบกวนความถี่สูง) ไปสู่ภาคมัลติไวเบรเตอร์แบบเอกเสถียร(monostable multivibrator) คือไอซีเบอร์ 74121 ต่อไป ไอซีเบอร์ 74121 นี้ (รายละเอียดมีในภาคผนวก 3) จะเปลี่ยนรูปคลื่นสัญญาณเข้าให้เป็นพัลส์แคบ ๆ ซึ่งมีความกว้างพัลส์ตามสมการต่อไปนี้ (จากเอกสารอ้างอิง [19])

$$PW = 0.69(R_{int}C_{ext}) \qquad (26)$$



(ก)

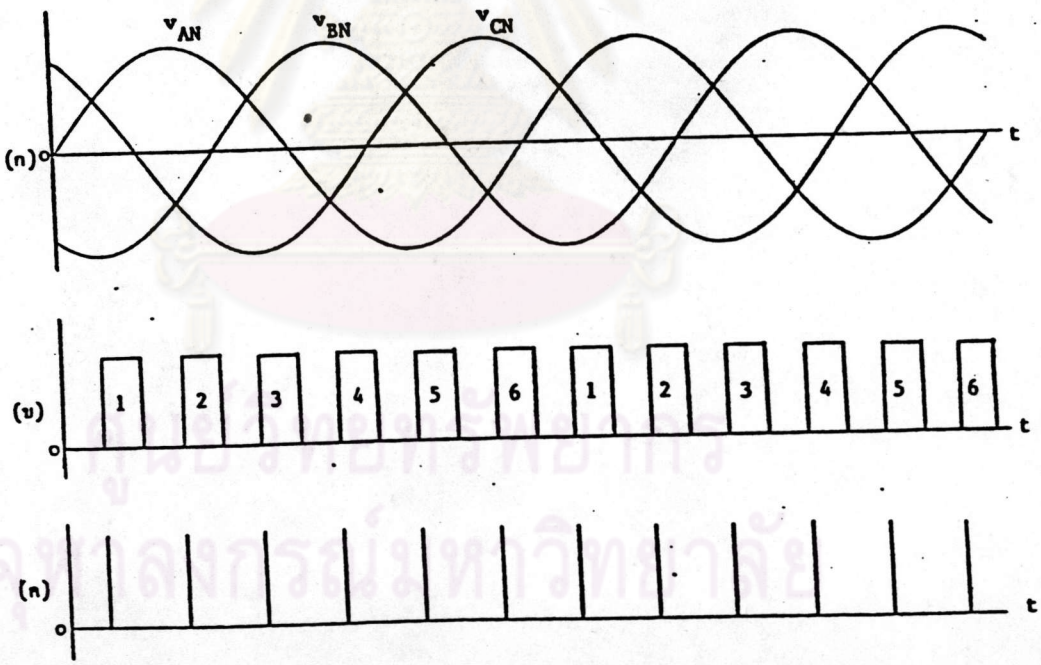


(ข)

รูปที่ 24 (ก) วงจรตรวจสัญญาณ 3 เฟส (ข) รายละเอียดการต่อไอซีเบอร์ 74121

ในที่นี้ R_{int} = ความต้านทานภายในตัวไอซีเบอร์ 74121 = 2 kΩ และ C_{ext} = ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภายนอกที่นำมาต่อ = 0.047 μF ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 24ข ความกว้างพัลส์ที่ได้จึงมีขนาดราว 0.063 มิลลิวินาที ซึ่งเมื่อเทียบกับเวลาครึ่งคาบการเปลี่ยนแปลงที่ความถี่ 50 Hz คือ 10 มิลลิวินาที แล้ว ก็นับว่าเป็นพัลส์ที่แคบมาก พัลส์จำนวน 6 พัลส์จากวงจรตรวจสัญญาณ 3 เฟสนี้ จะใช้เป็นตัวอ้างอิงสำหรับการกำหนดค่ามุมจุดชนวนของไทริสเตอร์ในวงจรเรียงกระแสของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ต่อไป

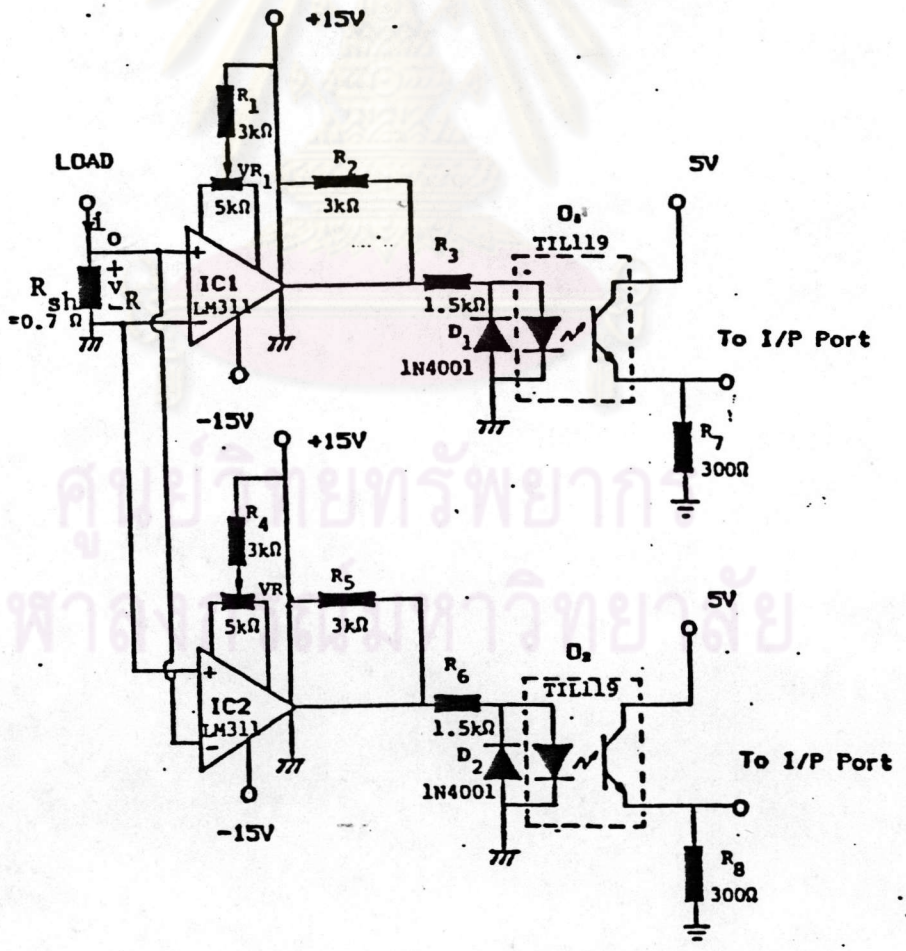
แรงดันรูปไซน์จากระบบ 3 เฟส แรงดันที่ออกจากตัวเปรียบเทียบสัญญาณ และแรงดันพัลส์ที่ใช้กำหนดตำแหน่งศูนย์ของแรงดันในระบบ 3 เฟส มีแสดงไว้ในรูปที่ 25ก - 25ค



