หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์

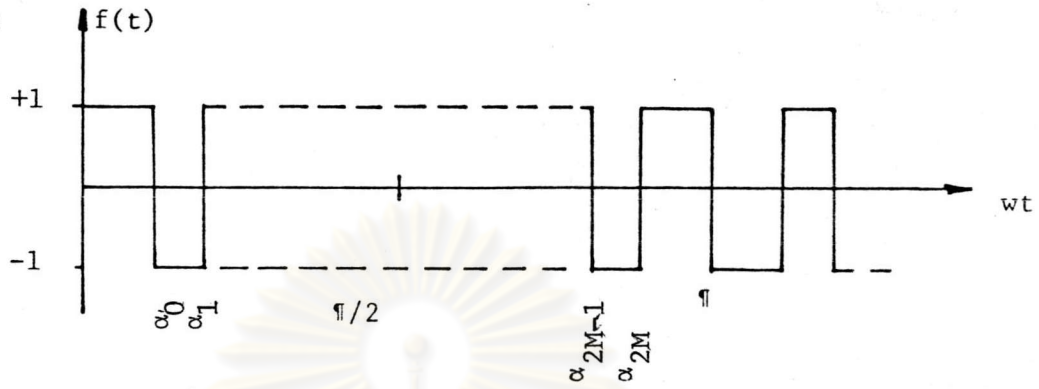
4.1 ข้อกำหนดในการออกแบบ

สำหรับส่วนควบคุม (control) ของเครื่องขับนำมอเตอร์กระแสสลับแบบเหนี่ยวนำสามเฟสที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้นนี้ ได้อาศัยวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางและนำมาใช้ในการควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์กำลัง แต่เดิมนั้นสัญญาณแบบมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) ถูกกำเนิดขึ้นมาจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยอาศัยเทคนิคทางด้านฮาร์ดแวร์อย่างเดียว แต่ปัจจุบันเราสามารถนำเอาไมโครโปรเซสเซอร์มาใช้เป็นส่วนสำคัญโดยใช้การมอดูเลตแบบเชิงเลข และเทคนิคทางด้านซอฟต์แวร์ [9] ซึ่งมีข้อดีคือ ความคล่องตัวของการออกแบบทางด้านซอฟต์แวร์

หลักการของสัญญาณแบบมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) แบบหนึ่ง คือ การสร้างสัญญาณพัลส์ที่ความถี่ของการสวิตช์คงที่ และมีความกว้างแปรเปลี่ยนไปเป็นคาบที่ความถี่หลักมูลของอินเวอร์เตอร์ สัญญาณ PWM แบบนี้จะมีองค์ประกอบหลักมูลที่มีช่วงสูงตามที่กำหนด และมีฮาร์มอนิกส์ลำดับต่ำ ๆ มีค่าเป็นศูนย์ ฮาร์มอนิกส์ที่มีนัยสำคัญจะเกิดขึ้นที่ความถี่ของการสวิตช์ สำหรับอินเวอร์เตอร์กำลังต่ำ ๆ เราสามารถสวิตช์ด้วยความถี่สูงได้ ฮาร์มอนิกส์จะเกิดที่ความถี่สูงพอที่จะกรองออกโดยง่ายหรือไม่เป็นปัญหาต่อโหลด ความถี่สูงสุดของสวิตช์จะขึ้นกับช่วงเวลา turn-on และ turn-off ของสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์ อีกประการหนึ่งกำลังสูญเสียในการสวิตช์ทำให้อินเวอร์เตอร์ไม่สามารถสวิตช์ที่ความถี่สูงมาก ๆ ได้

วงจรมอดูเลเตอร์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นนี้ได้ใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ต่ำ [7] โดยการคำนวณค่ามุมการสวิตช์ที่เหมาะสม [8] แล้วนำมาสร้างเป็นตารางของ "แพตเทอร์นการสวิตช์" แล้วนำไปเก็บไว้ในหน่วยความจำกึ่งถาวร (EPROM) มอดูเลเตอร์นี้ได้ออกแบบไว้ให้นำไปควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ให้มีความถี่หลักมูลตั้งแต่ 5 เฮิรตซ์ ถึง 50 เฮิรตซ์ และปรับความถี่ได้ครั้งละ 1 เฮิรตซ์ โดยความถี่สูงสุดของการสวิตช์ไม่เกิน 300 เฮิรตซ์ และสามารถกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่ต่ำกว่า 250 เฮิรตซ์ได้

สัญญาณ PWM ซึ่งมีการสวิตช์ M ครั้ง ในเศษหนึ่งส่วนสี่คาบจะมีรูปคลื่น ดังในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สัญญาณ PWM

ซึ่งรายละเอียดการคำนวณค่ามุมการสวิตช์ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 การเลือกค่าองค์ประกอบหลักมูล (a_1) และจำนวนมุมการสวิตช์ในเศษหนึ่งส่วนสี่คาบ (M) ถือหลักดังนี้

1) การเลือกค่าองค์ประกอบหลักมูลจะเริ่มต้นจาก a_1 = 1 ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์และจะมีการชดเชยแรงดันที่ความถี่ต่ำประมาณ 25 % ซึ่งที่ความถี่ต่ำสุด 5 เฮิรตซ์ จะได้ a_1 = 0.32

2) ให้ความถี่ของการสวิตช์ f_s เกือบจะคงที่ตลอดช่วงการแปรความถี่หลักมูล

3) ให้กำจัดฮาร์มอนิกส์ที่มีความถี่ต่ำกว่าค่า ๆ หนึ่งตลอดช่วงการแปรความถี่หลักมูล

จากสมการ

$$f_s = (2M + 1) f_o \qquad (4.1)$$

เมื่อ

f_s = ความถี่ของการสวิตช์

f_o = ความถี่ขององค์ประกอบหลักมูล

ในกรณีของอินเวอร์เตอร์สามเฟสฮาร์มอนิกส์ที่มีค่าเป็นตัวคูณของฮาร์มอนิกส์ที่สามจะลบล้างกันไป จะได้

$$f_z = (6 \times i - 1) f_o ; \; i = \frac{M+1}{2} \text{ เมื่อ } M \text{ เป็นเลขคี่}$$

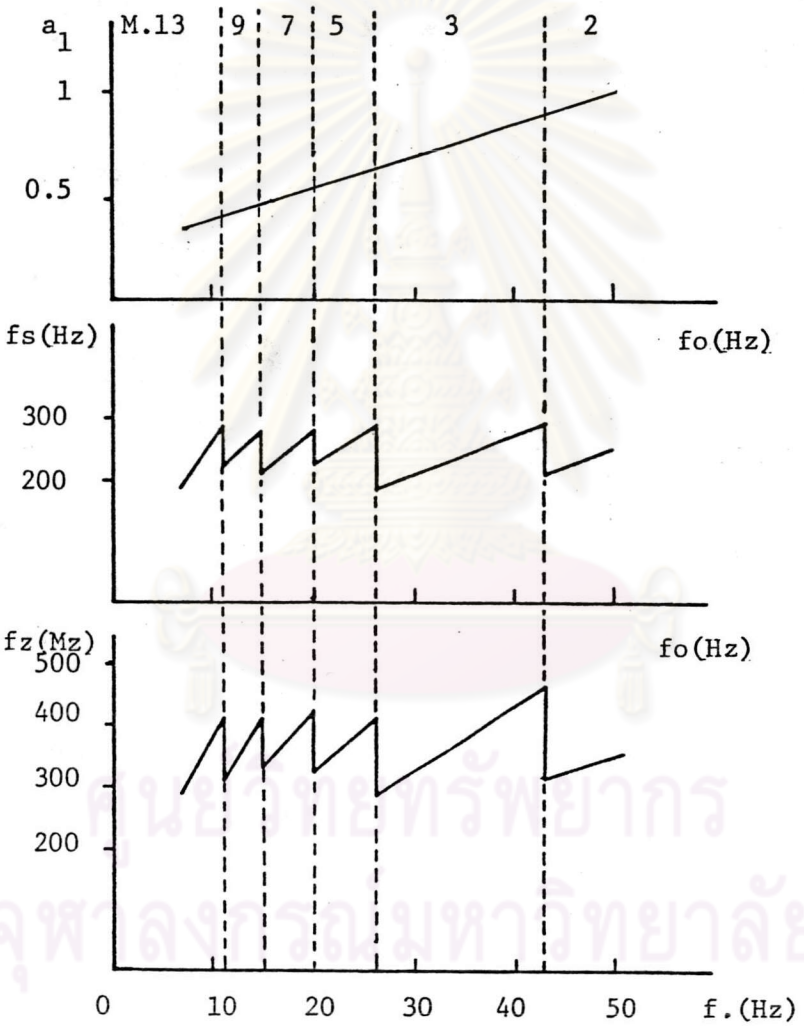
$$= (6 \times i + 1) f_o ; \; i = \frac{M}{2} \text{ เมื่อ } M \text{ เป็นเลขคู่} \qquad (4.2)$$

เมื่อ f_z = ความถี่ของฮาร์มอนิกส์แรกที่ไม่เป็นศูนย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 10202248

จะเห็นได้ว่า f_s และ f_z ขึ้นอยู่กับ M และ f_o เมื่อแปร f_o เราอาจจะตั้งเงื่อนไขว่าต้องการให้ f_s มีค่าต่ำกว่าค่า ค่าหนึ่ง คือ 300 เฮิรตซ์ และให้ f_z มีค่าสูงกว่าค่า ๆ หนึ่ง คือ 250 เฮิรตซ์ เพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขนี้ เราจะต้องเลือก M ค่าต่าง ๆ กันสำหรับย่านความถี่ f_o ต่าง ๆ กัน ซึ่งในวงจรมอดูเลเตอร์ที่สร้างขึ้นนี้ได้ออกแบบโดยเลือก a_1 และ M ค่าต่าง ๆ กันดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) ซึ่งจะให้ f_s กับ f_z ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ข) และ 4.2 (ค) ตามลำดับ



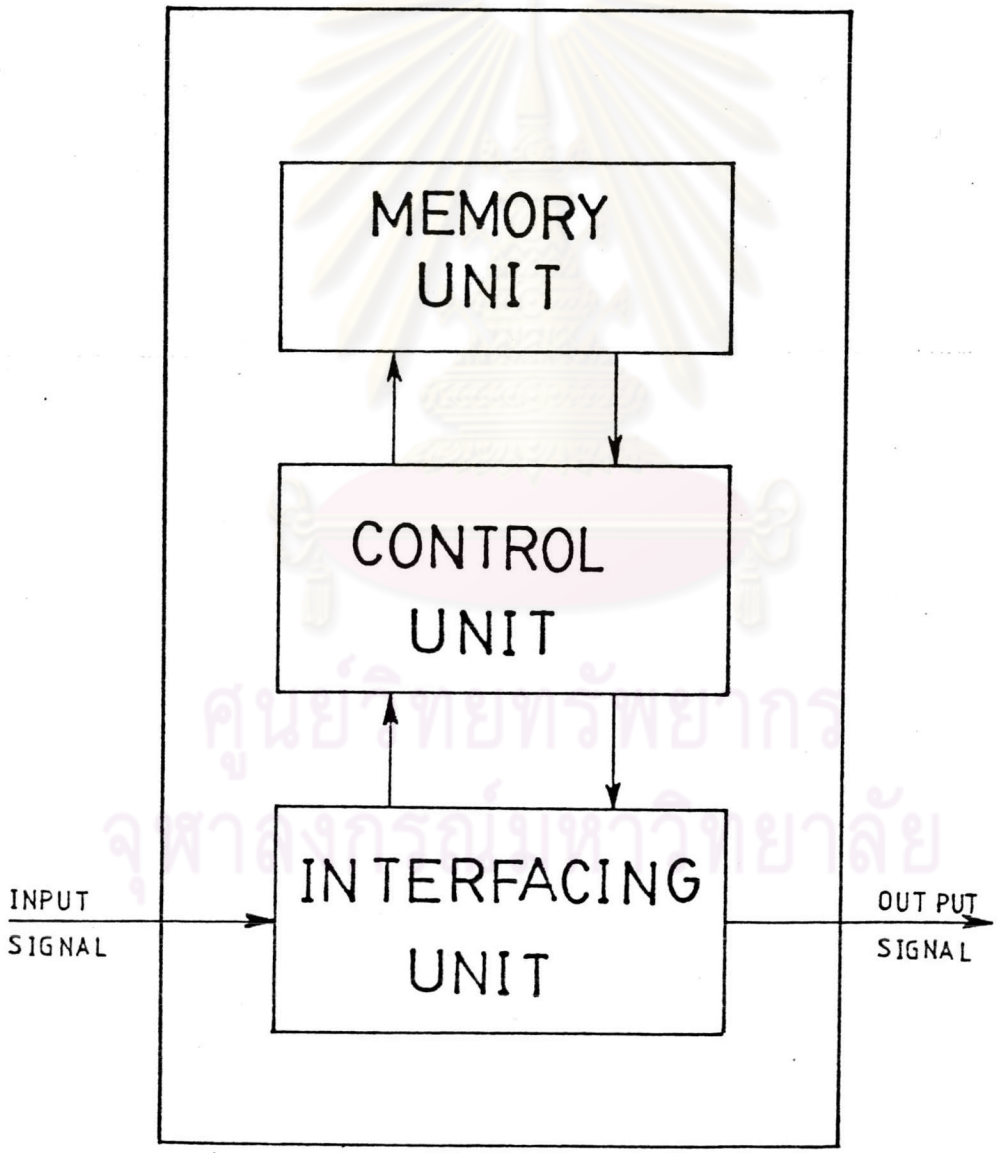
รูปที่ 4.2 (ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักมูล a_1 กับความถี่หลักมูล f_o และแสดงการเลือกพารามิเตอร์ M ในแต่ละช่วงความถี่ f_o ด้วย

(ข) ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เมื่อเลือกพารามิเตอร์ M ตามรูป (ก)

(ค) ความถี่ของฮาร์มอนิกส์แรกที่ไม่เป็นศูนย์เมื่อเลือกพารามิเตอร์ M ตามรูป (ก)

4.2 การออกแบบวงจรมอดูเลเตอร์

วงจรมอดูเลเตอร์ที่ควบคุมการทำงานด้วยไมโครโปรเซสเซอร์จะมีโครงสร้างคล้ายกับระบบไมโครคอมพิวเตอร์ทั่ว ๆ ไป คือ ประกอบด้วย CPU หน่วยความจำและวงจรอินเตอร์เฟสต่าง ๆ ดังแสดงวงจรบล็อคไดอะแกรม (block diagram) ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงบล็อคไดอะแกรมของวงจรมอดูเลเตอร์

จากบล็อกไดอะแกรมส่วนประกอบที่สำคัญของวงจรมีดังนี้

1) หน่วยควบคุม (Control Unit) ประกอบด้วย

1.1 ซีพียู (CPU) เป็นไมโครโปรเซสเซอร์ เบอร์ Z-80 ทำหน้าที่ควบคุมและประมวลผลของระบบทั้งหมด

1.2 ชุดกำเนิดสัญญาณนาฬิกาให้กับซีพียู (CPU-Clock) เพื่อเป็นตัวกำกำหนดสถานะและขั้นตอนการทำงานของซีพียูให้เป็นจังหวะที่ถูกต้อง

1.3 วงจรเข้ารหัส (Decoder) ทำหน้าที่เข้ารหัสสัญญาณจากซีพียู เพื่อส่งไปควบคุมผังหน่วยต่าง ๆ