รูปที่ 25 (ก) แรงดันรูปไซน์จากระบบ 3 เฟส
(ข) แรงดันที่ออกจากตัวเปรียบเทียบสัญญาณ
(ค) พัลส์กำหนดตำแหน่งศูนย์ของแรงดันในระบบ 3 เฟส

3.6 วงจรตรวจสถานะกระแสโหลด

วงจรนี้ทำหน้าที่สร้างสัญญาณตรรกที่บอกถึงสถานะของกระแสโหลด รวมทั้งหมด 3 สถานะ คือ กระแสโหลดมีค่าบวก กระแสโหลดมีค่าเป็นศูนย์ และกระแสโหลดมีค่าลบ สถานะทั้ง 3 นี้จะใช้ในการจัดจังหวะการจุดชนวนไทริสเตอร์ในวงจรเรียงกระแสต่อไป รายละเอียดของวงจรตรวจสัญญาณกระแสโหลดมีแสดงไว้ในรูปที่ 26 ในรูปนี้เราให้กระแสโหลดไหลผ่านตัวต้านทาน R_{sh} ซึ่งมีค่าความต้านทานราว 0.1 โอห์ม แล้วตรวจสอบแรงดัน v_R คร่อม R_{sh} ว่ามีค่าบวก ศูนย์ หรือลบ โดยใช้ตัวเปรียบเทียบสัญญาณ 2 ตัว คือ IC1 กับ IC2 ซึ่งเป็นไอซีเบอร์ LM311 (โปรดดูรายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก 4)



รูปที่ 26 วงจรตรวจสถานะของกระแสโหลด

ถ้ากระแสโหลด i_o มีค่าบวก แรงดัน v_x จะมีค่าบวกด้วย ดังนั้นตัวเปรียบเทียบ IC1 จะให้แรงดันออกค่าบวก แต่ตัวเปรียบเทียบ IC2 จะให้แรงดันออกค่าลบ ผลก็คือออปโตคัปเปลอร์ O_1 จะนำกระแส และให้สัญญาณออกเป็น 5 โวลต์ (ตรรก "1") ส่วนออปโตคัปเปลอร์ O_2 จะไม่นำกระแสและจะให้สัญญาณออกเป็น 0 โวลต์ (ตรรก "0")

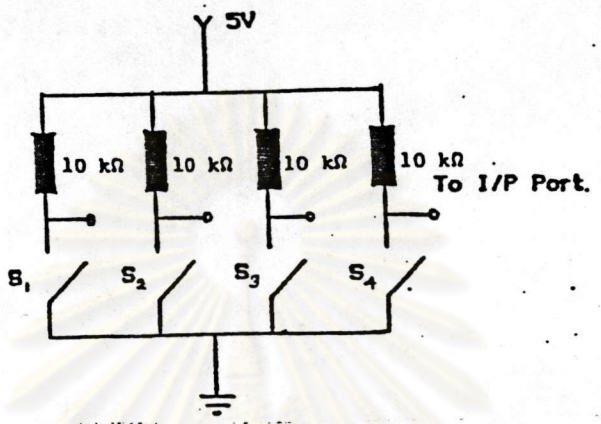
ถ้า i_o มีค่าเป็นศูนย์ แรงดัน v_x จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นแรงดันขาออกของ IC1 และ IC2 จะมีค่าใกล้เคียง 0 โวลต์ และ O_1 กับ O_2 จะไม่นำกระแส เป็นผลให้สัญญาณออกทั้งสองเป็นศูนย์โวลต์ (ตรรก "0")

ถ้า i_o มีค่าลบ v_x จะมีค่าเป็นลบ เหตุการณ์จะกลับกันกับตอนที่ i_o มีค่าบวก ผลก็คือ O_1 จะให้สัญญาณออก 0 โวลต์ (ตรรก "0") และ O_2 ให้สัญญาณออก 5 โวลต์ (ตรรก "1")

โดยสรุป ถ้ากระแสโหลด i_o มีค่าบวก ศูนย์ และลบ เราจะได้สัญญาณตรรก O_1O_2 เป็น 10, 00 และ 01 ตามลำดับ

3.7 วงจรสวิตช์ควบคุมการทำงาน

วงจรนี้สร้างสัญญาณตรรกสำหรับเดินเครื่อง หยุดเครื่อง กลับทิศทางการหมุน และเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันด้านออกของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ รายละเอียดของวงจรเป็นดังรูปที่ 27 ในรูปนี้ S_1 เป็นสวิตช์สำหรับเดินเครื่อง/หยุดเครื่อง S_2 เป็นสวิตช์สำหรับเพิ่มความถี่ของแรงดันด้านออก S_3 เป็นสวิตช์สำหรับลดความถี่ของแรงดันด้านออก S_4 เป็นสวิตช์สำหรับกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ เมื่อกดสวิตช์เหล่านี้ตัวใดตัวหนึ่ง ขั้วสัญญาณออกที่เกี่ยวข้องจะถูกต่อลงดิน ทำให้ได้สัญญาณออกเป็น 0 โวลต์ (ตรรก "0") แต่เมื่อไม่กดสวิตช์ ขั้วสัญญาณออกที่เกี่ยวข้องจะต่อกับแหล่งจ่ายแรงดัน 5 โวลต์ ผ่านทางตัวต้านทานขนาด 10 กิโลโอห์ม ส่งผลให้สัญญาณออกเป็นแรงดันประมาณ 5 โวลต์ (ตรรก "1")

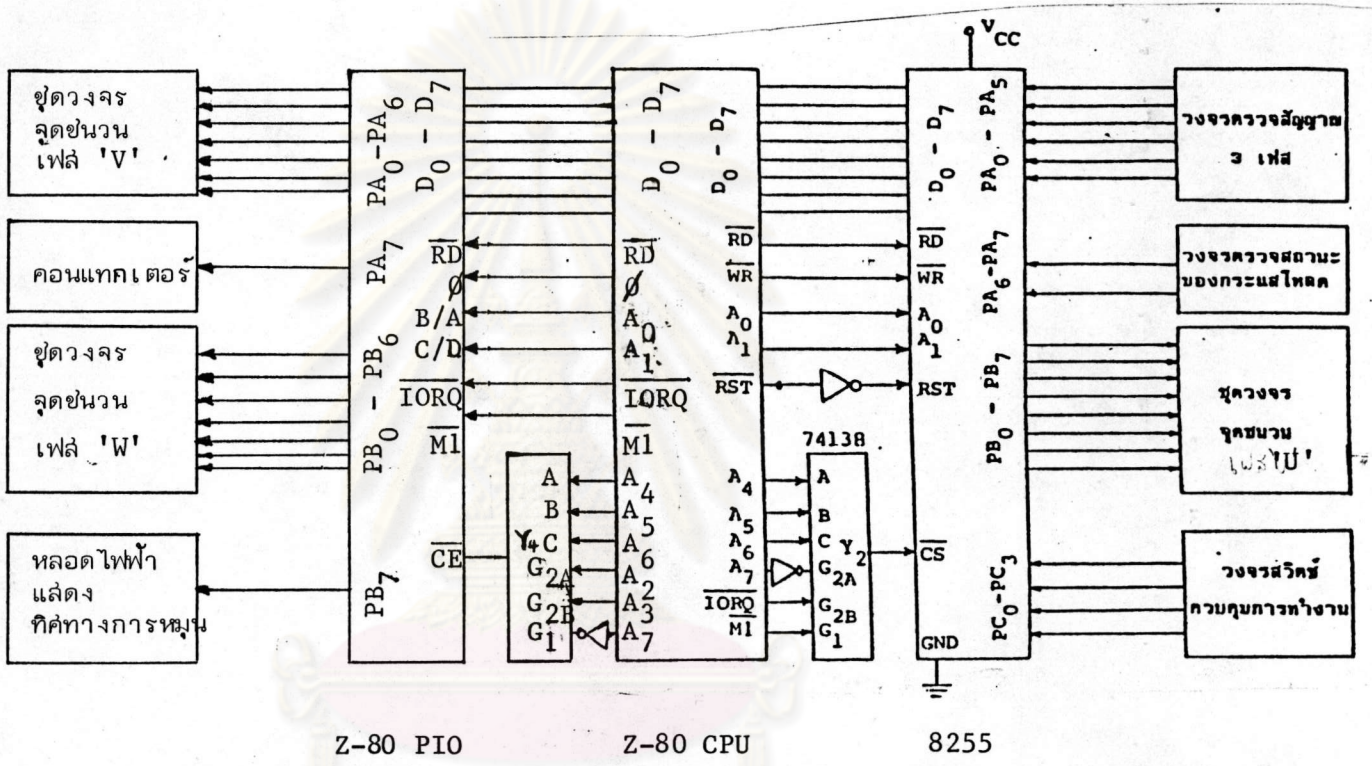


รูปที่ 27 วงจรสวิตช์ควบคุมการทำงาน

3.8 วงจรอินเตอร์เฟซ

วงจรนี้เป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างไมโครโปรเซสเซอร์กับวงจรอื่น ๆ ในระบบไซโคลคอนเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้น ตัววงจรอินเตอร์เฟซในที่นี้ก็คือไอซีเบอร์ 8255 ซึ่งมีขั้วสัญญาณเข้าสัญญาณออกที่สำคัญ และมีวิธีการต่อวงจรดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 28 รายละเอียดเกี่ยวกับขั้วสัญญาณต่าง ๆ ของไอซีเบอร์ 8255 ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 28 มีดังนี้ (สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมโปรดดูในภาคผนวก 5)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 28 วงจรอินเตอร์เฟซสำหรับไมโครโปรเซสเซอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$D_0 - D_7$ เป็นขั้วต่อกับบัสข้อมูล 8 บิต (8-bit data bus)

$PA_0 - PA_7$ เป็นขั้วต่อของทางเข้าออก A (Port A) สำหรับข้อมูล 8 บิต

$PB_0 - PB_7$ เป็นขั้วต่อของทางเข้าออก B (Port B) สำหรับข้อมูล 8 บิต

$PC_0 - PC_7$ เป็นขั้วต่อของทางเข้าออก C (Port C) สำหรับข้อมูล 8 บิต

RD เป็นขั้วรับสัญญาณควบคุมเพื่อให้ 8255 ส่งข้อมูลออกจาก $D_0 - D_7$ ไปสู่ไมโครโปรเซสเซอร์ สัญญาณเพื่อการนี้ก็คือ RD = ตรรก "0"

WR เป็นขั้วสัญญาณควบคุมเพื่อให้ 8255 รับข้อมูลจากไมโครโปรเซสเซอร์เข้าสู่บัฟเฟอร์ภายใน 8255 ผ่านทางขั้ว $D_0 - D_7$ สัญญาณเพื่อการนี้ก็คือ WR = ตรรก "0"

A_0 และ A_1 เป็นขั้วรับสัญญาณควบคุมเพื่อเลือกต่อทางเข้าออก A, B หรือ C เข้ากับบัสข้อมูลโดยผ่านทางบัฟเฟอร์ภายใน 8255 ค่าตรรกของ A_0 กับ A_1 และทางเข้าออกที่ถูกเลือกจะสัมพันธ์กันดังนี้คือ A_1A_0 = "00" หมายถึงเลือกทางเข้าออก A, A_1A_0 = "01" หมายถึงเลือกทางเข้าออก B และ A_1A_0 = "10" หมายถึงเลือกทางเข้าออก C

RST เป็นขั้วรับสัญญาณ RST = ตรรก "1" เพื่อล้างรีจิสเตอร์ควบคุม (control register) ภายใน 8255

CS เป็นขั้วรับสัญญาณควบคุม CS = ตรรก "0" เพื่อให้ 8255 สามารถรับคำสั่งจากไมโครโปรเซสเซอร์ และรับส่งข้อมูลแก่กันและกันกับไมโครโปรเซสเซอร์ได้