2) หน่วยความจำ (Memory Unit) ประกอบด้วย

2.1 อีพรอม (EPROM) เป็นส่วนที่ใช้ในการเก็บข้อมูลแบบกึ่งถาวร และโปรแกรมมอนิเตอร์ (Monitor Program) เพื่อให้ระบบทำงานตามขั้นตอนที่ถูกต้องตามโปรแกรมที่ได้โปรแกรมเอาไว้

2.2 แรม (RAM) เป็นส่วนที่ใช้ในการเก็บข้อมูลแบบชั่วคราวและสามารถเปลี่ยนแปลงข้อมูลได้

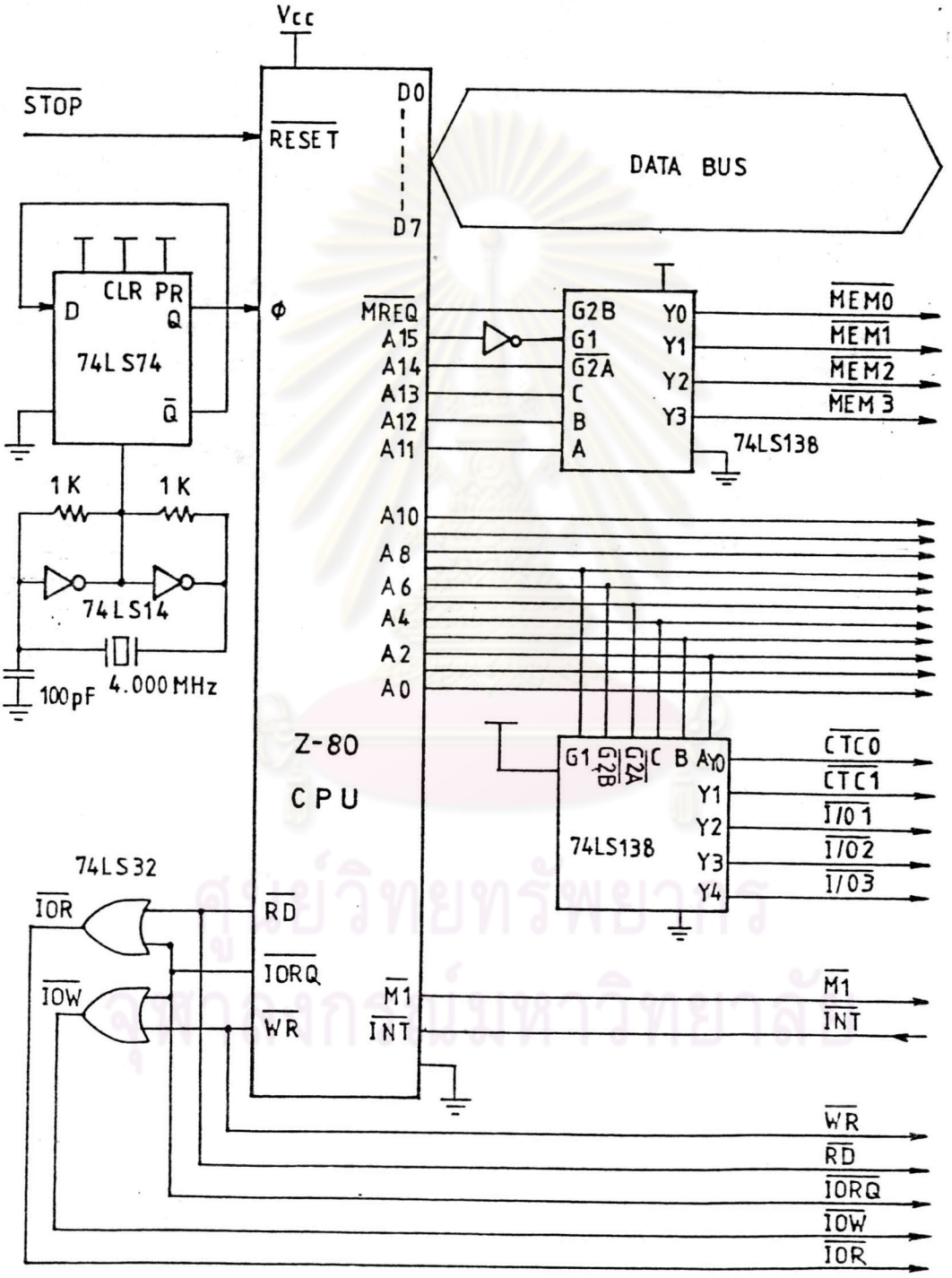
3) หน่วยอินเตอร์เฟส (Interfacing Unit) เป็นส่วนเชื่อมโยงสัญญาณต่าง ๆ ระหว่าง ซีพียูกับอุปกรณ์ภายนอก เมื่อซีพียูต้องการจะติดต่อกับอุปกรณ์ชุดใด ซีพียู ก็จะส่งข้อมูลและสัญญาณควบคุมผ่านหน่วยอินเตอร์เฟส

การออกแบบวงจรมอดูเลเตอร์จะแบ่งวงจรออกเป็นภาค ๆ ดังนี้ คือ

4.2.1 ภาคประมวลผลกลาง มีหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบประกอบไปด้วยไมโครโปรเซสเซอร์เบอร์ Z- 80 ร่วมกับวงจรในหน่วยต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งสามารถแยกออกเป็นส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญดังต่อไปนี้

ส่วนกำเนิดสัญญาณนาฬิกาให้กับ ซีพียู ใช้ไอซีเบอร์ 74LS14 ร่วมกับคริสตัล (crystal) ที่มีค่าความถี่ 4 เมกะเฮิรตซ์ เป็นชุดกำเนิดสัญญาณความถี่ 4 เมกะเฮิรตซ์ เพื่อป้อนให้กับไอซีเบอร์ 74LS74 ทำการหารความถี่ลงด้วย 2 ได้เป็นสัญญาณนาฬิกาความถี่ 2 เมกะเฮริตซ์ เมื่อป้อนให้กับซีพียูและอุปกรณ์ตัวอื่น ๆ ที่ต้องการสัญญาณนาฬิกา เช่น ไอซีเบอร์ Z-80 CTC เป็นต้น

ส่วนส่งสัญญาณไปเลือกหน่วยความจำที่ซีพียูต้องการจะติดต่อด้วย



รูปที่ 4.4 ภาคประมวลผลกลาง

ประกอบด้วยวงจรเข้ารหัส (Decoder) ต่าง ๆ ทำหน้าที่เข้ารหัสจากสัญญาณทางแอดเดรสบัส (Adress Bus) แยกออกเป็นสองส่วนย่อยคือ ส่วนเข้ารหัสเพื่อเลือกหน่วยความจำใช้ไอซีเบอร์ 74LS138 ทำหน้าที่เข้ารหัสจากแอดเดรสบัสสายที่ A11-A15 ร่วมกับสัญญาณ $\overline{\text{MREQ}}$ เพื่อแยกการใช้อุปกรณ์พวกหน่วยความจำไม่ให้ปะปนกับการเลือกหน่วยอินพุท/เอาท์พุท (Input/Output) ในส่วนที่สองจะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่เข้ารหัสจากสายแอดเดรสบัสสายที่ A3-A7 เมื่อให้กำเนิดสัญญาณเลือกการติดต่อกับอุปกรณ์อินพุท/เอาท์พุทโดยใช้ไอซีเบอร์ 74LS138

ในการติดต่อระหว่างซีพียูกับหน่วยความจำ ซีพียูจะส่งสัญญาณเป็นรหัสประจำตำแหน่งของหน่วยความจำที่ต้องการจะติดต่อด้วยออกทางแอดเดรสบัส (ddress us) พร้อมกับสัญญาณขอติดต่อกับหน่วยความจำออกทางขา $\overline{\text{MREQ}}$ ซึ่งในที่นี้ใช้หน่วยความจำแบบกึ่งถาวร (EPROM) เบอร์ 2716 จำนวน 2 ตัว ซึ่งมีความจุตัวละ 2 กิโลไบท์ ทำหน้าที่เก็บข้อมูลของโปรแกรมมอนิเตอร์และแพตเทอร์นการสวิตช์ และหน่วยความจำที่สามารถเก็บข้อมูลแบบชั่วคราว (RAM) ใช้ไอซีเบอร์ 6116 ซึ่งมีความจุ 2 กิโลไบท์จำนวน 1 ตัว

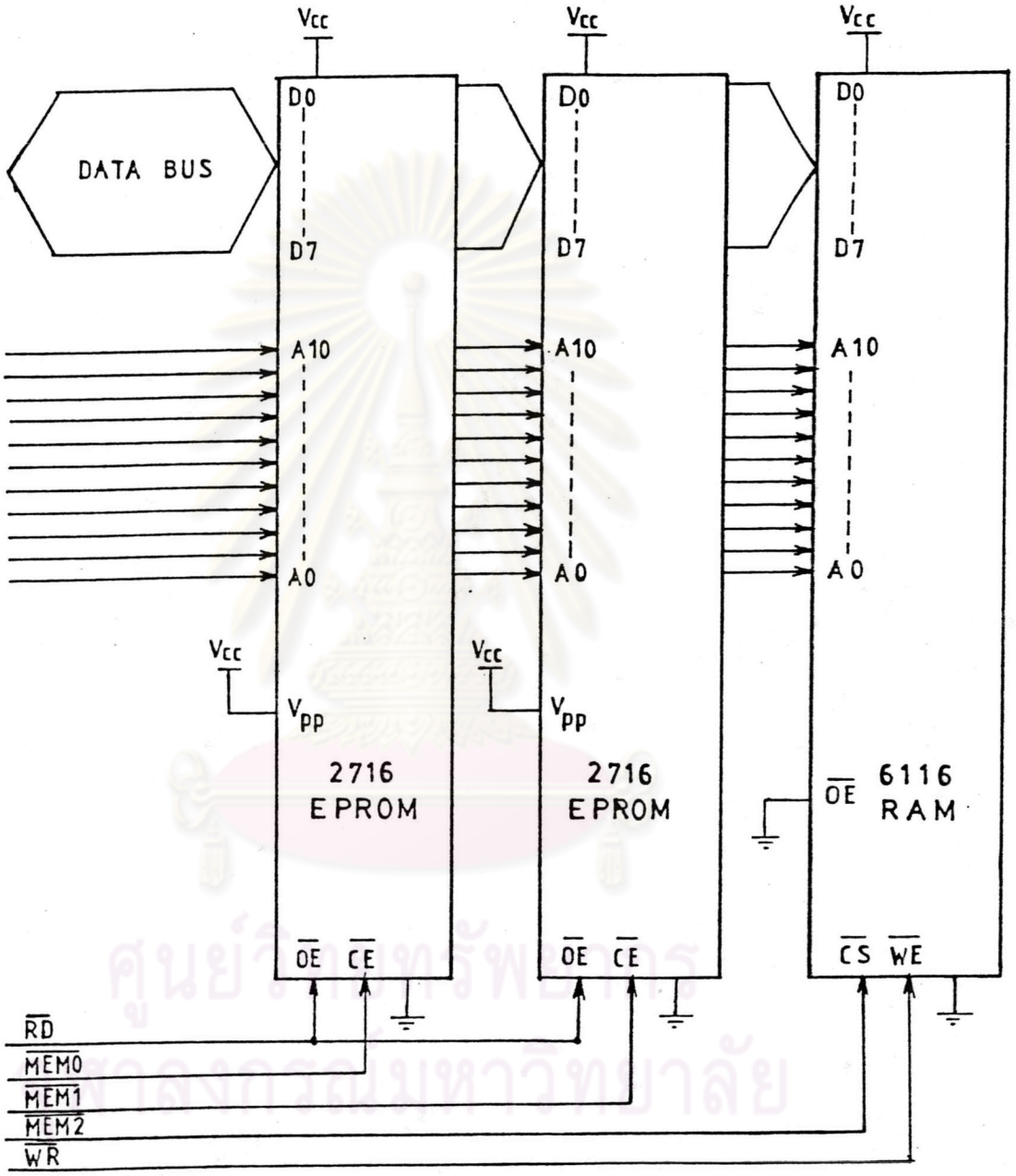
สำหรับการติดต่อระหว่างซีพียูกับหน่วยอินพุท/เอาท์พุทนั้น ซีพียูจะส่งสัญญาณเป็นหมายเลขประจำพอร์ทออกทางแอดเดรสบัสสายที่ A0-A7 พร้อมกับสัญญาณขอติดต่อกับหน่วยอินพุท/เอาท์พุทออกทางขา $\overline{\text{IORQ}}$ โดยใช้ไอซีเบอร์ 74LS138 เป็นวงจรเข้ารหัส

4.2.2 หน่วยความจำเนื่องจากโปรแกรมควบคุมการทำงานหรือโปรแกรมมอนิเตอร์ (Monitor Program) ของวงจรมอดูเลเตอร์นี้จะมีความยาวประมาณ 2 กิโลไบท์ จึงใช้หน่วยความจำที่เป็นไอซีหน่วยความจำแบบกึ่งถาวร (EPROM) เบอร์ 2716 จำนวน 1 ตัว ซึ่งมีความจุ 2 กิโลไบท์ ทำหน้าที่เก็บข้อมูลของโปรแกรมมอนิเตอร์ และแพตเทอร์นการสวิตช์ และได้ต่อวงจรเผื่อไว้สำหรับในกรณีที่ต้องการเก็บข้อมูลของแพตเทอร์นการสวิตช์มากขึ้น ก็สามารถเพิ่มหน่วยความจำได้โดยใช้ไอซีเบอร์ 2716 ได้อีก 1 ตัว รวมเป็นหน่วยความจำ 4 กิโลไบท์

เนื่องจากสัญญาณแบบมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) ที่เราจะนำไปใช้ควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์นี้จะมีลักษณะสมมาตรแบบเศษหนึ่งส่วนสี่รูปและแบบครึ่งรูป (quarter-wave and half-wave symmetry) ดังนั้น ในการเก็บข้อมูลของแพตเทอร์นการสวิตช์เราจะเก็บเพียงเศษหนึ่งส่วนสี่รูปเท่านั้น เพื่อเป็นการประหยัดหน่วยความจำแบบกึ่งถาวร

(EPROM) ในการสร้างสัญญาณเพื่อนำไปควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์นั้น โปรแกรมควบคุมจะต้องไปนำค่าของแพตเทอร์นการสวิตช์ของความถี่ที่ต้องการซึ่งเราได้เก็บไว้ในหน่วยความจำแบบกึ่งถาวร (EPROM) มาสร้างเป็นแพตเทอร์นการสวิตช์ ให้ครบหนึ่งรูปและเก็บไว้ในหน่วยความจำแบบชั่วคราว เพื่อที่จะนำค่าไปใช้ในการควบคุมการสวิตช์ต่อไป ซึ่งในวงจรมอดูเลเตอร์นี้จะใช้ไอซีเบอร์ 6116 ซึ่งเป็นหน่วยความจำแบบชั่วคราว RAM ที่มีความจุ 2 กิโลไบท์ ทำหน้าที่เก็บแพตเทอร์นของการสวิตช์ในหนึ่งรูปซึ่งเป็นข้อมูลแบบชั่วคราวและจะเปลี่ยนแปลงไป ตามคำสั่งการเลือกความถี่ของเอาท์พุทที่ต้องการ วงจรของการต่อหน่วยความจำได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 วงจรการต่อหน่วยความจำ

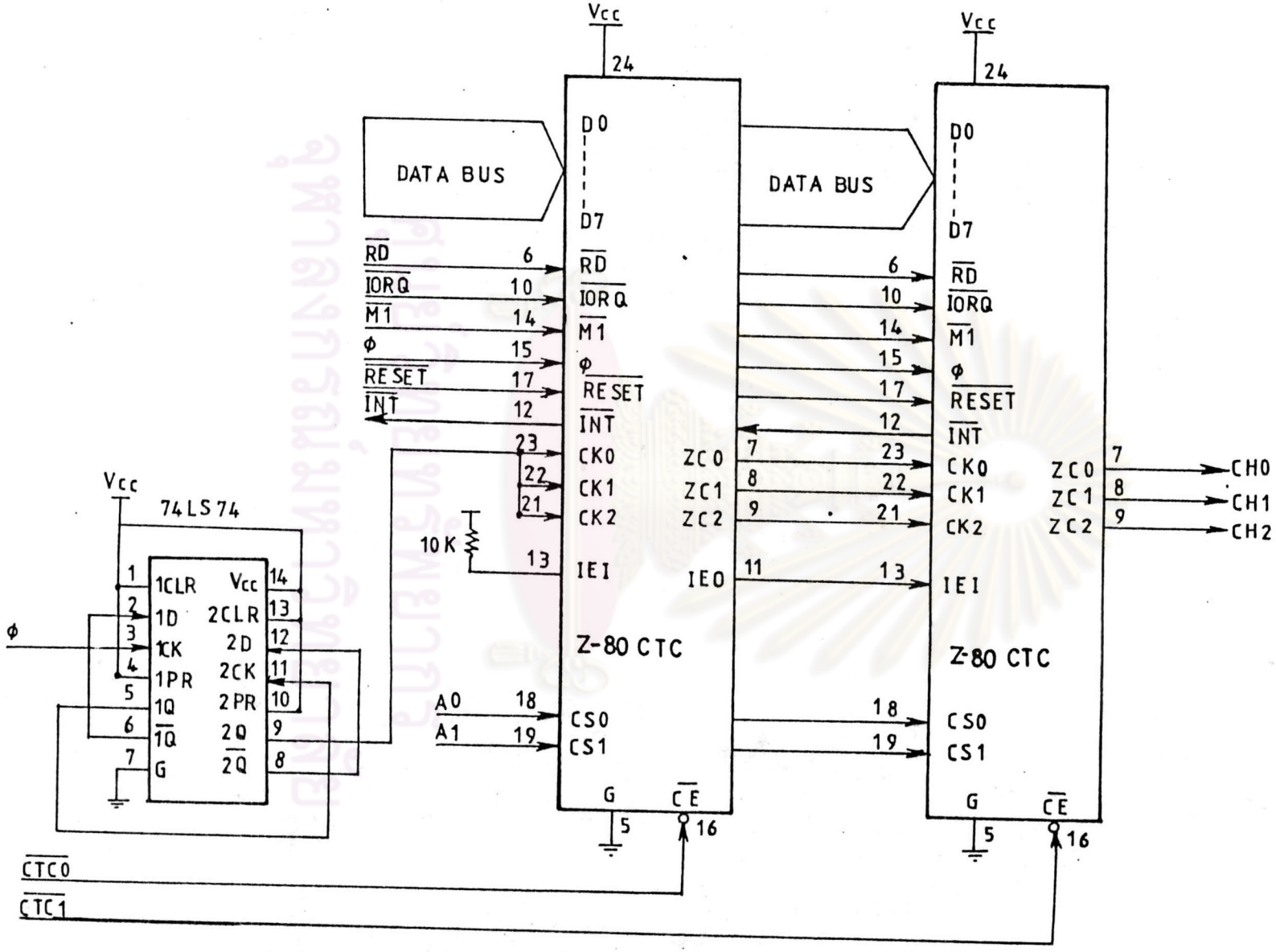
4.2.3 หน่วยกำเนิดสัญญาณเพื่อให้ค่ามุมการสวิตช์ ในการมอดูเลตสัญญาณแบบเชิงเลขนี้เราจะต้องสร้างสัญญาณเวลาที่แท้จริงเพื่อให้เป็นตัวกำหนดมุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งค่าของมุมเหล่านี้จะถูกส่งมาจากซีพียู ไปยังวงจรนับ เพื่อกำเนิดค่าของสัญสัญญาณที่เวลาต่าง ๆ ซึ่งในที่นี้เราใช้ไอซีเบอร์ Z-80 CTC จำนวน 2 ตัว ภายในตัวไอซีเบอร์Z-80 CTC ประกอบด้วยวงจรนับ (counter) หรือวงจรเวลา (timer) ที่สามารถกำหนดได้ด้วยโปรแกรม แยกออกเป็น 4 ช่อง ที่ไม่ขึ้นต่อกัน และสามารถทำงานร่วมกับซีพียู เบอร์ Z-80 ในการตอบรับสัญญาณอินเตอร์รัพท์แบบโหมด 2 โดยการกำหนดด้วยโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ในการทำงานของ Z-80 CTC นี้เราจะให้ทุกช่องทำงานในโหมดนับ (counter mode) โดยให้นับสัญญาณนาฬิกาที่ความถี่ 500 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งได้มาจากการหารสัญญาณนาฬิกาของระบบจาก 2.0 เมกะเฮิรตซ์ให้เหลือ 500 กิโลเฮิรตซ์ โดยใช้ไอซีเบอร์ 74LS74 การทำงานจะเป็นดังนี้

ช่อง 0 ของ Z-80 CTC ตัวแรกและตัวที่สองจะทำการนับค่าของสัญญาณนาฬิกา 500 กิโลเฮิรตซ์ตามค่าเวลาที่ได้จากแพตเทอร์นการสวิตช์ และเมื่อนับครบแล้ว จะส่งสัญญาณไปควบคุมการสวิตช์ของเฟส U (หนึ่งในสามเฟสของอินเวอร์เตอร์)

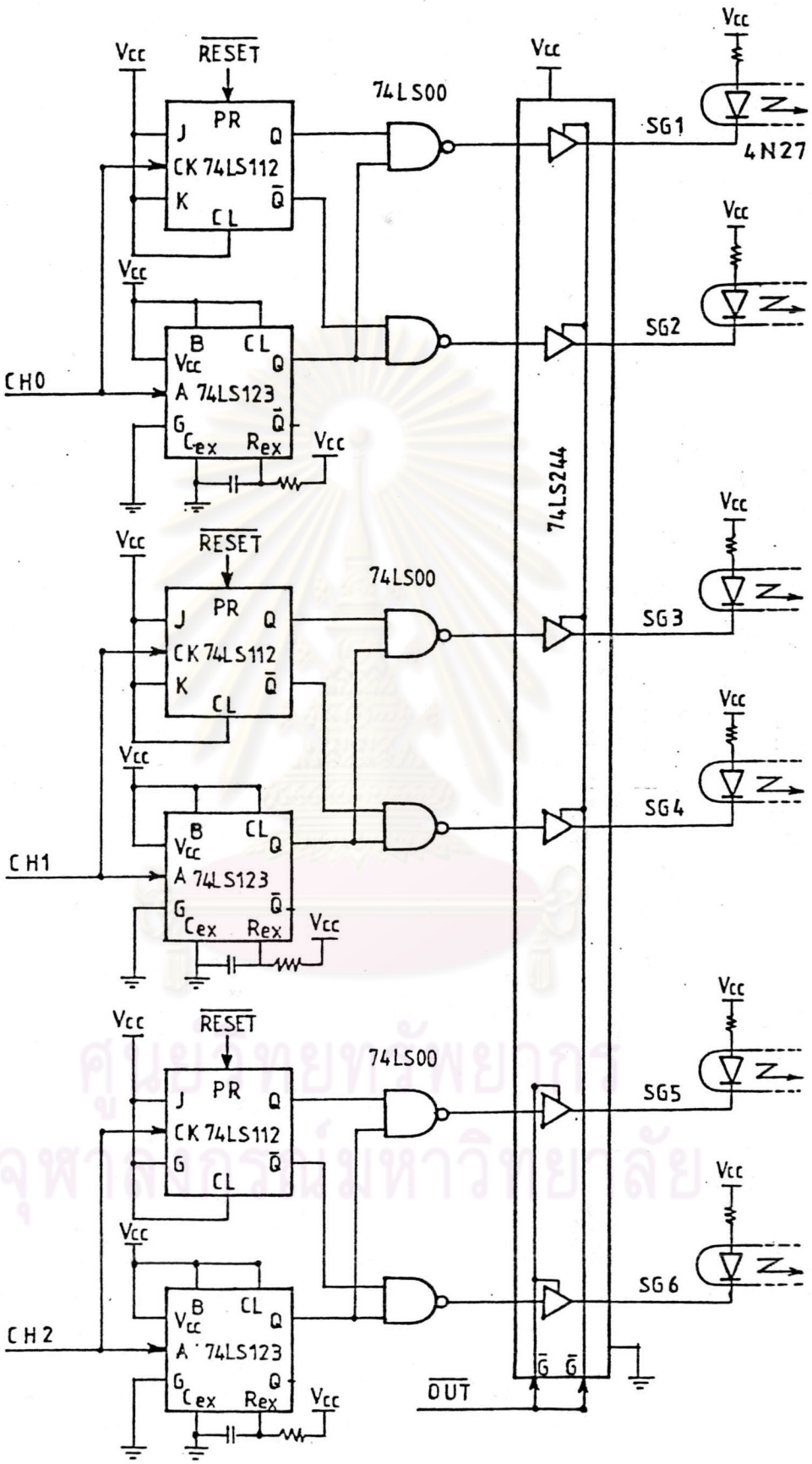
ทำนองเดียวกันช่อง 1 และ ช่อง 2 ของ Z-80 CTC ทั้งสองตัว ก็จะสร้างสัญญาณของเฟส V และเฟส W ของไฟสามเฟสตามลำดับ

4.2.4 วงจรสร้างสัญญาณการสวิตช์ ในวงจรสร้างสัญญาณการสวิตช์นี้จะใช้ไอซีเบอร์ 74LS112 ซึ่งเป็นฟลิปฟล็อปชนิด J-K สำหรับสร้างสัญญาณ ON และ OFF เพื่อไปสวิตช์อินเวอร์เตอร์ โดยมีไอซีเบอร์ 74LS123 ซึ่งเป็นวงจรโมโนสเตเบิลและไอซีเบอร์ 74LS00 เป็นวงจรที่ทำให้เกิด delay time ระหว่างการ ON และ OFF ของสัญญาณที่ส่งไปสวิตช์อินเวอร์เตอร์ทั้งนี้เพื่อป้องกันการลัดวงจร (shoot through) ของอินเวอร์เตอร์

ก่อนที่สัญญาณจะถูกส่งออกไปสวิตช์อินเวอร์เตอร์นั้นจะต้องผ่านวงจรบัฟเฟอร์ซึ่งใช้ไอซีเบอร์ 74LS244 เพื่อควบคุมการ RUN-STOP ของมอเตอร์สัญญาณจะถูกส่งไปควบคุมการสวิตช์ของวงจรขับนำเบส (base drive) ของทรานซิสเตอร์กำลัง (power transistor) โดยผ่านทางไอซีออปโตคัปเปลอร์ (opto coupler) เบอร์ 4N27 ตามรูปที่ 4.7 แสดงวงจรสร้างสัญญาณการสวิตช์



รูปที่ 4.6 วงจรกำเนิดสัญญาณเพื่อให้ค่ามุมการสวิตช์



รูปที่ 4.7 วงจรสร้างสัญญาณการสวิตช์เพื่อขับนำเบสของ

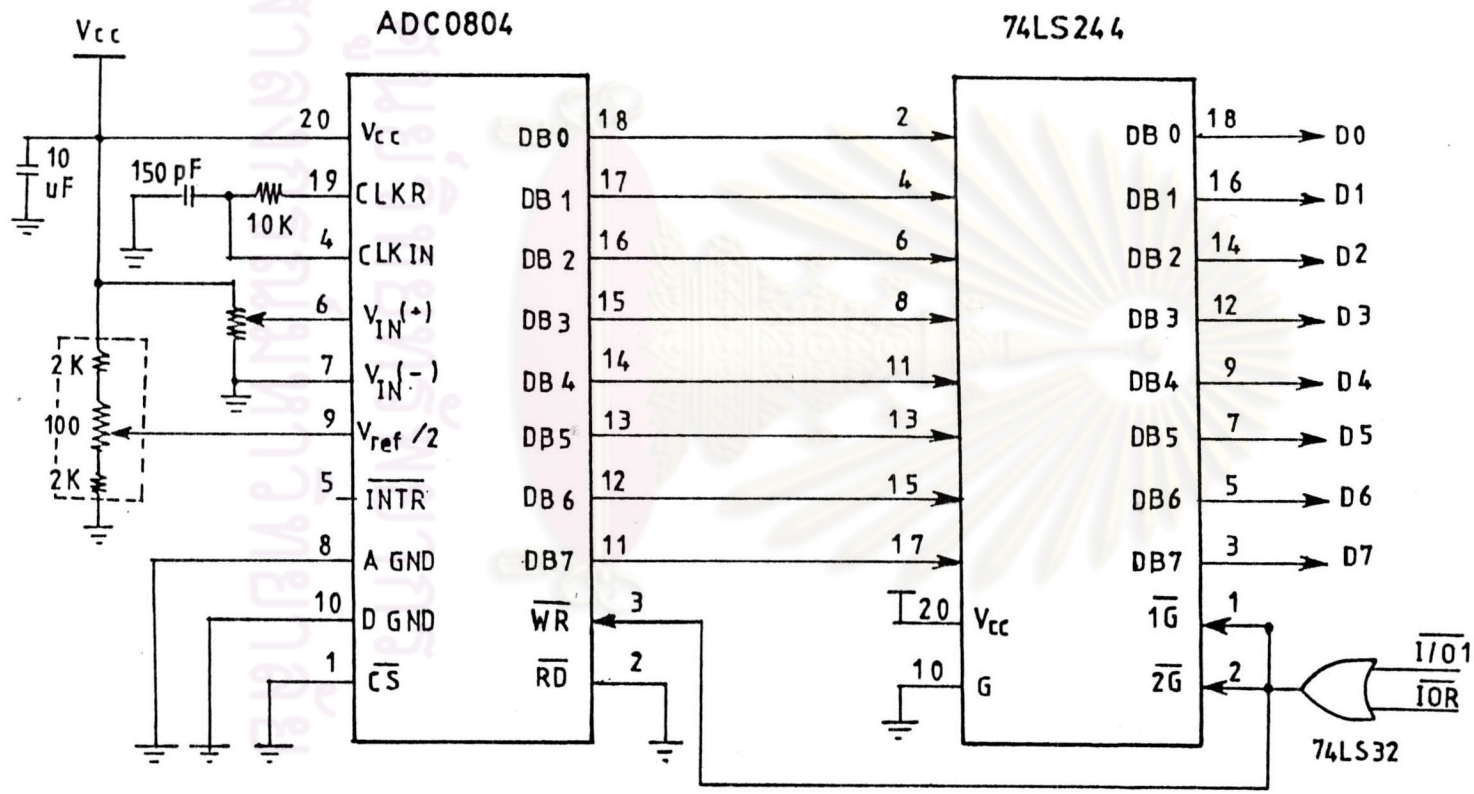
ทรานซิสเตอร์กำลัง

4.2.5 หน่วยรับสัญญาณควบคุมจากภายนอก สัญญาณควบคุมนี้จะประกอบไปด้วยสัญญาณเลือกความถี่และสัญญาณการ RUN หรือ STOP ดังนี้