สัญญาณ CS นี้จะมาจากขั้ว Y_2 ของไอซีเบอร์ 74138 ซึ่งเป็นตัวถอดรหัสแบบเข้า 3 สายออก 8 สาย (3-line-to-8-line decoder) ขั้ว Y_2 ของ 74138 จะให้สัญญาณออกเป็นตรรก "0" เฉพาะเมื่อ 74138 รับสัญญาณเข้าดังต่อไปนี้เท่านั้น คือ A = "0" B = "1" C = "0" G2A = "0" G2B = "0" G1 = "1" (รายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับไอซีเบอร์ 74138 มีในภาคผนวก 6)

3.9 ไมโครโปรเซสเซอร์

ระบบควบคุมการจุดชนวนเอสซีอาร์ในวงจรเรียงกระแสของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ที่ได้ออกแบบขึ้นในงานวิจัยนี้ มีหัวใจสำคัญอยู่ที่ไมโครโปรเซสเซอร์ซึ่งเป็นแบบแผ่นพิมพ์เดี่ยว (single-board microprocessor) ที่เหมาะกับงานวัดและควบคุมในระบบอิเล็กทรอนิกส์ รายละเอียดของไมโครโปรเซสเซอร์ชนิดนี้หาดูได้จากเอกสารอ้างอิง [20] (รายละเอียดส่วนหนึ่งมีแสดงไว้ในภาคผนวก 7 ท้ายวิทยานิพนธ์นี้) ในที่นี้จะขอแสดงเฉพาะแผนภาพขั้วสัญญาณเข้าและสัญญาณออกบางส่วนของหน่วยประมวลผลกลาง (central processing unit) หรือ ซีพียู (CPU) ของไมโครโปรเซสเซอร์คือไอซีเบอร์ Z-80 ดังที่ปรากฏในรูปที่ 28

ขั้วสัญญาณเข้าและสัญญาณออกของ Z-80 ที่แสดงไว้ในรูปที่ 28 มีรายละเอียดดังนี้

D_0 - D_7 เป็นขั้วสัญญาณเข้า/สัญญาณออกที่ต่อกับบัสข้อมูลซึ่งจะต่อกับหน่วยความจำภายนอกหรือวงจรอินเตอร์เฟซเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลกัน

A_0 - A_1 และ A_4 - A_6 เป็นส่วนหนึ่งของขั้วสัญญาณจำนวน 16 ขั้ว (A_0 - A_{15}) สำหรับบอกตำแหน่งที่อยู่ (address) ของข้อมูลในหน่วยความจำ หรือเลือกใช้ทางเข้าออก (port) ของวงจรอินเตอร์เฟซ

RD เป็นขั้วส่งสัญญาณออก (RD = "0") ไปยังหน่วยความจำหรือวงจรอินเตอร์เฟซ เพื่อบอกให้รู้ว่าซีพียูต้องการอ่านข้อมูลเข้าซีพียู

WR เป็นขั้วส่งสัญญาณออก (WR = "0") ไปยังหน่วยความจำหรือวงจรอินเตอร์เฟซ เพื่อบอกให้รู้ว่าซีพียูกำลังส่งข้อมูลออกทางบัสข้อมูล และพร้อมที่จะให้หน่วยความจำนำข้อมูลไปเก็บ หรือให้วงจรอินเตอร์เฟซนำข้อมูลไปใช้

RST (หรือ RESET) เป็นขั้วรับสัญญาณเข้า (RST = "0") เพื่อตั้งต้นการทำงานของซีพียูเสียใหม่

IORQ เป็นขั้วส่งสัญญาณออก (IORQ = "0") เพื่อแสดงขั้ว A_0 - A_7 ของ Z-80 กำลังให้ข้อมูลตำแหน่งที่อยู่แก่วงจรอินเตอร์เฟซ เพื่อว่าวงจรอินเตอร์เฟซจะได้นำไปใช้ในการรับข้อมูลเข้าหรือส่งข้อมูลออก

M1 เป็นขั้วส่งสัญญาณออก (M1 = "0") เพื่อแสดงว่าซีพียูกำลังอยู่ในช่วงนำรหัสดำเนินการ (OP code) ของคำสั่ง (instruction) ในโปรแกรมสั่งงานมาใช้ นอกจากนี้ สัญญาณ M1 = "0" ยังปรากฏขึ้นพร้อมกับสัญญาณ

IORQ = "0" เพื่อแสดงว่าซีพียูรับรู้การขัดจังหวะการทำงาน (interrupt acknowledge) จากโปรแกรมสั่งงานอีกด้วย

เมื่อมีการกดสวิตช์เดินเครื่อง คือสวิตช์ S_1 ในรูปที่ 22 สัญญาณจากสวิตช์นี้จะผ่านวงจรอินเตอร์เฟซเข้าสู่ไมโครโปรเซสเซอร์ ทำให้ไมโครโปรเซสเซอร์เริ่มรับสัญญาณกำหนดตำแหน่งค่าศูนย์ของแรงดันจากแหล่งจ่าย 3 เฟส เข้าไปเปรียบเทียบกับข้อมูลตามที่กำหนดไว้ในโปรแกรมควบคุม ซึ่งในงานวิจัยนี้เขียนเป็นภาษาแอสเซมบลี (assembly) เมื่อสัญญาณกำหนดตำแหน่งค่าศูนย์ของแรงดันรับกันกับข้อมูลในโปรแกรมแล้ว ไมโครโปรเซสเซอร์ก็จะส่งสัญญาณผ่านวงจรอินเตอร์เฟซไปจุดชนวนเอสซีอาร์ในวงจรเรียงกระแส โดยให้เอสซีอาร์ตัวที่จะนำกระแสสอดคล้องกับแรงดันที่ป้อนเข้า ดังนั้นจะมีกระแสและแรงดันจากแหล่งจ่ายไปถึงโหลดตามขั้นตอนการทำงานที่เหมาะสมของไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้าสามเฟสออกสามเฟส ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อย่อย 2.2.2 ของบทที่ 2 ในระหว่างการทำงานนี้ไมโครโปรเซสเซอร์จะคอยตรวจสอบสัญญาณกระแสโหลด และจัดจังหวะการจุดชนวนเอสซีอาร์ในวงจรเรียงกระแสโดยมิให้เกิดการลัดวงจรคร่อมคู่ขั้วต่อ ๆ ของแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส

ถ้ามีการกดสวิตช์ควบคุมตัวอื่น ๆ ในวงจรควบคุมการทำงาน (รูปที่ 27) ไมโครโปรเซสเซอร์ก็จะตอบสนองให้สอดคล้องกันตามโปรแกรมที่เขียนไว้ ในกรณีที่มีการกดสวิตช์ S_1, S_2, S_3, S_4 มากกว่า 1 ตัวพร้อม ๆ กัน โปรแกรมควบคุมจะสั่งให้ไมโครโปรเซสเซอร์ทำงานตามสัญญาณของสวิตช์ที่มีค่าดัชนีล่าง (subscript) ต่ำสุด เช่นถ้ากดสวิตช์ S_3 (ลดความถี่ด้านออก) กับ S_4 (กลับทิศทางการหมุน) พร้อมกัน ไมโครโปรเซสเซอร์ก็จะทำงานตามสัญญาณของ S_3 คือลดความถี่ด้านออกเท่านั้น

รูปที่ 29 แสดงถึงผังงาน (flowchart) สังเขปของขั้นตอนวิธี (algorithm) ที่ใช้ในโปรแกรมสำหรับไมโครโปรเซสเซอร์ เพื่อให้ไซโคลคอนเวอร์เตอร์มีแรงดันด้านออก ในลักษณะที่อัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดต่อความถี่มีค่าคงตัวโดยประมาณ

การปรับค่าอัตราส่วนนี้ให้คงตัวทำได้โดยการควบคุมวัฏภาค (phase control) หรือการปรับค่ามุมจุดชนวนของเอสซีอาร์เทียบกับตำแหน่งค่าศูนย์ของแรงดัน 3 เฟส นั่นเอง

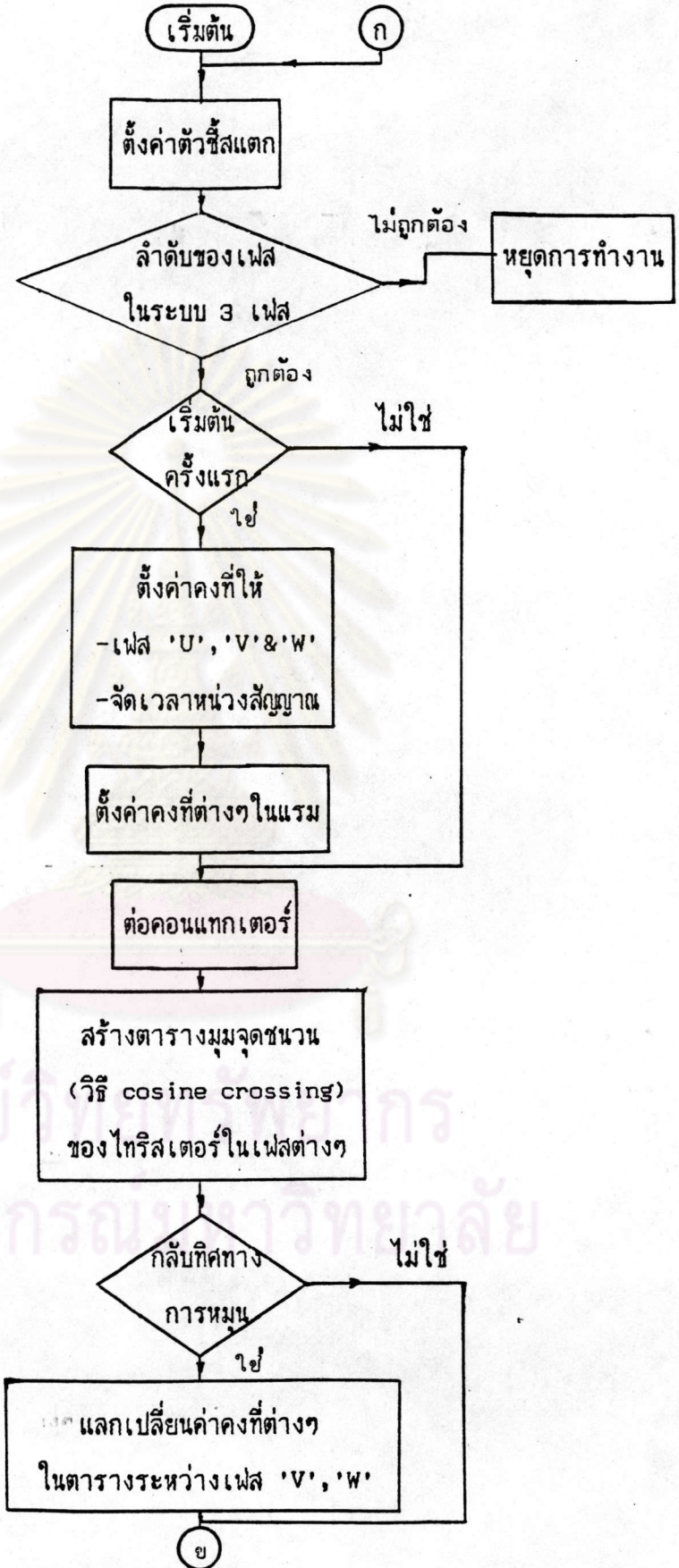
ความถี่ f_o ของแรงดันด้านออกของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้นนี้ มีความสัมพันธ์กับความถี่ f_s (= 50 Hz) ของแหล่งจ่าย 3 เฟส ตามสมการต่อไปนี้ คือ

$$f_o = [6/(N+16)]f_s \qquad (27)$$

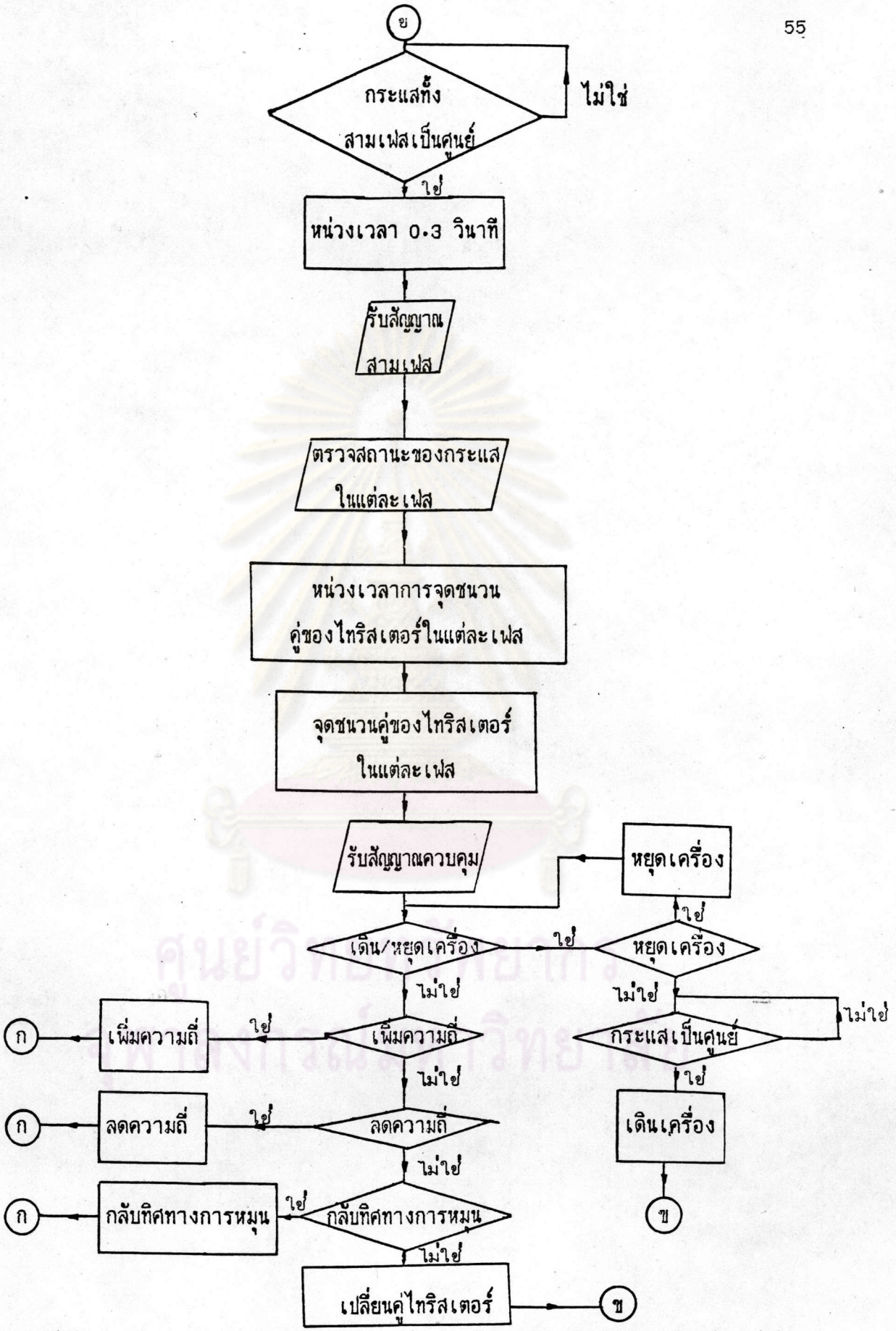
โดยที่

$$N = 1, 2, 3, \ldots, 43 \qquad (28)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



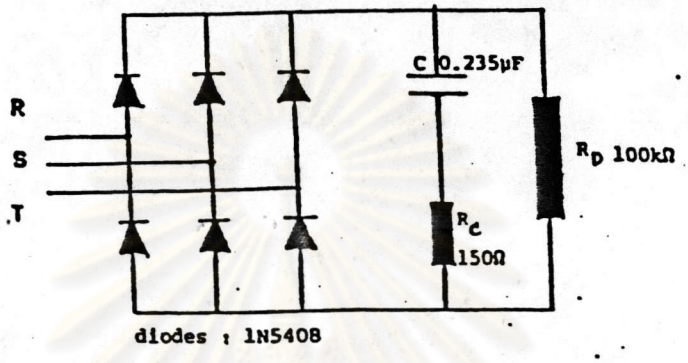
รูปที่ 29 ผังงานสำหรับไมโครโปรเซสเซอร์ซึ่งควบคุมการทำงานไซโคลคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 29 ผังงานสำหรับไมโครโปรเซสเซอร์ซึ่งควบคุมการทำงานไซโคลคอนเวอร์เตอร์(ต่อ)

3.10 วงจรลดสัญญาณรบกวนในสายด้านเข้า

วงจรนี้ (แสดงไว้ในรูปที่ 30) ใช้ลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการปิดเปิดวงจรของไทริสเตอร์ในวงจรเรียงกระแสของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ รวมทั้งสัญญาณรบกวนที่มาจากระบบแหล่งจ่ายสามเฟส



รูปที่ 30 วงจรลดสัญญาณรบกวนในสายทางด้านเข้า

ในรูปที่ 30 เราใช้ไดโอด 6 ตัวประกอบกันเป็นวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์สามเฟส ต่อกับวงจรซึ่งประกอบด้วย R_c, C และ R_D เมื่อมีแรงดันสูงผิดปรกติเกิดขึ้นระหว่างสายของระบบแหล่งจ่ายสามเฟส แรงดันส่วนเกินจะเป็นตัวสร้างพลังงานสะสมเพิ่มเติมใน C ซึ่งหลังจากหมดช่วงแรงดันสูงผิดปรกติแล้ว จะถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อนใน R_c และ R_D เป็นการลดพลังงานของสัญญาณรบกวนในสาย

ค่าของ R_c, C และ R_D สามารถคำนวณได้จากสูตรในเอกสารอ้างอิง [17] ดังนี้

$$R_c < V_{LP}/ni_{RP} \qquad (29)$$

$$C > 8L_T/(R_c)^2 \qquad (30)$$

$$R_D < (5/6)(2.8\times10^{-3}/C)/\ln[(E_{RCP}+\Delta e_c)/E_{RCP}] \qquad (31)$$

โดยที่

$$V_{LP} = 1.25E_{acp} \quad (32)$$

E_{acp} = 1.4142(ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันระหว่างสาย) = 1.4142(380) = 537 V

i_{RP} = กระแสย้อนกลับสูงสุดของเอสซีอาร์แต่ละตัว = 0.5 mA

L_T = ความเหนี่ยวนำในสายของระบบจ่ายกำลัง L_b = 37.5 μH

n = จำนวนเอสซีอาร์ที่ต่อขนานกันในแต่ละกิ่ง = 1

และ

$$\Delta e_c = 0.184ni_{RP}R_c \quad (33)$$

ค่า R_D ในสมการ (31) มีตัวประกอบ 5/6 คูณเพราะในที่นี้เราใช้ความถี่ 50 เฮิรตซ์ แทนที่จะเป็น 60 เฮิรตซ์