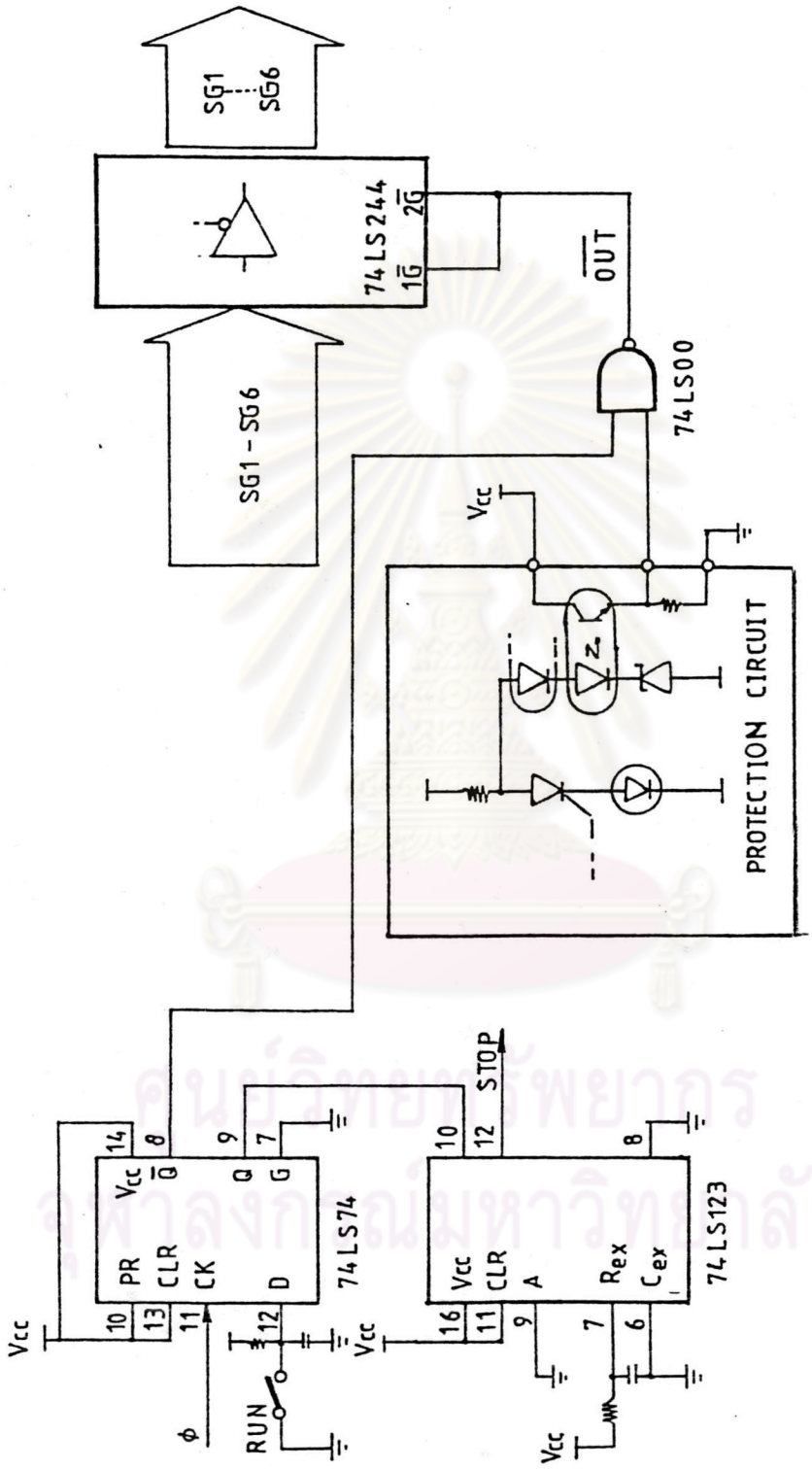
สัญญาณเลือกความถี่ใช้ไอซีเบอร์ ADC0804 เพื่อเปลี่ยนสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณเชิงเลข ในการเลือกค่าความถี่นั้นเราจะปรับค่าความต้านทานเพื่อเปลี่ยนระดับของสัญญาณอะนาลอกที่ป้อนให้กับไอซีเบอร์ ADC0804 ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณเป็นแบบเชิงเลขเพื่อป้อนให้กับซีพียูนำไปเลือกค่าแพตเทอร์นของการสวิตช์ต่อไป โดยมีไอซีเบอร์ 74LS244 เป็นอินพุทพอร์ท ดังแสดงในรูปที่ 4.8

สำหรับสัญญาณการ RUN หรือ STOP นั้น จะใช้ไอซีเบอร์ 74LS74 รับสัญญาณจากสวิตช์ SW1 เพื่อไปควบคุมการ RUN-STOP ของมอเตอร์ผ่านไอซี เบอร์ 74LS20 ในการให้สัญญาณ RUN หรือ STOP นั้น ในขณะที่สวิตช์เปลี่ยนจาก RUN เป็น STOP นั้น ไอซีเบอร์ 74LS123 จะสร้างสัญญาณเป็นพัลส์ลบเพื่อไป RESETซีพียู ในรูปที่ 4.9 เป็นวงจรควบคุมการ RUN หรือ STOP ของมอเตอร์ซึ่งจะมีสัญญาณควบคุมการปิด-เปิดของไอซีเบอร์ 74LS244 ซึ่งทำหน้าที่เป็นเอาท์พุทพอร์ทเมื่อส่งสัญญาณไปควบคุมการสวิตช์ของวงจรขับนำเบส (base drive) ของทรานซิสเตอร์กำลัง (Power transistor) ซึ่งสัญญาณควบคุมจะประกอบด้วย สัญญาณ RUN หรือ STOP จากสวิตช์ SW1 สัญญาณแรงดันเก็บสัญญาณแรงดันต่ำและสัญญาณกระแสเก็บ โดยการต่อผ่านไอซีเบอร์ 74LS20 และไปควบคุมเอาท์พุทของไอซีเบอร์ 74LS244

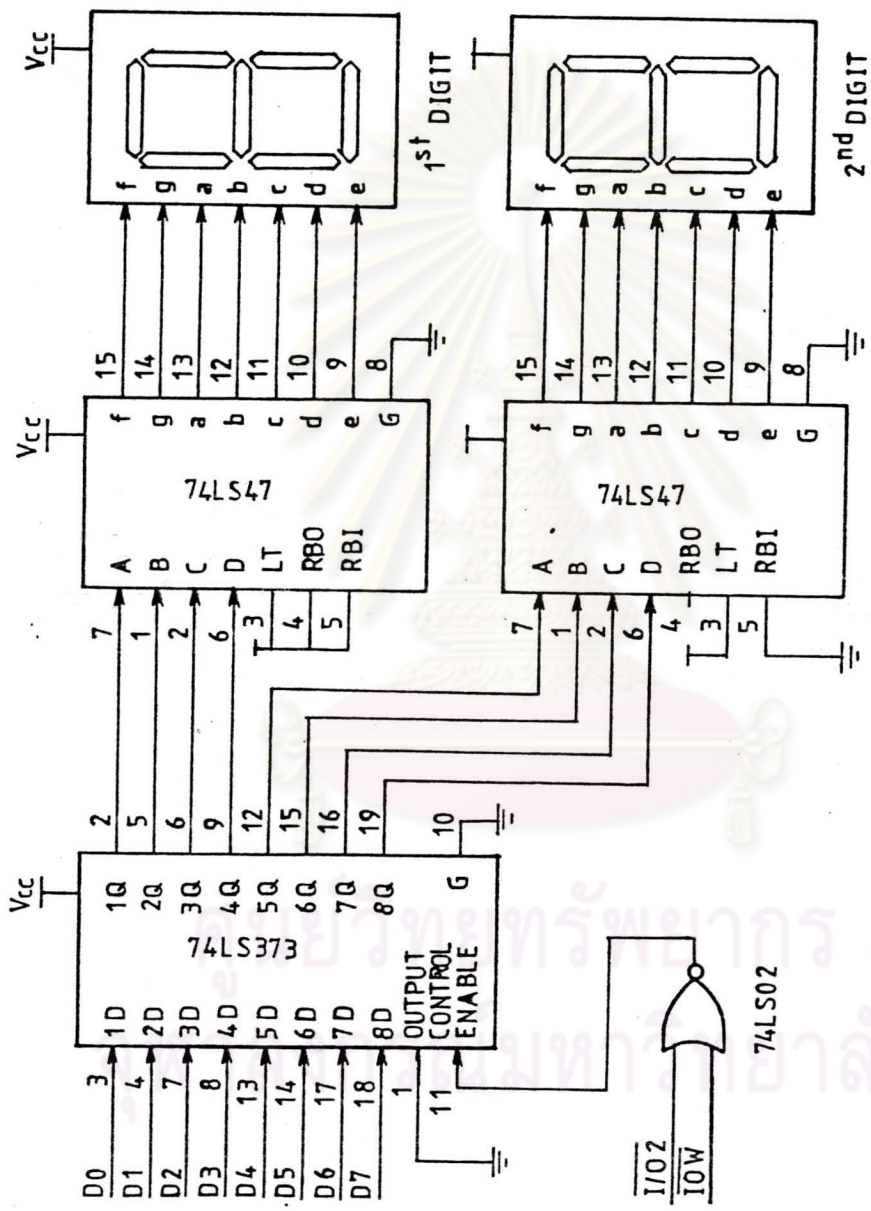
4.2.6 หน่วยแสดงผล หน่วยแสดงผลนี้ได้ออกแบบไว้สำหรับแสดงค่าความถี่ของเอาท์พุทซึ่งเป็นตัวเลข 2 หลัก จึงใช้หน่วยแสดงผลแบบตัวเลข LED 7 ขีด ซึ่งใช้ไอซีเบอร์ 74LS74 เป็นตัวเลือกการติดตั้งของแต่ละขีด โดยทำหน้าที่กอดรหัสสัญญาณ BCD เป็นสัญญาณตัวเลข 7 ขีด สำหรับตัวเลขที่จะนำมาแสดงนี้จะถูกส่งออกมาทางเอาท์พุทพอร์ท ซึ่งใช้ไอซีเบอร์ 74LS373 ซึ่งจะทำการแลตช์ข้อมูลที่จะแสดงผลและป้อนให้กับไอซีเบอร์ 74LS74 ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.8 วงจรรับสัญญาณเลือกความถี่



รูปที่ 4.9 วงจรควบคุมการ RUN/STOP



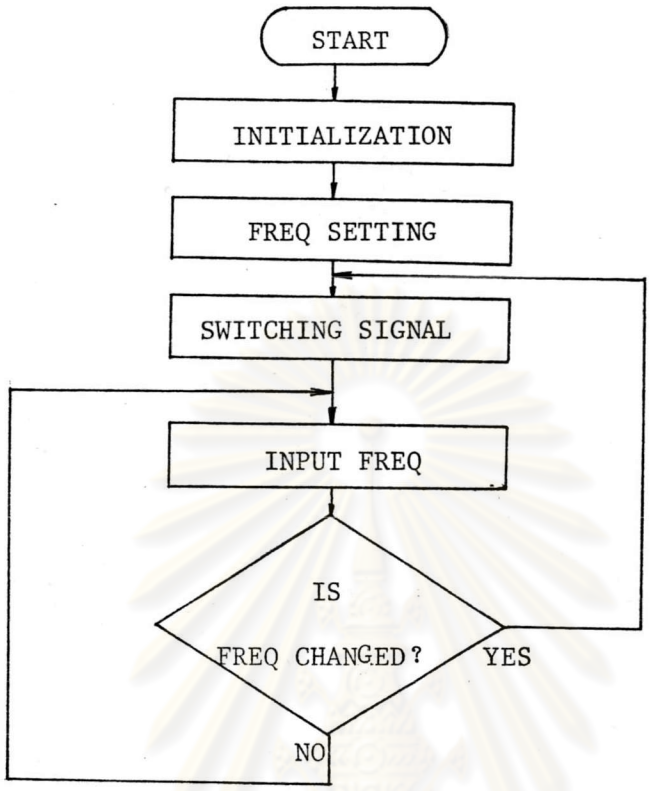
รูปที่ 4.10 วงจรหน่วยแสดงผลของความถี่ขาออก

4.3 การออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงานของวงจรมอดูเลเตอร์

การทำงานของวงจรมอดูเลเตอร์เพื่อสร้างสัญญาณในการควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ในการขับนำมอเตอร์กระแสสลับแบบหนี่ยวนำนี้ จะถูกกำหนดโดยโปรแกรมควบคุม โดยที่โปรแกรมควบคุมนี้จะเขียนด้วยภาษาเครื่องและอัดเก็บไว้ในหน่วยความจำแบบกึ่งถาวร (EPROM) โปรแกรมควบคุมที่พัฒนาขึ้นมานี้จะประกอบไปด้วยโปรแกรมหลักและโปรแกรมย่อยต่างๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

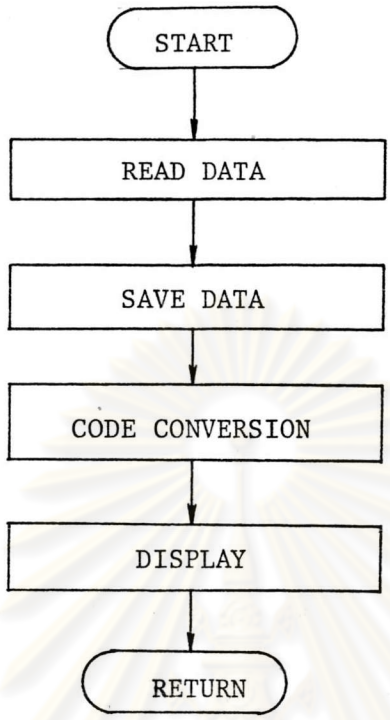
4.3.1 โปรแกรมหลัก (Main Program) เป็นโปรแกรมที่ควบคุมระบบการทำงานของวงจรมอดูเลเตอร์ทั้งหมด ประกอบด้วยโปรแกรมย่อย ๆ ดังแสดงในโฟลว์ชาร์ทในรูปที่ 4.11 เมื่อเปิดเครื่องจ่ายไฟเข้าระบบการทำงานของวงจรจะเข้าสู่ภาคแรกของโปรแกรมได้แก่การเซทค่าเริ่มแรกต่าง ๆ ให้กับระบบ (INITIALIZATION) ทั้งหมดก่อน เช่น ทำการโปรแกรมอุปกรณ์บางตัวที่จำเป็นต้องโปรแกรมกำหนดหน้าที่ของการทำงานก่อนใช้งาน เซทค่าเริ่มแรกของวงจรกำเนิดสัญญาณการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น เมื่อผ่านโปรแกรมการเซทค่าให้กับระบบแล้ว จะเข้าสู่โปรแกรมการอ่านค่าเริ่มแรกของสัญญาณความถี่ขาออกและแสดงผลของค่าที่อ่านได้ (FREQ SETTING) จากนั้นจะเข้าสู่โปรแกรมการกำเนิดสัญญาณเพื่อควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ (SWITCHING SIGNAL) และทำการอ่านค่าสัญญาณความถี่ซ้ำอีกและเปรียบเทียบว่าค่าสัญญาณความถี่เปลี่ยนไปหรือไม่ ถ้าเปลี่ยนไปก็จะกลับไปสู่โปรแกรมการกำเนิดสัญญาณเพื่อควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์อีกครั้งหนึ่ง เพื่อสร้างสัญญาณความถี่ที่ตรงกับค่าที่อ่านได้ ถ้าค่าที่อ่านได้ยังคงเป็นความถี่เดิม สัญญาณการสวิตช์ก็จะไม่เปลี่ยน ยังคง เป็นความถี่เดิมต่อไป โปรแกรมก็จะวนอ่านซ้ำเช่นนี้เรื่อยไป

ในการสร้างสัญญาณเพื่อควบคุมการสวิตของอินเวอร์เตอร์นั้น เมื่อเริ่มสตาร์ตโปรแกรมหลักได้ออกแบบไว้ให้สัญญาณที่ส่งออกไปเริ่มต้นที่ความถี่ขาออก 5 เฮิรตซ์ และจะเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 เฮิรตซ์ในเวลา 1.2 วินาที จนกว่าจะถึงค่าความถี่ที่ตั้งไว้ และในการเพิ่มหรือลดความถี่ทุกครั้งจะมีการเปลี่ยนแปลงครั้งละ 1 เฮิรตซ์ ในเวลาเท่ากันคือ 1.2 วินาที ดังนั้นเมื่อนำเครื่องควบคุมความเร็วไปขับนำมอเตอร์เหนี่ยวนำจะทำให้อัตราการเพิ่มหรือลดความเร็วของมอเตอร์ (acceleration/deceleration rate)ของมอเตอร์เท่ากัน คือจากความเร็วต่ำสุด (ที่ 5 เฮิรตซ์) จนถึงความเร็วสูงสุด (ที่ 50 เฮิรตซ์) ใช้เวลา 54 วินาที ทำนองเดียวกันจากความเร็วสูงสุดถึงต่ำสุดจะใช้เวลา 54 วินาทีเท่ากัน



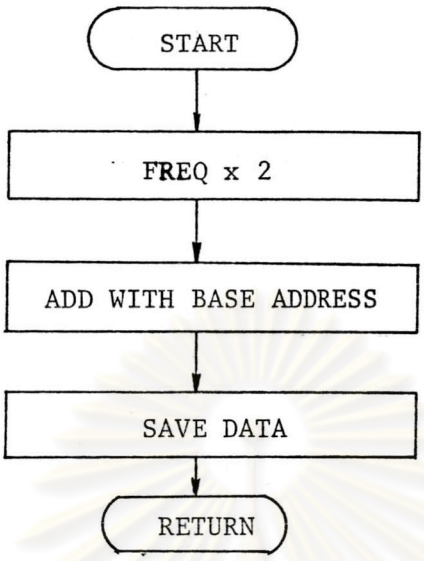
รูปที่ 4.11 แสดงโฟลว์ชาร์ทของ MAIN PROGRAM

4.3.2 โปรแกรมอ่านค่าความถี่ของสัญญาณขาออกและแสดงผล เป็นโปรแกรมสำหรับอ่านข้อมูลซึ่งเป็นความถี่ของสัญญาณขาออกที่เราสามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ตามต้องการ โดยการปรับระดับของสัญญาณโดยใช้ความต้านทานที่ปรับค่าได้ เป็นสัญญาณแบบอะนาลอกจากนั้นจะผ่านภาคแปลงสัญญาณให้เป็นสัญญาณแบบเชิงเลข โปรแกรมสำหรับอ่านข้อมูลจะอ่านเอาข้อมูลจากหน่วยแปลงสัญญาณนี้ (READ DATA) เข้าไปเก็บไว้ในหน่วยความจำแบบชั่วคราว (SAVE DATA) เพื่อนำไปใช้ในการสร้างสัญญาณการสวิตช์ต่อไป และข้อมูลที่อ่านได้นี้จะถูกแปลงจากรหัสไบนารีให้เป็นรหัส BCD (CODE CONVERSION) เพื่อนำไปแสดงผลค่าของความถี่ (DISPLAY) ต่อไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.12 เป็นโฟลว์ชาร์ทของโปรแกรมอ่านค่าความถี่ของสัญญาณขาออกและแสดงผล



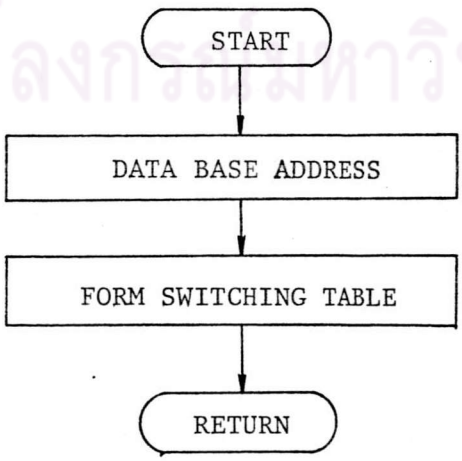
รูปที่ 4.12 แสดงโฟลว์ชาร์ทของโปรแกรมอ่านความถี่ของสัญญาณขาออกและแสดงผล

4.3.3 โปรแกรมหาตำแหน่งเริ่มแรกของข้อมูลของแพทเทอร์นการสวิตช์ตามค่าความถี่ของสัญญาณขาออก เมื่อได้ค่าความถี่ของสัญญาณขาออกที่ต้องการแล้ว จะนำมาคูณด้วย 2 (FREQ x 2) แล้วบวกเข้ากับค่าของแอดเดรสเริ่มแรกของตารางที่อยู่ของข้อมูล (เนื่องจากแอดเดรสของข้อมูลจะถูกเก็บด้วยหน่วยความจำขนาด 2 ไบท์) จะได้ตำแหน่งแอดเดรสของแพทเทอร์นการสวิตช์ที่ต้องการและถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำแบบชั่วคราว [SAVE DATA] ดังแสดงโฟลว์ชาร์ทของโปรแกรมหาตำแหน่งเริ่มแรกของแพทเทอร์นการสวิตช์ในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงโฟลว์ชาร์ทของโปรแกรมหาตำแหน่งเริ่มแรกของข้อมูลของแพตเทอร์นการสวิตช์

4.3.4 โปรแกรมสร้างตารางของแพตเทอร์นการสวิตช์ ของความถี่ของสัญญาณขาออกตามที่ที่กำหนด เมื่อได้ตำแหน่งแอดเดรสเริ่มแรกของแพตเทอร์นการสวิตช์แล้ว เนื่องจากการเก็บแพตเทอร์นจะเก็บเพียงเศษหนึ่งส่วนสี่คาบเท่านั้น เพราะสัญญาณมีลักษณะสมมาตรแบบเศษหนึ่งส่วนสี่รูปและแบบครึ่งรูป (quarter-wave and half-wave symmetry) ดังนั้นจึงต้องนำมาสร้างเป็นตารางของแพตเทอร์นการสวิตช์ให้ครบ 1 รูป และเก็บไว้ในหน่วยความจำแบบชั่วคราว เพื่อจะได้นำไปใช้ในการสร้างสัญญาณการสวิตช์ต่อไป ดังแสดงโฟลว์ชาร์ทของโปรแกรมสร้างตารางของแพตเทอร์นการสวิตช์ในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงโฟลว์ชาร์ทของโปรแกรมสร้างตารางของแพตเทอร์นการสวิตช์

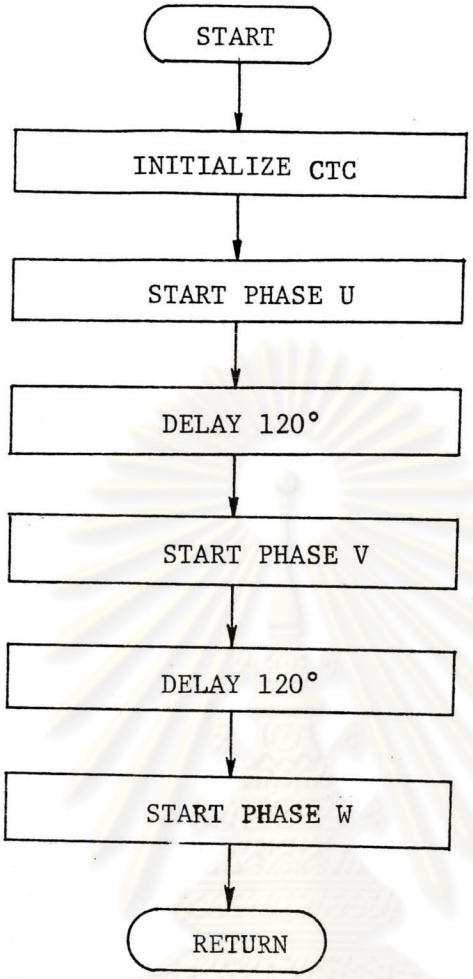
4.3.5 โปรแกรมสร้างสัญญาณการสวิตช์เพื่อส่งไปควบคุมการสวิตช์ของวงวงจรขับนำเบส ซึ่งใช้ไอซีเบอร์ Z-80 CTC จำนวน 2 ตัว ทำหน้าที่เป็นวงจรนับสัญญาณนาฬิกาความถี่ 500 กิโลเฮิรตซ์ ค่าที่ใช้ในการนับนั้นจะได้มาจากตารางของแพตเทอร์นการสวิตช์เริ่มแรกโปรแกรมจะเซทค่าเริ่มแรกให้ Z-80 CTC ทั้ง 2 ตัว (INITIALIZE CTC) ดังนี้คือ

1. ช่อง 0 ของ Z-80CTC ตัวแรกและตัวที่สองจะถูกโปรแกรมให้ทำงานในโหมดนับ (counter mode) โดยการนับค่าของสัญญาณนาฬิกา จากข้อมูลที่ได้จากแพตเทอร์นการสวิตช์ และเมื่อนับครบแล้วจะส่งสัญญาณไปควบคุมของเฟส U (หนึ่งในสามเฟสของอินเวอร์เตอร์) ในขณะเดียวกันจะโปรแกรมในช่อง 0 ของ Z-80 CTC ตัวที่สองสามารถขอ อินเตอร์รัพท์ได้เพื่อขอข้อมูลชุดใหม่

2. ในทำนองเดียวกัน ช่อง 1 และช่อง 2 ของ Z-80 CTC ทั้งสองตัวก็จะถูกโปรแกรมให้ทำงานในโหมดนับ (counter mode) โดยการนับค่าของสัญญาณนาฬิกาจากข้อมูลที่ได้จากแพตเทอร์การสวิตช์ และเมื่อนับครบแล้วจะส่งสัญญาณไปควบคุมการสวิตช์ของเฟส V และเฟส W ของไฟสามเฟสตามลำดับ ในขณะเดียวกันจะโปรแกรมให้ช่อง 1 และช่อง 2 ของ Z-80 CTC ตัวที่สองสามารถขออินเตอร์รัพท์ได้เพื่อขอข้อมูลชุดใหม่

เมื่อเซทค่าเริ่มแรกเสร็จแล้วจะโปรแกรมให้ Z-80 CTC ของเฟส U เริ่มทำงานก่อน แล้วจะ Delay ไป 120° จึงเริ่มเฟส V และ Delay อีก 120° แล้วเริ่มเฟส W ตามลำดับ ดังแสดงโฟลว์ชาร์ทของโปรแกรมสร้างสัญญาณการสวิตช์ในรูปที่ 4.15

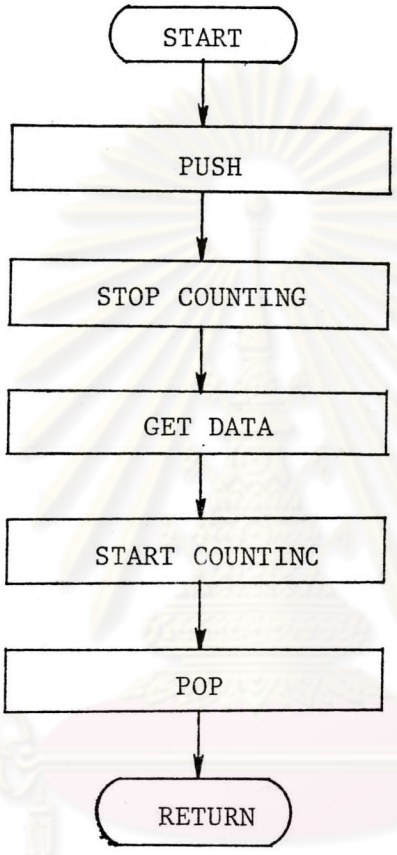
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 โฟลว์ชาร์ทของโปรแกรมสร้างสัญญาณการสวิตช์

4.3.6 โปรแกรมการอินเตอร์รัพท์ เป็นโปรแกรมที่กระทำเมื่อมีการอินเตอร์รัพท์โดยการอินเตอร์รัพท์จะมาจาก Z-80 CTC ซึ่งจะมีเวคเตอร์ของการอินเตอร์รัพท์มาด้วย การอินเตอร์รัพท์นี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อข้อมูลที่ใช้ในการนับ เพื่อกำเนิดสัญญาณการสวิตช์ของแต่ละเฟสสิ้นสุดลง วงจรของช่องที่ถูกโปรแกรมให้สามารถขออินเตอร์รัพท์ได้จะส่งสัญญาณอินเตอร์รัพท์มายังซีพียู เพื่อขอข้อมูลชุดใหม่ การทำงานของโปรแกรมอินเตอร์รัพท์ของแต่ละเฟสจะมีลักษณะเหมือนกันคือ เริ่มต้นจะต้องมีการเก็บรักษาค่าในรีจีสเตอร์ต่าง ๆ (PUSH) โดยจะเก็บไว้ในสแตค (Stack) ส่งคำสั่งให้วงจรนับหยุดทำงาน (STOP COUNTING) นำค่าข้อมูลชุดใหม่ส่งให้กับวงจรนับ (GET DATA) หลังจากนั้นจะสั่งให้วงจรนับเริ่มทำงานต่อไปตามปรกติ (START COUNTING) และเมื่อทำงานเสร็จสิ้นโปรแกรมแล้ว จะต้องนำค่าของรีจีสเตอร์ที่เก็บไว้ในสแตคนั้นมาเก็บไว้ตามเดิม (POP)

นอกจากนี้จะต้องมีคำสั่ง ENABLE INTERRUPT ก่อนที่จะกลับเข้าโปรแกรมเดิม เพื่อให้ระบบสามารถรับการอินเตอร์รัพท์ได้อีก ดังแสดงโฟลว์ชาร์ทของโปรแกรมอินเตอร์รัพท์ เพื่อขอข้อมูลในการนับชุดใหม่ ในรูปที่ 4.16



หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.16 โฟลว์ชาร์ทของโปรแกรมอินเตอร์รัพท์เพื่อขอข้อมูลในการนับชุดใหม่

4.4 การทดสอบวงจรมอดูเลเตอร์

วงจรมอดูเลเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนควบคุมการทำงานทั้งหมดของเครื่องซับนำมอเตอร์กระแสสลับ แบบเหนี่ยวนำสามเฟสนี้ ได้สร้างขึ้นบนแผ่นวงจรพิมพ์ หนึ่งแผ่น ซึ่งสามารถบรรจุเอาวงจรต่าง ๆ รวมเข้าไว้ด้วยกันทั้งหมด คือ ซีพียู หน่วยความจำ หน่วยรับสัญญาณเลือกความถี่ หน่วยแสดงผล และวงจรอินเตอร์เฟส ต่าง ๆ

4.4.1 การทดสอบขั้นต้น สำหรับการทดสอบขั้นต้นนั้น หลังจากที่ประกอบวงจรลงบนแผ่นพิมพ์เรียบร้อยแล้ว ได้ทำการทดสอบการทำงานของภาคต่าง ๆ โดยใช้แผงวงจร MPF-1 เข้าช่วย แผงวงจร MPF-1 เป็นวงจรไมโครคอมพิวเตอร์แผ่นพิมพ์เดี่ยว

ของบริษัท MULTITECH ประเทศไต้หวัน ซึ่งมีองค์ประกอบของวงจรดังนี้

1) ใช้ไอซีเบอร์ Z-80 เป็น CPU ความถี่ของระบบเท่ากับ 1.79 MHz

2) ROM 2716/2516/2732/2532 2 กิโลไบท์ หรือ 4 กิโลไบท์

3) RAM 6116 2 กิโลไบท์

4) มีซอคเกต (socket) สำหรับเพิ่ม ROM ได้ 4 กิโลไบท์ หรือ RAM 2 กิโลไบท์

5) มี PIO และ CTC บนแผงวงจรและมีคอนเนคเตอร์ (connector) สำหรับต่อออกไปใช้งานได้

6) มีปุ่มกด จำนวน 32 ปุ่ม เพื่อป้อนคำสั่ง

7) แสดงผลด้วยตัวเลข 7 ขีด จำนวน 6 หลัก

8) มีคอนเนคเตอร์สำหรับต่อบัสเพื่อขยายระบบได้

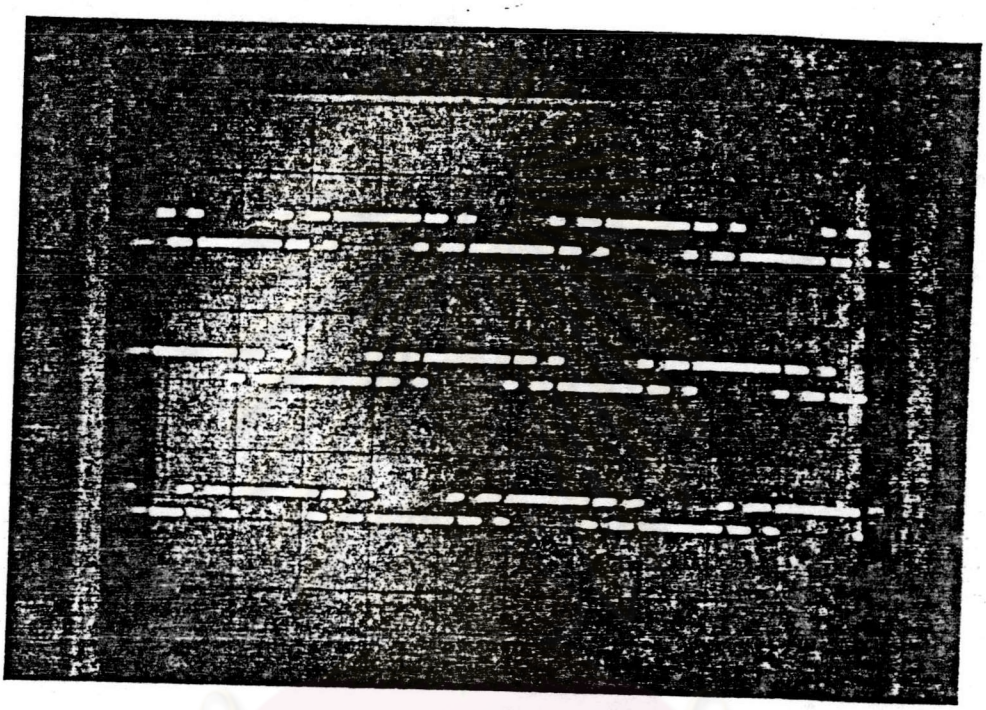
ในการทดสอบการทำงานของวงจรแต่ละภาคจะใช้วิธีเขียนโปรแกรมทดสอบง่าย ๆ ของวงจรแต่ละภาค โปรแกรมที่เขียนขึ้นทดสอบจะใช้โปรแกรมมอนิเตอร์ ของแผงวงจร MPF-1 เมื่อเตรียมโปรแกรมเรียบร้อยแล้วก็ป้อนเข้าเครื่องทางแป้นกดข้อมูล แล้ว RUN โปรแกรมเพื่อทดสอบและแก้ไขให้ใช้งานได้ตามที่ออกแบบไว้

4.4.2 การทดสอบการทำงานของระบบ เมื่อวงจรภาคต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ครบทุกภาคแล้ว ก็จะเริ่มทำการทดสอบโปรแกรมหลัก (Main Program) ที่ได้ออกแบบและเขียนขึ้น โปรแกรมที่เขียนขึ้นนี้จะเขียนเป็นภาษาแอสเซมบลี [11] จากโฟลว์ชาร์ทข้างต้น จากนั้นจะต้องทำการแปลเป็นภาษาเครื่องก่อนที่จะนำไปใช้งาน หลังจากที่ได้โปรแกรมเป็นภาษาเครื่องแล้วก็จะโหลดเข้าในหน่วยความจำของแผงวงจร MPF-1 และทำการ RUN เพื่อทดสอบการทำงานของระบบ ทดสอบและแก้ไขจนใช้งานได้แล้วจึงนำเอาโปรแกรมนี้มาอัดลงใน EPROM เพื่อนำไปใช้เป็นโปรแกรมมอนิเตอร์ของระบบควบคุมต่อไป

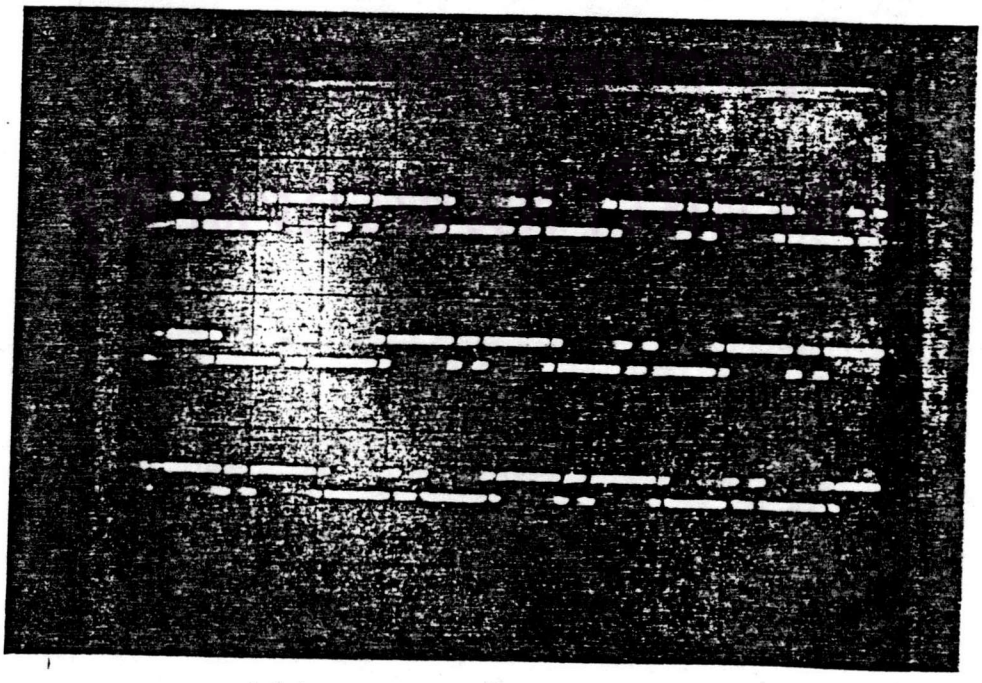
4.5 ผลการทดสอบวงจรมอดูเลเตอร์

วงจรที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้วนี้ได้ถูกนำมาตรวจสอบและวัดค่าของสัญญาณต่าง ๆ เพื่อทดสอบดูว่าจะได้ผลตามที่ต้องการหรือไม่ ซึ่งจากผลของการวัดจะได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

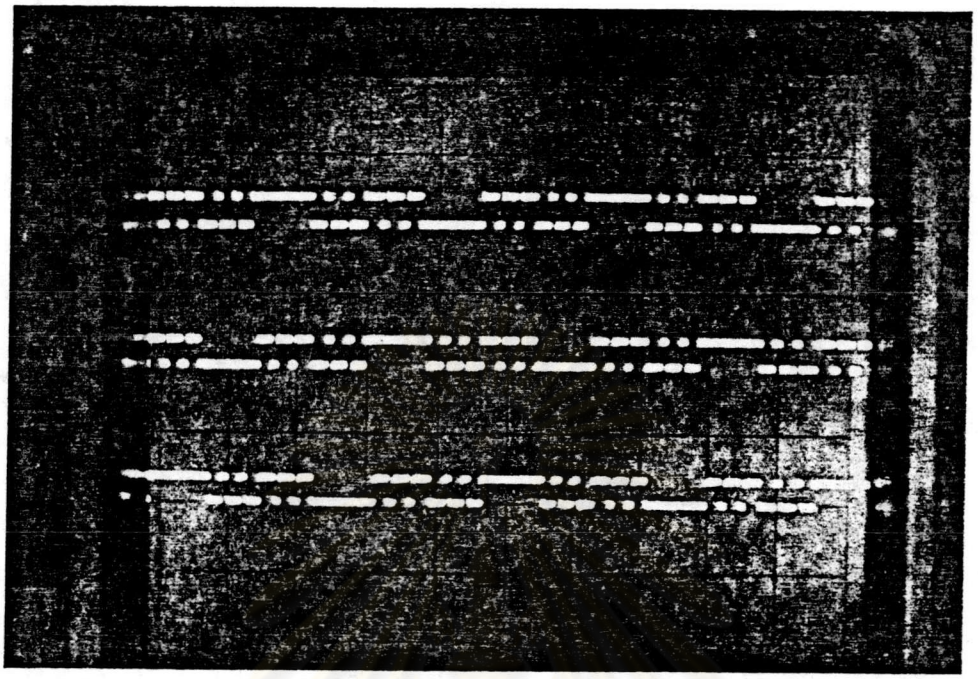
4.5.1 สัญญาณการสวิตช์ จากการวัดสัญญาณการสวิตช์ที่ถูกส่งออกไปจากวงจรมอดูเลเตอร์เพื่อควบคุมการ turn-on และ turn-off ของทรานซิสเตอร์กำลัง (power transistor) ในแต่ละเฟส โดยใช้ออสซิลโลสโคป จะได้สัญญาณดังในรูปที่ 4.17 - รูปที่ 4.21



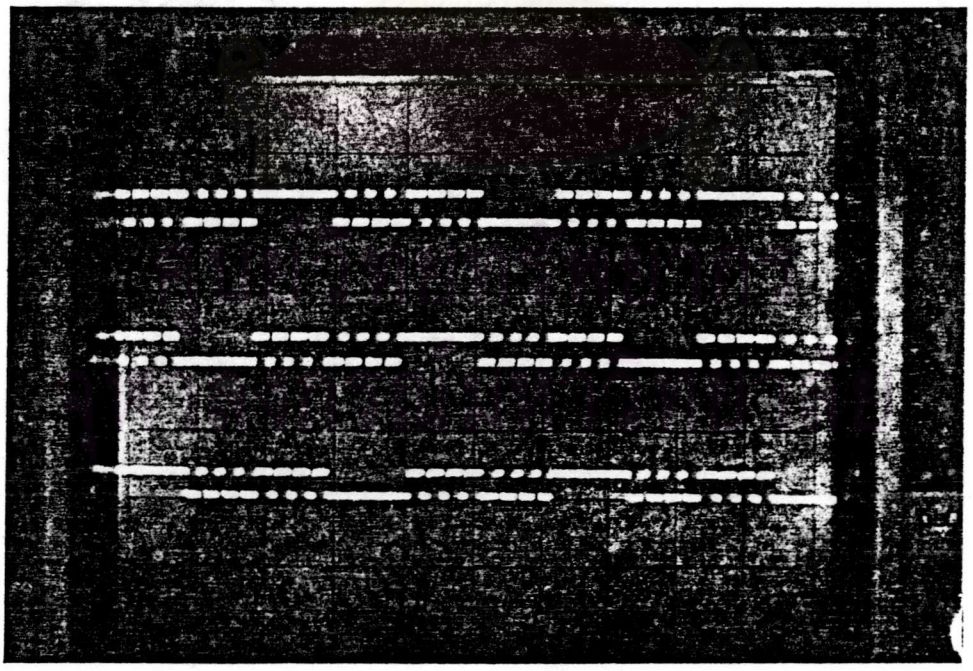
รูปที่ 4.17 สัญญาณขับนำที่ความถี่ขาออก 50 เฮิรตซ์ (M = 2)



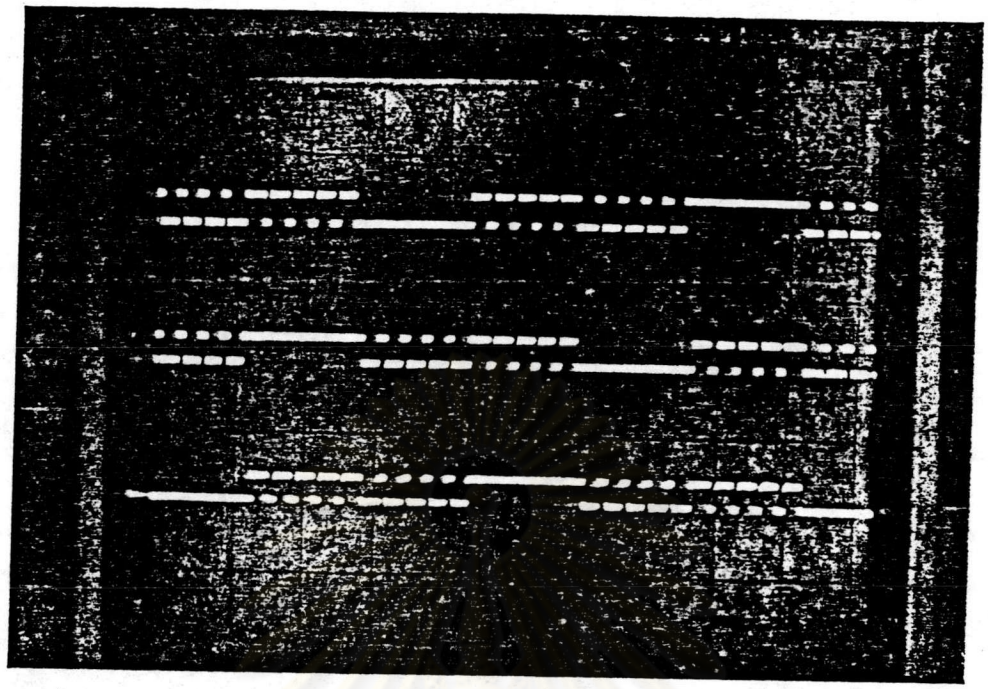
รูปที่ 4.18 สัญญาณขับนำที่ความถี่ขาออก 40 เฮิรตซ์ (M = 3)



รูปที่ 4.19 สัญญาณขับนำที่ความถี่ขาออก 20 เฮิรตซ์ (M = 5)

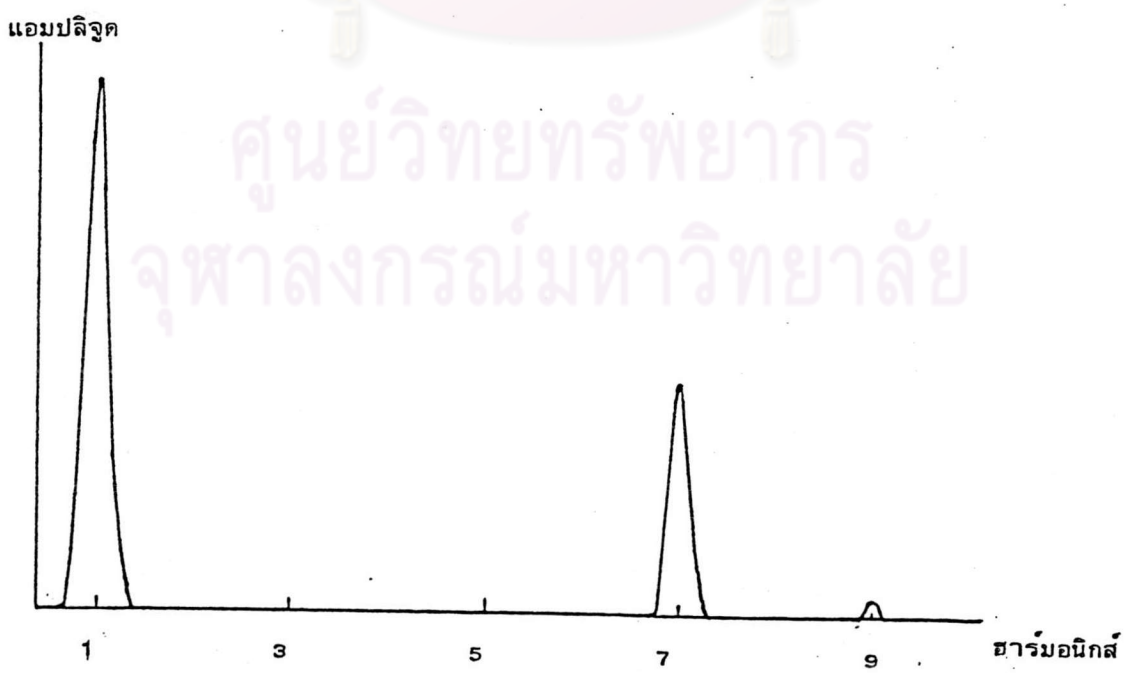


รูปที่ 4.20 สัญญาณขับนำที่ความถี่ขาออก 15 เฮิรตซ์ (M = 7)

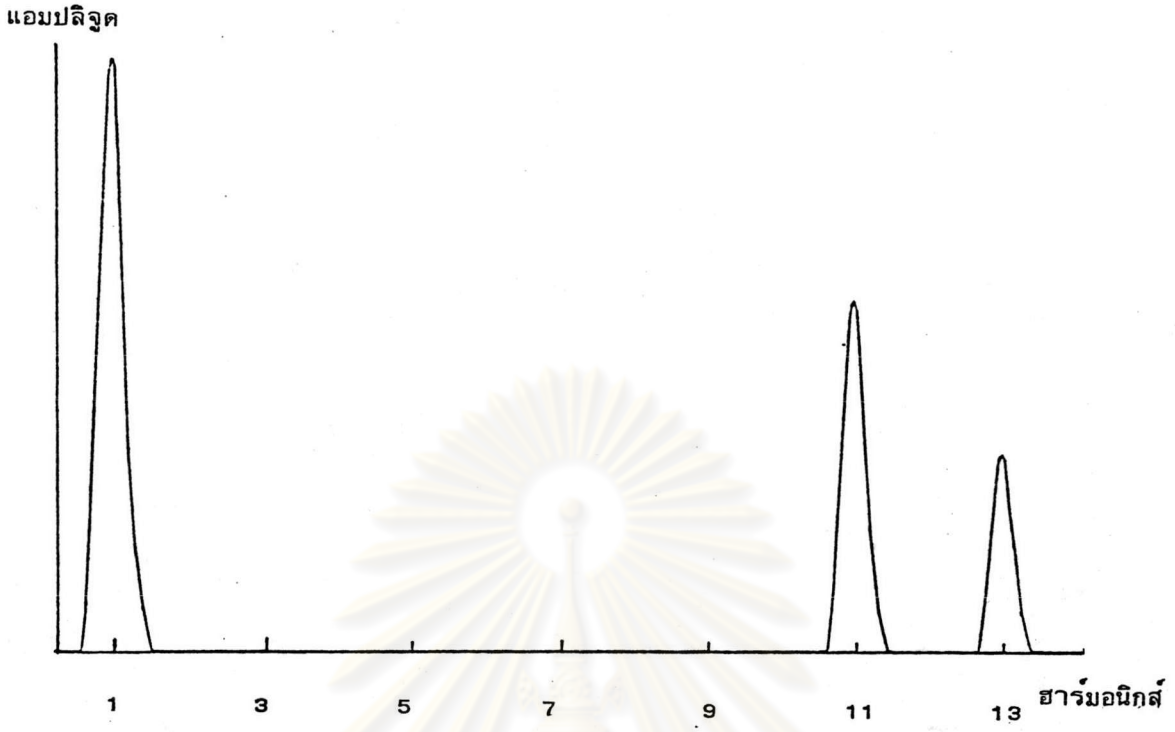


รูปที่ 4.21 สัญญาณขับนำที่ความถี่ขาออก 10 เฮิรตซ์ (M = 9)

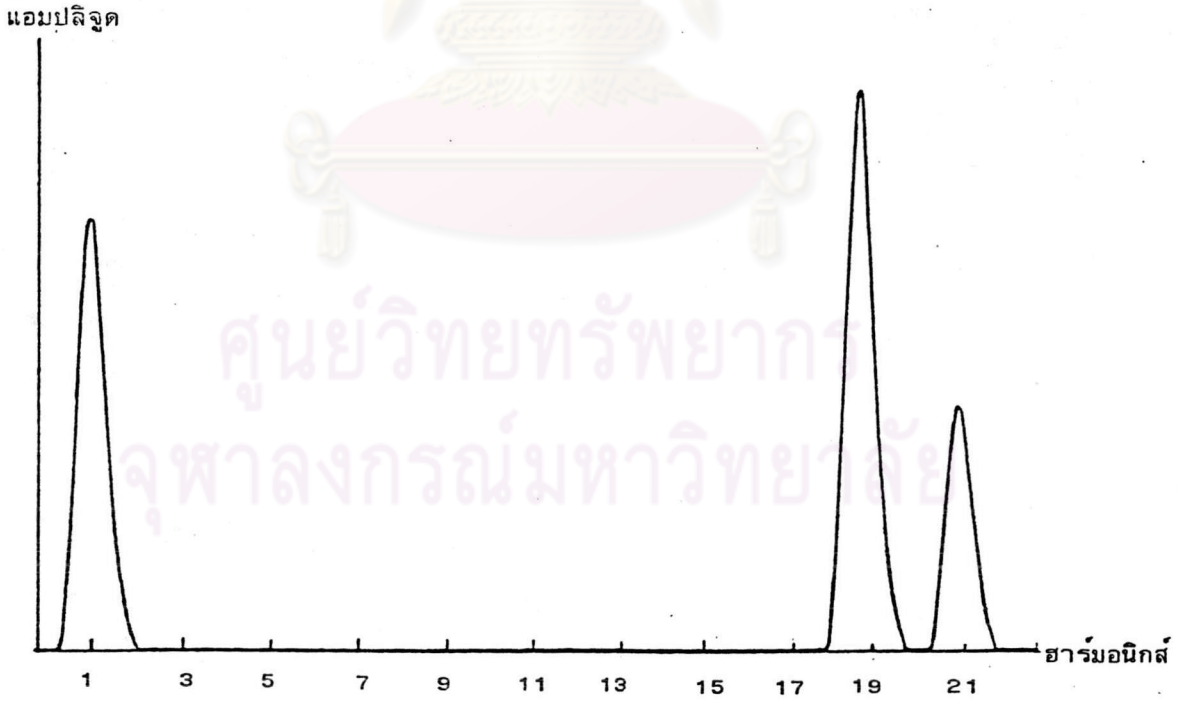
4.5.2 สเปคตรัมของสัญญาณ PWM จากการทดสอบโดยการนำสัญญาณ PWM ที่ได้จากวงจรมอดูเลเตอร์ไปขับนำโหลดที่เป็นความต้านทานสามเฟสจะได้สเปคตรัมของสัญญาณดังในรูปที่ 4.22 - รูปที่ 4.26



รูปที่ 4.22 สเปกตรัมของสัญญาณ PWM เมื่อ $a_1 = 1.0$, $M = 2$, $f_o = 50$ Hz

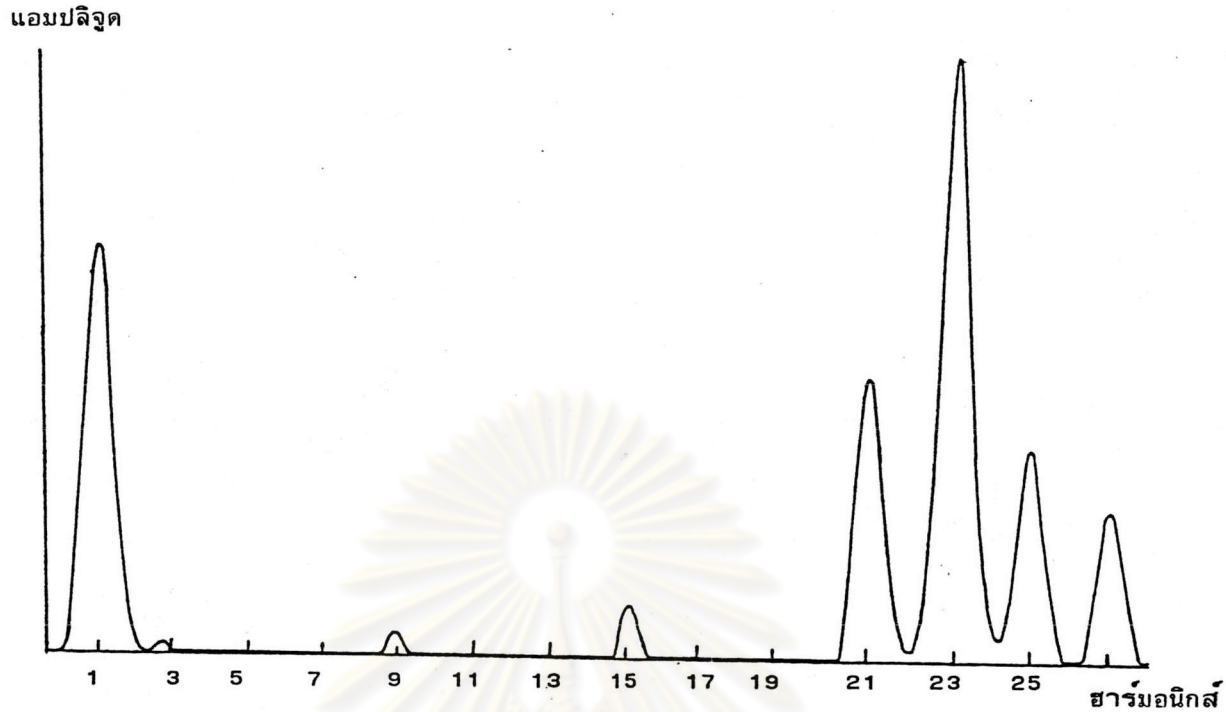


รูปที่ 4.23 สเปกตรัมของสัญญาณ PWM เมื่อ a_1 = 0,86, M = 3, f_o 40 Hz

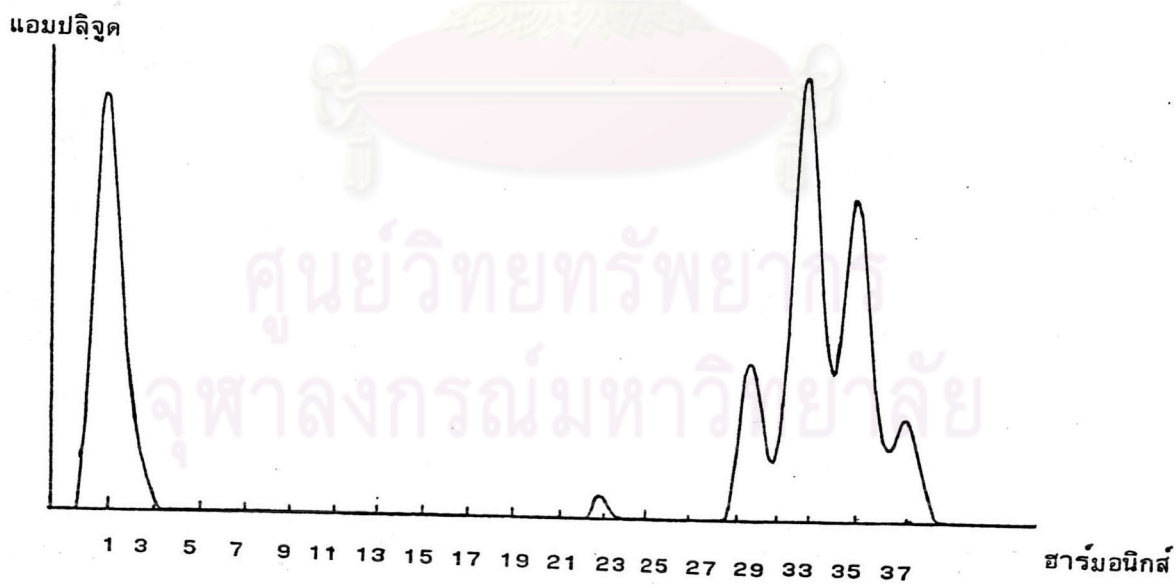


รูปที่ 4.24 สเปกตรัมของสัญญาณ PWM เมื่อ a_1 = 0,55, M = 5, f_o = 20 Hz

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.25 สเปกตรัมของสัญญาณ PWM เมื่อ $a_1 = 0.48$, $M = 7$, $f_o = 15$ Hz



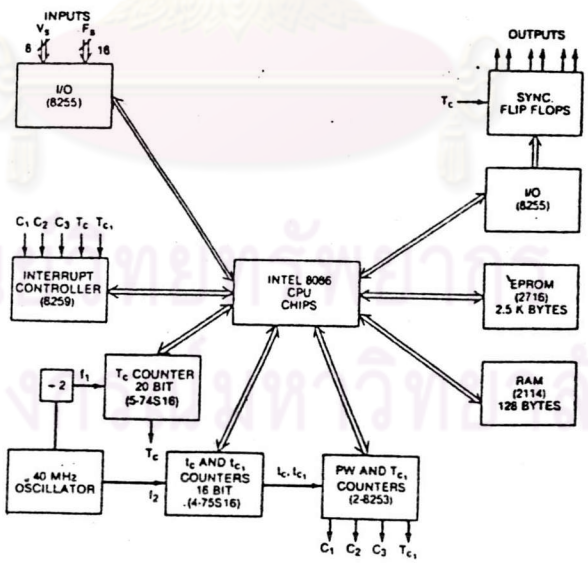
รูปที่ 4.26 สเปกตรัมของสัญญาณ PWM เมื่อ $a_1 = 0,4$, $M = 9$, $f_o = 10$ Hz

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

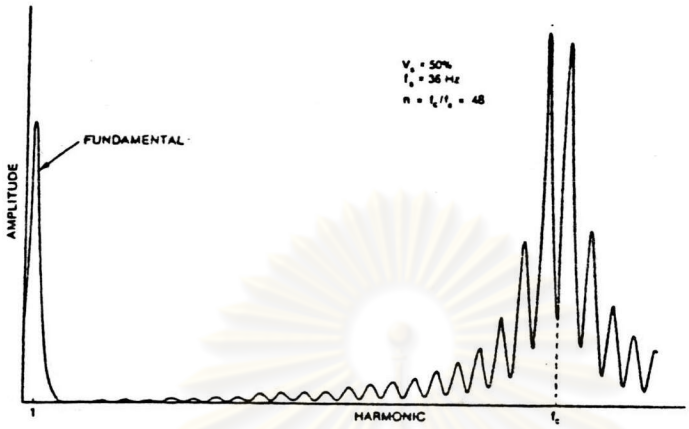
4.6 วงจรมอดูเลเตอร์แบบความกว้างพัลส์โดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์

ปัจจุบันวงจรอินเวอร์เตอร์แบบมอดูเลตความกว้างพัลส์เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถควบคุมแรงดันและความถี่ของสัญญาณขาออกได้โดยการปรับขนาดความกว้างของพัลส์ สัญญาณแบบปรับความกว้างพัลส์นี้ส่วนใหญ่จะใช้การมอดูเลตแบบเชิงเลขตามเอกสารอ้างอิง [17] - [25] และมีการนำไมโครโปรเซสเซอร์เข้ามาช่วยในการกำเนิดสัญญาณแบบมอดูเลตความกว้างพัลส์กันมาก ตัวอย่างเช่นในเอกสารอ้างอิง [8], [17-19], [21-22], [27] ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้วิธีการเก็บแพตเทอร์นของการสวิตช์ไว้ในหน่วยความจำแบบถาวร (ROM) และจะเลือกมาใช้ตามความถี่ที่ต้องการ

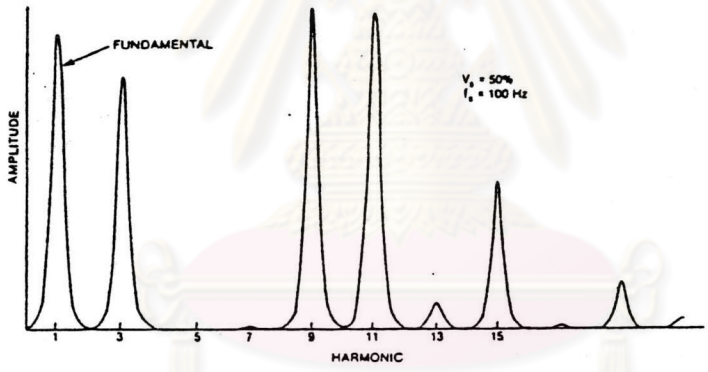
ตัวอย่างของวงจรมอดูเลเตอร์ที่ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์เป็นวงจรมอดูเลเตอร์ตามเอกสารอ้างอิง [21] จะใช้บล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 4.27 การเก็บแพตเทอร์นการสวิตช์ที่ความถี่ต่ำจะใช้การเปรียบเทียบสัญญาณ (subharmonic PWM) และที่ความถี่สูงจะใช้วิธีการกำจัดฮาร์มอนิกส์ (harmonic elimination) จะได้สเป็คตรัมของสัญญาณ PWM ตามรูปที่ 4.28



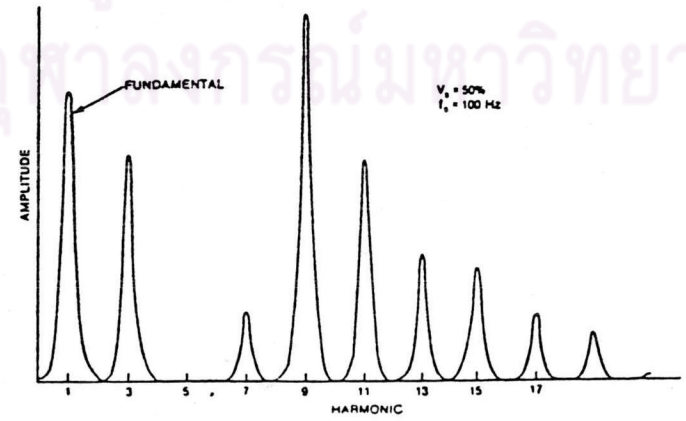
รูปที่ 4.27 บล็อกไดอะแกรมของวงจรมอดูเลเตอร์ตามเอกสารอ้างอิง [21]



ก. สเปกตรัมของอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ แบบฮาร์มอนิกส์ย่อย



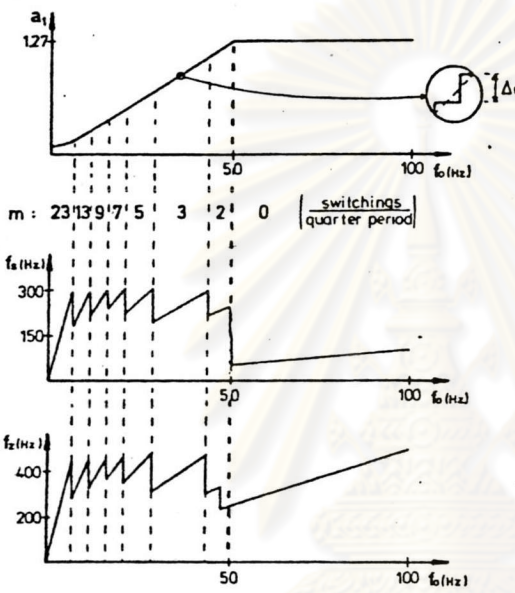
ข. สเปกตรัมของอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบกำจัดฮาร์มอนิกส์



ค. สเปกตรัมของอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบลดค่ากระแสระลอก

รูปที่ 4.28 สเปกตรัมของสัญญาณ PWM จากวงจรตามรูปที่ 4.27

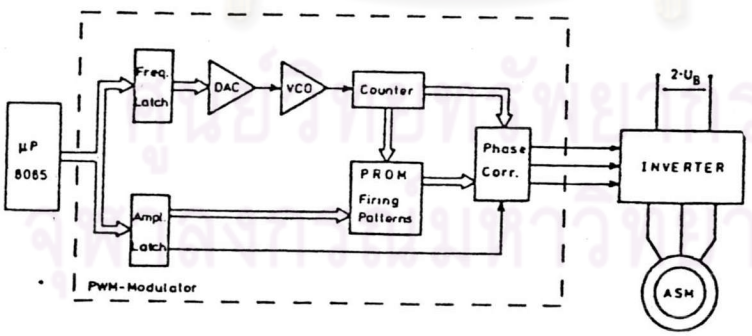
ในเอกสารอ้างอิง [8] ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์เบอร์ 8085 เป็นวงจรมอดูเลเตอร์โดยใช้การเก็บแพตเทอร์นการสวิตช์ไว้ในหน่วยความจำแบบถาวร (PROM) โดยวิธีการกำจัดฮาร์มอนิกส์ รูปของวงจรมอดูเลเตอร์และคุณสมบัติของแพตเทอร์นการสวิตช์ดังแสดงในรูปที่ 4.29 และสเปกตรัมของแรงดันขาออกดังแสดงในรูปที่ 4.30



ก. ลักษณะสมบัติ V/f

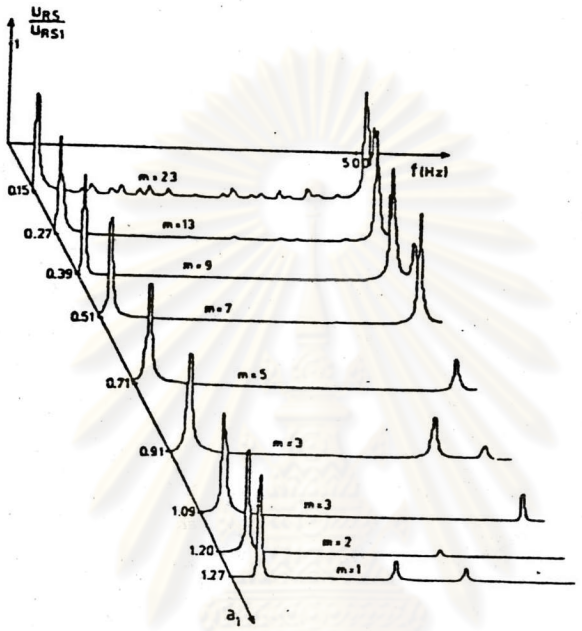
ข. ความถี่การสวิตช์ f_s

ค. ความถี่ f_z ของฮาร์มอนิกส์ต่ำสุดที่ไม่เป็นศูนย์



ง. บล็อกไดอะแกรมของมอดูเลเตอร์

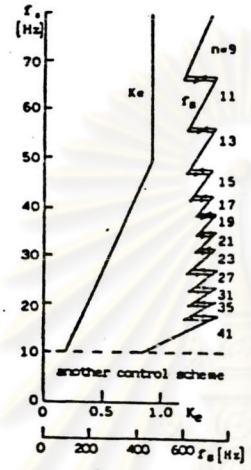
รูปที่ 4.29 วงจรมอดูเลเตอร์ตามเอกสารอ้างอิง [8]



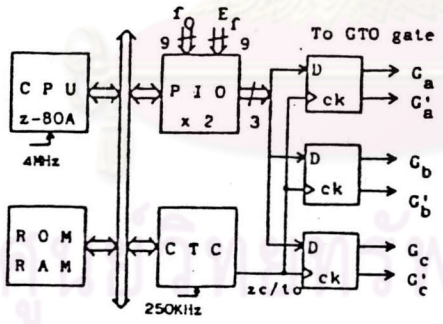
รูปที่ 4.30 สเปกตรัมของแรงดันขาออกของวงจรตามรูปที่ 4.29

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในเอกสารอ้างอิง [27] ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์เบอร์ Z-80A เป็นวงจรมอดูเลเตอร์ โดยใช้การเก็บแพตเทอร์นการสวิตช์ไว้ในหน่วยความจำแบบถาวร (ROM) รูปที่ 4.31 แสดงวงจรมอดูเลเตอร์และแพตเทอร์นการสวิตช์ที่ใช้ในเอกสารอ้างอิง [27] และสเปกตรัมของสัญญาณขาออกดังแสดงในรูปที่ 4.32

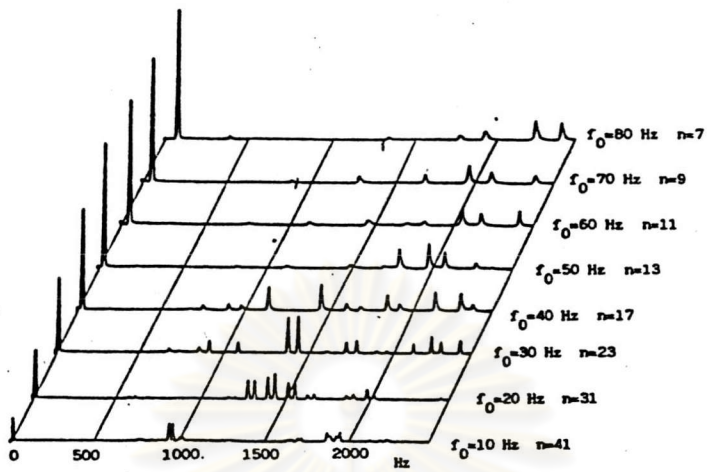


ก. องค์ประกอบหลักมูล K_e และความถี่การสวิตช์ f_ϕ n คือ จำนวนครั้งการสวิตช์ในเศษหนึ่งส่วนสี่คาบ



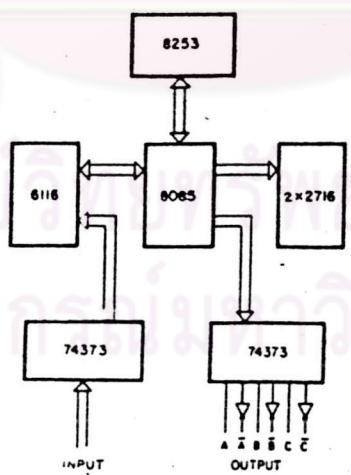
ข. บล็อกไดอะแกรมของวงจรมอดูเลเตอร์

รูปที่ 4.31 วงจรมอดูเลเตอร์ตามเอกสารอ้างอิง [27]

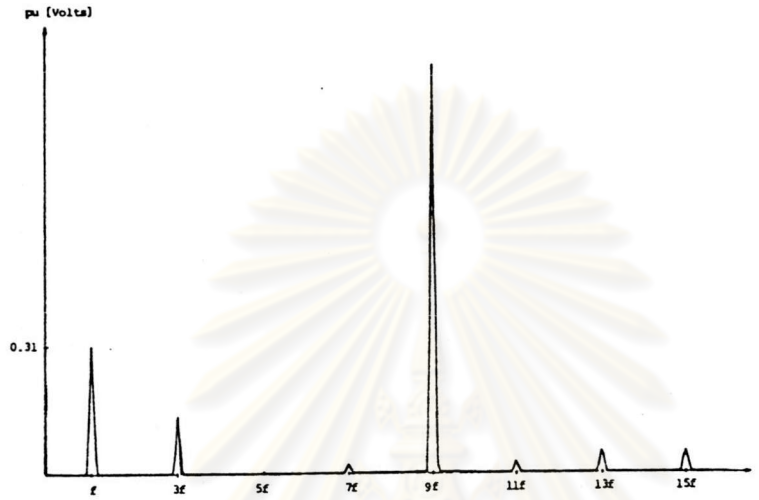


รูปที่ 4.32 สเปกตรัมของแรงดันขาออกของวงจรตามรูปที่ 4.31

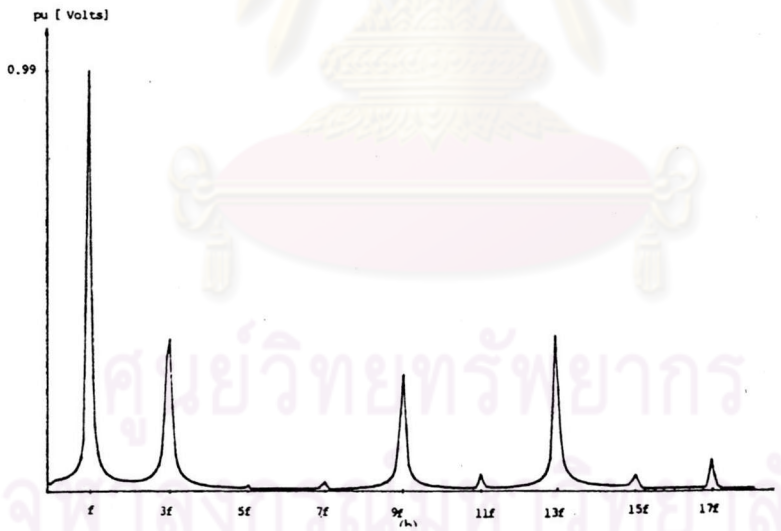
ในเอกสารอ้างอิง [28] ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์เบอร์ 8085 เป็นวงจรมอดูเลเตอร์ โดยใช้การเก็บแพตเทอร์นการสวิตช์ซึ่งได้จากการคำนวณโดยวิธีการกำจัดฮาร์มอนิกส์ ไว้ในหน่วยความจำแบบกึ่งถาวร (EPROM) รูปของวงจรมอดูเลเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.33 และสเปกตรัมของแรงดันขาออกดังแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.33 บล็อกไดอะแกรมของวงจรมอดูเลเตอร์ที่ใช้ในเอกสารอ้างอิง [28]



ก. f = 12 Hz



ข. f = 38 Hz

รูปที่ 3.34 สเปกตรัมของแรงดันขาออกของวงจรรูปที่ 4.33