จากสมการ (32) และจากค่า E_{acp} = 537 โวลต์ เราได้ V_{LP} = 671 โวลต์ ดังนั้นสมการ (29) จะให้

$$R_c < 671/(1x0.5x10^{-3}) = 1.342x10^3 \quad \Omega$$

ในที่นี้เลือกใช้ R_c = 150 Ω เพื่อให้ C อัดประจุได้เร็ว และช่วยให้แรงดันคร่อม C เพิ่มขึ้นน้อย จากสมการ (30) เราได้

$$C > 8(37.5x10^{-6})/(150^2) = 1.33X10^{-8} \quad F$$

เลือกใช้ $C = 0.235x10^{-6} = 0.235$ μF

จากสมการ (33) เราได้

$$\Delta e_c = 0.184(1)(0.5\times10^{-3})(150) = 0.014 \text{ V}$$

ดังนั้นสมการ (16) จะให้

$$R_D < (5/6)(2.8\times10^{-3}/0.235\times10^{-6})/\ln(537.014/537)$$
$$= 3.18\times10^{5}\ \Omega$$

เลือกใช้ $R_D = 10^5\ \Omega = 100\ k\Omega$

ค่ากำลังสูญเสียใน R_C และ R_D หาได้จากสูตรต่อไปนี้ (เอกสารอ้างอิง [17])

$$W_{RC} = [L_T(ni_{RP})^2 - 0.5C(\Delta e_c)^2]360(5/6) \quad (34)$$
$$= [37.5\times10^{-6}(0.5)^2 - 0.5(0.235\times10^{-6})(0.014)^2(300)$$
$$= 2.8\times10^{-3}\ W$$

$$W_{RD} = (E_{acp})^2/R_D + 0.5C(\Delta e_c)^2(360)(5/6) \quad (35)$$
$$= (537)^2/(10^5 + 0.5(0.235\times10^{-6})(0.014)^2(300) = 2.9\ W$$

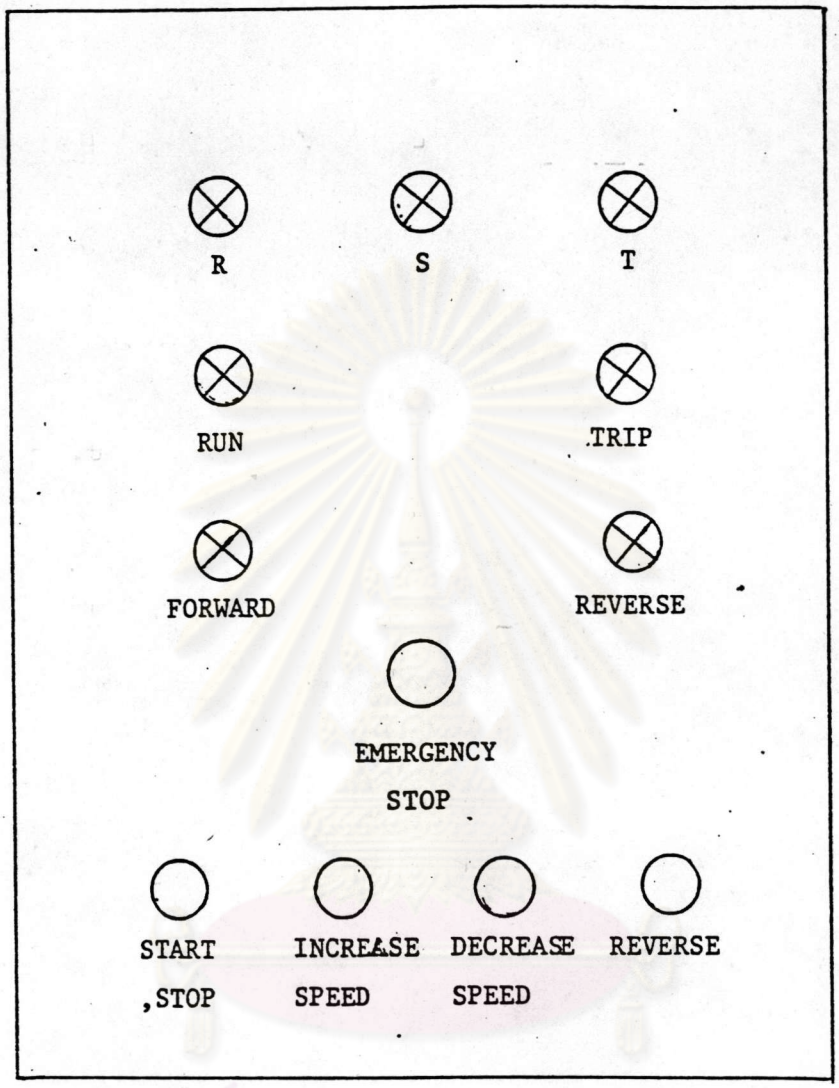
ดังนั้นเราจะเลือกใช้ $R_C = 150\ \Omega$, 0.5 W และ $R_D = 100\ k\Omega$, 5 W

หมายเหตุ สมการ (34) และ (35) มีตัวประกอบ 5/6 มาคูณต่อท้ายนิพจน์ทางขวามือ เนื่องจากในที่นี้เราใช้ความถี่ของแรงดันจากแหล่งจ่ายเป็น 50 เฮิรตซ์แทนที่จะเป็น 60 เฮิรตซ์

3.11 แผนผังของเครื่องไซโคลคอนเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้น

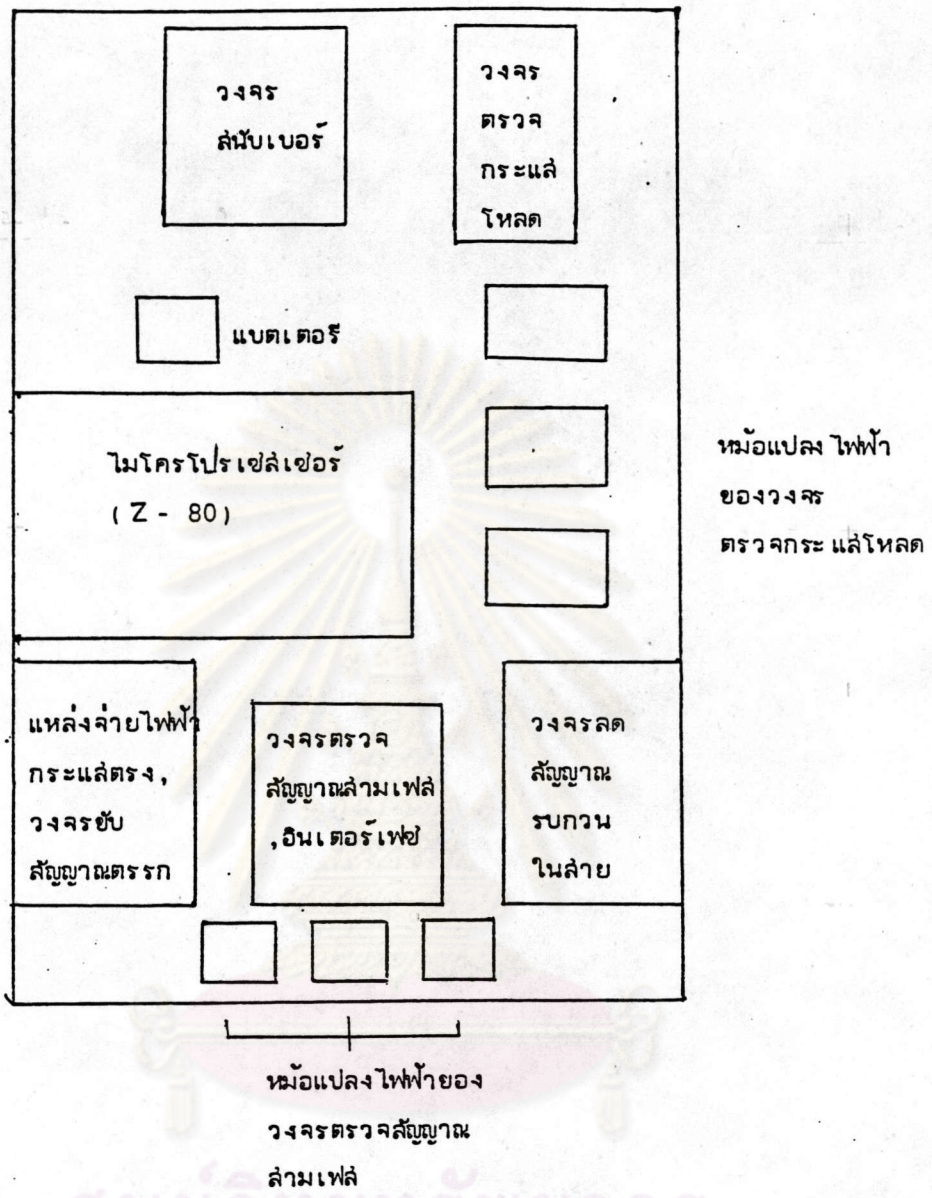
วงจรต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบของระบบไซโคลคอนเวอร์เตอร์ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นและได้กล่าวถึงในหัวข้อ 3.3 ถึง 3.10 มีตำแหน่งที่วางในเครื่องไซโคลคอนเวอร์เตอร์ตามแผนผังในรูปที่ 31

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



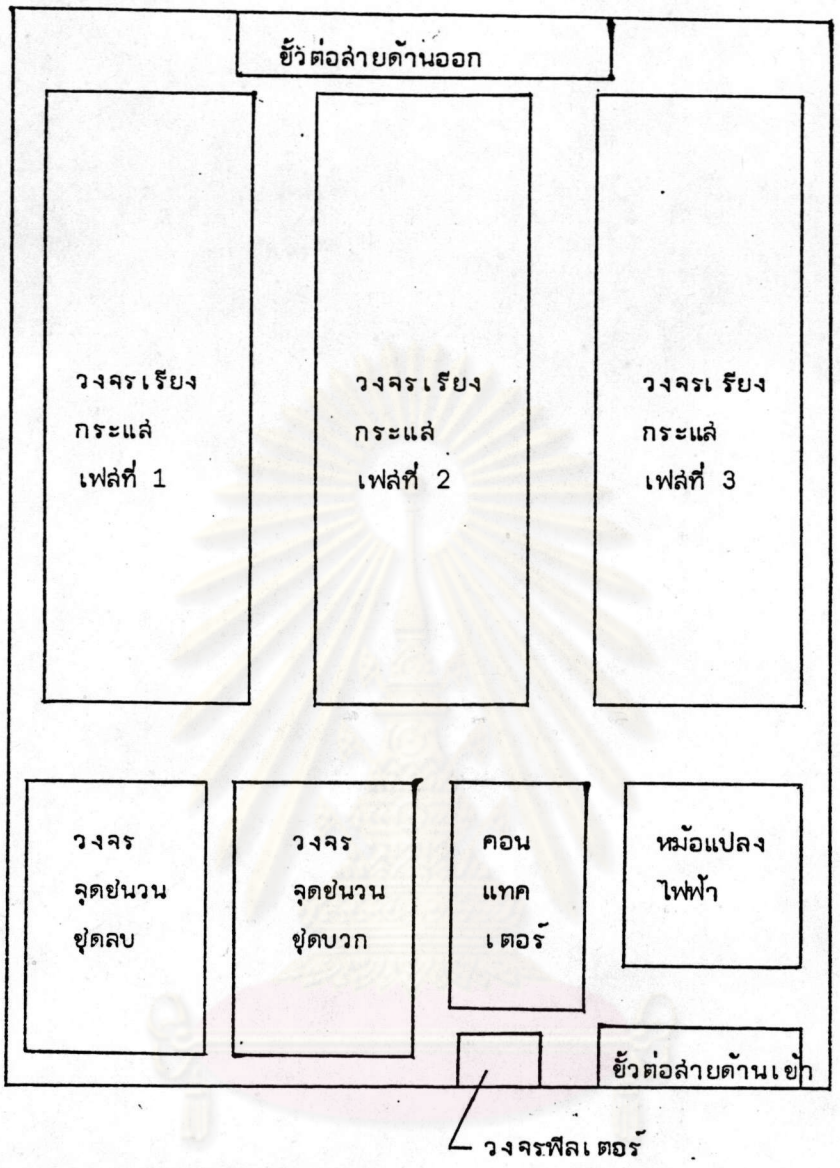
รูปที่ 31 (ก) แผนผังปุ่มควบคุมของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 31 (ข) แผนผังการวางตำแหน่งวงจรต่าง ๆ
บนฝาครอบของเครื่องไซโคลคอนเวอร์เตอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 31 (ค) แผนผังการวางตำแหน่งวงจรต่าง ๆ ของเครื่องไซโคลคอนเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย