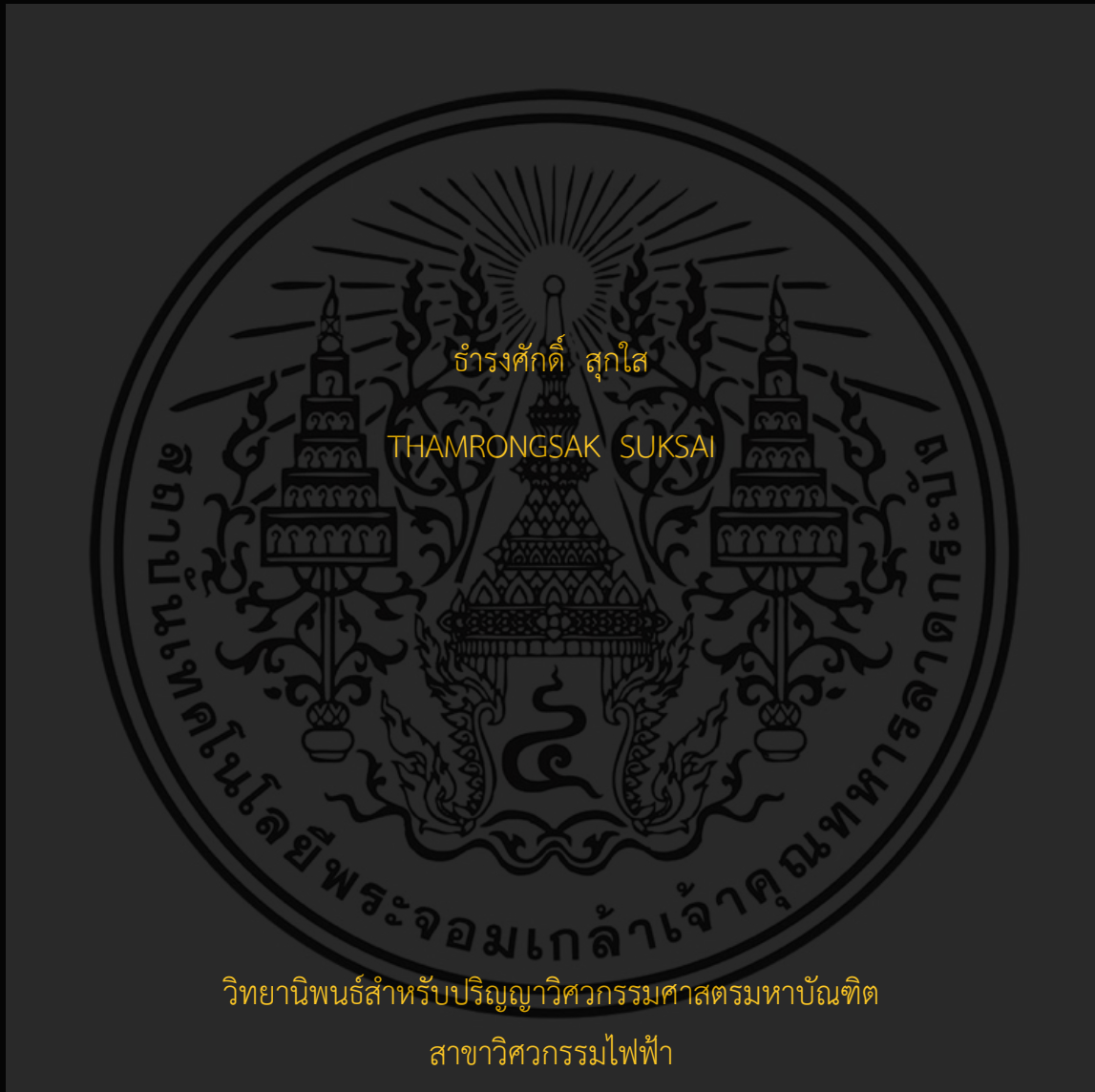


การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีพีดับบลิวเอ็ม
โดยไมโครโพรเซสเซอร์

INDUCTION MOTOR SPEED CONTROL WITH PWM METHOD
BASED ON MICROPROCESSOR



วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2533

ISBN 974-8155-61-7

การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีตัดลิฟต์เอ็ม

โดยไมโครโปรเซสเซอร์

INDUCTION MOTOR SPEED CONTROL WITH PWM METHOD

BASED ON MICROPROCESSOR



วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2533

ISBN 974-8155-61-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
แบบฟอร์มการให้คะแนนการสอบบัณฑิตวิทยาลัย

หัวข้อบัณฑิตวิทยาลัย การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธี PWM โดยไมโครโปรเซสเซอร์
 (PWM CONTROL SPEED OF INDUCTION MOTOR BASED ON MICROPROCESSOR)

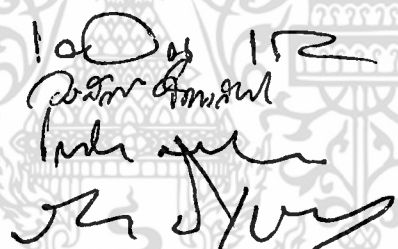
ชื่อนักศึกษา นายขำรงค์ศักดิ์ สุกใส **รหัสประจำตัว** 30126-007

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต **สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา ระบบควบคุม

อาจารย์ผู้ควบคุมบัณฑิตวิทยาลัย รศ.ดร. โยธิน เปรมปราณีรัชต์

อาจารย์ผู้ควบคุมบัณฑิตวิทยาลัยร่วม อ. วรศักดิ์ จิตรศักดิ์

ชื่ออาจารย์ผู้ควบคุมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร. โยธิน เปรมปราณีรัชต์	
อ. วรศักดิ์ จิตรศักดิ์	
ดร. โกวิท มาศรัตน์	
รศ.ดร. วิริยะ นิเชษฐจำเริญ	

ค่าระดับคะแนนรวมที่เป็นเอกฉันท์จากคณะกรรมการสอบ 0 : OUTSTANDING (ดีเยี่ยม)

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 17 มิถุนายน 2534 เวลา 10.00 น.

สถานที่สอบ ห้องประชุมคณะวิศวกรรมศาสตร์ (B-312)



รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 19 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2534

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	IV
Abstract	V
สารบัญรูป	VI
สัญลักษณ์	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 คุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	3
2.1 บทนำ	3
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่โหลด และแรงบิดที่มอเตอร์ กับความเร็ว	3
2.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อจ่าย โวลต์เตจรูปคลื่นไซน์	5
2.3.1 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	5
2.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็ว เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง โวลต์เตจ หรือ ความถี่	9
2.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อจ่าย โวลต์เตจที่ไม่ใช่รูปคลื่นไซน์	12
2.4.1 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	12
2.4.2 ผลกระทบของฮาร์โมนิกที่ต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ	13
2.5 สรุป	13
บทที่ 3 คุณลักษณะของรูปคลื่น PWM	15
3.1 บทนำ	15
3.2 วิธีการสร้างรูปคลื่น PWM	16
3.3 การเปรียบเทียบฮาร์โมนิกของรูปคลื่นแบบต่างๆ	20
3.4 การปรับปรุงรูปแบบสัญญาณ PWM	27
3.5 สรุป	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
บทที่ 4 ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	30
4.1 บทนำ	30
4.2 ส่วนประกอบของชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์	30
4.3 การออกแบบวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์	31
4.3.1 การออกแบบวงจรควบคุม โวลต์เตจและความถี่	32
4.3.2 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณ PWM	38
4.3.3 วงจรชั๊ปอินเวอร์เตอร์	45
4.4 วงจรป้องกัน	49
4.4.1 วงจรตรวจสอบกระแส	49
4.4.2 วงจรป้องกันทรานซิสเตอร์กำลัง	50
4.5 ชิ้นงานของวิทยานิพนธ์	51
4.6 ผลการทดลอง	57
4.7 วิจารณ์ผลการทดลอง	78
4.8 สรุป	78
บทที่ 5 บทสรุป	79
กิตติกรรมประกาศ	82
เอกสารอ้างอิง	83
ภาคผนวก ก. ขนาดพิกัดของมอเตอร์	84
ภาคผนวก ข. การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกของรูปคลื่น	85
ภาคผนวก ค. รายละเอียดของไมโครโปรเซสเซอร์ตระกูล MCS-51	87
ภาคผนวก ง. โปรแกรมส่วนควบคุม โวลต์เตจ-ความถี่ และส่วนสร้างสัญญาณ PWM	99
ภาคผนวก จ. ผลงานวิจัยในระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท ที่ได้รับการเผยแพร่ ในประชุม วิชาการทาง วิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 13 พ.ศ. 2533 ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
ภาคผนวก ฉ. ผลงานวิจัยในระหว่างการศึกษาปริญญาโท ที่ได้รับการเผยแพร่ ในประชุม วิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ประจำปี 2534 เรื่อง "Electrotechnology '91" ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	131



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ กล่าวถึงการออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์ ที่ใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยวิธีพีเอ็มบีเอ็ม ซึ่งสามารถเปลี่ยนความถี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ได้ โดยสัญญาณถูกสร้างขึ้นจากการนำสัญญาณไซน์ซึ่งประกอบด้วยฮาร์โมนิกที่ 3 เพื่อให้ได้ไลน์โวลต์เตจที่ไหลดสูงขึ้น मामอดุลเท่ากับ สัญญาณสามเหลี่ยมแบบยูนิฟอร์มแชนเปลิ่ง โดยมีสัดส่วนความถี่ของสัญญาณทั้งสองคงที่ และ เปลี่ยนสัดส่วนความถี่ของสัญญาณทั้งสอง ในขณะที่ เปลี่ยนความถี่ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดฮาร์โมนิกต่ำขึ้น การสร้างสัญญาณต่างๆ ดังกล่าวนั้น กระทำโดย ไมโครโปรเซสเซอร์ 8031 และนำ 8031 อีกชุดหนึ่งมาใช้ในการควบคุมชุดสร้างสัญญาณข้างต้น โดยสามารถ ปรับสัดส่วนของโวลต์เตจต่อความถี่ อัตราเร่ง อัตราหน่วงในการเปลี่ยนแปลงความเร็ว และสามารถชดเชยโวลต์เตจในช่วงความถี่ต่ำได้ด้วย ประกอบกับ มีวงจรป้องกันกระแสเกิน และป้องกันการกระตุกของมอเตอร์ขณะเร่งความเร็ว จากการทดลองกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 0.75 kW พิกัดกระแส 3.3 A ที่กััดตัดคาไฟฟ้า 220 V สามารถเปลี่ยนความถี่ได้ตั้งแต่ 0.5 ถึง 100 Hz โดยเปลี่ยนแปลงครึ่งละ 0.5 Hz และทำการวัดรูปคลื่นตัดคาไฟฟ้า และกระแส รวมทั้งแถบความถี่ของสัญญาณในสภาวะต่างๆ พบว่าแอมพลิจูดของรูปคลื่นสูงกว่าการมอดูเลตด้วยสัญญาณไซน์ปกติ และการเปลี่ยนสัดส่วนความถี่ช่วยป้องกันไม่ให้อาร์โมนิกที่ความถี่ต่ำเกิดขึ้น

Abstract

This thesis presents the design and implementation of the inverter which is used for speed control of 3 phase induction motor by means of PWM method. The PWM method can change the frequency which supplies to the motor by using the signal which is constructed from the uniform modulation of the triangle and sine wave of which the sine wave consists of the third harmonic for obtaining high line voltage. The triangle and sine wave have constant ratio of frequency and their ratio can vary their signal ratio while the frequency is desired to be changed in preventing the occurrence of low harmonic. The implementation of such signals can be produced by the microprocessor 8031 while the other microprocessor 8031 controls the first one to vary the ratio of voltage to frequency, the acceleration, deceleration of speed changing and it can also compensate the voltage in low frequency range. The microprocessor have the over current protection circuit and stall protection when increasing the acceleration. The experimental of the 3-phase induction motor which power rating 0.75 kW, rated current 3.3 A at rated voltage 220 V, can change the frequency from 0.5-100 Hz by varying each 0.5 Hz. The measuring of voltage and current waveform including the frequency spectrum in various condition can be noted that the amplitude of PWM is higher than the modulating by normal sine wave. The change of ratio frequency can protect the low harmonic occurrence.

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่ไหลด-ความเร็ว (ก) พัลลัมหรือโมเมนต์ (ข) คอมเพรสเซอร์ (ค) ปั๊มจัน	3
รูปที่ 2.2 คุณสมบัติ ณ จุดตัดกันของแรงบิดที่ไหลด(T_L) และแรงบิดที่มอเตอร์(T)	4
รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	7
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	8
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-ความเร็ว เมื่อเปลี่ยน โวลต์ เตจ โดยความถี่คงที่	9
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-ความเร็ว เมื่อเปลี่ยนความถี่ โดย โวลต์ เตจคงที่	10
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-ความเร็ว เมื่อเปลี่ยนความถี่ โดย V/F คงที่	11
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง โวลต์ เตจ-ความถี่ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	11
รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลย์เมื่อพิจารณาฮาร์โมนิคอันดับที่ n	12
รูปที่ 3.1 แสดงวงจรส่วนจ่ายพลังงาน ให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	15
รูปที่ 3.2 การสร้างรูปคลื่น PWM ด้วยวิธีเนเชอรัลแซมปลิง	16
รูปที่ 3.3 การสร้างรูปคลื่น PWM ด้วยวิธี โมดิฟายส์ฮาร์โมนิคแซมปลิง	17
รูปที่ 3.4 การสร้างรูปคลื่น PWM ด้วยวิธียูนิฟอร์มแซมปลิง	18
รูปที่ 3.5 การสร้างรูปคลื่น PWM ด้วยวิธีดิจิตอลชายน	19
รูปที่ 3.6 การสร้างรูปคลื่น PWM ด้วยวิธีมอดูเลทตำแหน่ง	19
รูปที่ 3.7 ฮาร์โมนิคของรูปคลื่นแบบเฟสเดียว เมื่อ MD = 50% และ FR = 12	21
รูปที่ 3.8 ฮาร์โมนิคของรูปคลื่นแบบสามเฟส เมื่อ MD = 50% และ FR = 12	22
รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงฮาร์โมนิคของรูปคลื่นแบบเฟสเดียว เมื่อ MD = 0 ถึง 150% และ FR = 12	23
รูปที่ 3.10 การเปลี่ยนแปลงฮาร์โมนิคของรูปคลื่นแบบสามเฟส เมื่อ MD = 0 ถึง 150% และ FR = 12	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 3.11 การเปลี่ยนแปลงฮาร์โมนิกของรูปคลื่นแบบเฟสเดียว เมื่อ MD = 50% และ FR = 6 ถึง 24	25
รูปที่ 3.12 การเปลี่ยนแปลงฮาร์โมนิกของรูปคลื่นแบบสามเฟส เมื่อ MD = 50% และ FR = 6 ถึง 24	26
รูปที่ 3.13 รูปคลื่นชายน้ปกติ เปรียบเทียบกับรูปคลื่นชายน้ที่เพิ่มฮาร์โมนิกที่ 3	28
รูปที่ 4.1 บล็อกแสดงชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	31
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจ กับความถี่	32
รูปที่ 4.3 วงจรควบคุมโวลต์เตจและความถี่	33
รูปที่ 4.4 แผนภูมิเวลาการเริ่มแปลงข้อมูลอนาลอกเป็นดิจิทัล	34
รูปที่ 4.5 แผนภูมิเวลา การอ่านข้อมูลดิจิทัลจาก ADC0809	35
รูปที่ 4.6 ไฟล์ชาร์ตของโปรแกรม ส่วนควบคุมโวลต์เตจและความถี่	37
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่รูปคลื่น และความถี่สวิทซ์	38
รูปที่ 4.8 วงจรสร้างรูปคลื่น PWM	39
รูปที่ 4.9 วงจรแปลงข้อมูลดิจิทัล เป็นสัญญาณอนาลอกแบบให้เอาต์พุตบวก-ลบ	40
รูปที่ 4.10 ตารางความสัมพันธ์ของสัดส่วนความถี่กับช่วงการส่งข้อมูล	41
รูปที่ 4.11 ไฟล์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมสร้างรูปคลื่น PWM	42-43
รูปที่ 4.12 วงจรแปลงข้อมูลดิจิทัล เป็นสัญญาณอนาลอกแบบให้เอาต์พุตบวก	44
รูปที่ 4.13 โครงสร้างของวงจรขับอินเวอร์เตอร์	45
รูปที่ 4.14 วงจรหน่วงสัญญาณ	46
รูปที่ 4.15 วงจรแยกสัญญาณ	47
รูปที่ 4.16 วงจรขับเบส	48
รูปที่ 4.17 วงจรตรวจสอบกระแส	50
รูปที่ 4.18 วงจรป้องกันทรานซิสเตอร์กำลัง	51
รูปที่ 4.19 ภาพวงจรควบคุมโวลต์เตจและความถี่	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 4.20 ภาพวงจรสร้างรูปคลื่น PWM	53
รูปที่ 4.21 ภาพชุดวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์	54
รูปที่ 4.22 ภาพวงจรแหล่งจ่ายไฟแบบสวิทชิง	54
รูปที่ 4.23 ภาพวงจรทรานซิสเตอร์กำลัง	55
รูปที่ 4.24 ภาพวงจรตรวจสอบกระแส	55
รูปที่ 4.25 ภาพวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	56
รูปที่ 4.26 รูปคลื่นสามเหลี่ยมเทียบกับรูปคลื่นที่นำมาถอดเลขที่ FR ต่างๆ	59-62
รูปที่ 4.27 รูปคลื่นโวลต์เตจระหว่างเฟสที่ FR ต่างๆ	63-66
รูปที่ 4.28 รูปคลื่นไลน์โวลต์เตจที่มอเตอร์เทียบกับรูปคลื่นกระแสที่ FR ต่างๆ	67-70
รูปที่ 4.29 แยกความถี่ของเฟสโวลต์เตจของรูปคลื่น PWM เมื่อลดความถี่ลงจาก 100 Hz	71
รูปที่ 4.30 แยกความถี่ของเฟสโวลต์เตจของรูปคลื่น PWM เมื่อกลับทิศทางการหมุนมอเตอร์	72
รูปที่ 4.31 แยกความถี่ของไลน์โวลต์เตจของรูปคลื่น PWM เมื่อลดความถี่ลงจาก 100 Hz	73
รูปที่ 4.32 แยกความถี่ของไลน์โวลต์เตจของรูปคลื่น PWM เมื่อกลับทิศทางการหมุนมอเตอร์	74
รูปที่ 4.33 ผลของ stall protection เมื่อเร่งความเร็ว	75
รูปที่ 4.34 ผลของการปรับอัตราเร่งและอัตราหน่วง โดยเร่งเร็วกว่าหน่วง	75
รูปที่ 4.35 ผลของการปรับอัตราเร่งและอัตราหน่วง โดยหน่วงเร็วกว่าเร่ง	76
รูปที่ 4.36 ผลของความเร็วเมื่อกลับทิศของมอเตอร์	76
รูปที่ 4.37 ผลของความเร็วเมื่อเพิ่มโหลดให้แก่มอเตอร์	77
รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ในช่องที่ k ของรูปคลื่น	85

สัญลักษณ์

A_o, A_n, B_n	ค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์
C_{ep}, C_{en}	ตัวเก็บประจุในวงจรสับเบอ์
D_1-D_3	ไดโอดในวงจรขับเบส
D_{ep}, D_{en}	ไดโอดในวงจรสับเบอ์
E_1	โวลต์เตจที่ขดปฐมภูมิ
E_2	โวลต์เตจที่ขดทุติยภูมิ
f_1	ความถี่เชิงโคโรนัส
I_1	กระแสด้านปฐมภูมิ
I_2	กระแสด้านทุติยภูมิ
L_1	อินดักแตนซ์ในวงจรขับเบส
L_s	อินดักแตนซ์รวมในวงจรสับเบอ์
L_e, L_{ep}, L_{en}	อินดักแตนซ์ในวงจรสับเบอ์
M	แอมพลิจูดของรูปคลื่นชานัน
N	ความเร็วของมอเตอร์
N_1	ความเร็วเชิงโคโรนัส
P	กำลังไฟฟ้า
P_o	กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์
P_{1e}	กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่สเตเตอร์
P_{1r}	กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่โรเตอร์
Q_1-Q_6	ทรานซิสเตอร์ในวงจรขับเบส
Q_p	ทรานซิสเตอร์กำลังด้านบนของวงจรขับ
Q_n	ทรานซิสเตอร์กำลังด้านล่างของวงจรขับ
R_1	ความต้านทานด้านปฐมภูมิของวงจรสมมูลย์
R_2	ความต้านทานด้านทุติยภูมิของวงจรสมมูลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_{FW}	ความต้านทานจากแรงเสียดทานและแรงลม
R_e	ความต้านทานด้านเหนี่ยวนำ
S	หนึ่งหน่วยสลิป
S_n	หนึ่งหน่วยสลิปของฮาร์โมนิก
S_{Tm}	หนึ่งหน่วยสลิปที่แรงบิดสูงสุด
t_p	ช่วงความกว้างของพัลส์
t_1-t_4	ตำแหน่งต่างๆในรูปคลื่น PWM
T	แรงบิดที่มอเตอร์
T_L	แรงบิดที่โหลด
T_m	แรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์
V_1	โวลต์เตจที่อินพุตมอเตอร์
V_{dc}	โวลต์เตจกรวยแสดตรง
V_{in}	โวลต์เตจอินพุต
V_{out}	ไลน์โวลต์เตจเอาต์พุต
$V_{out (phase)}$	เฟสโวลต์เตจเอาต์พุต
X_1	อินดักแตนซ์ที่ด้านปฐมภูมิ
X_2	อินดักแตนซ์ที่ด้านทุติยภูมิ
X_m	แมกเนไทซิงรีแอคแตนซ์ (magnetizing reactance)
$X_k, X_{k+1}, Y_k, Z_{k+1}$	ขนาดของรูปคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ
ZD_1	ซีเนอร์ไดโอดในวงจรชั๊ปเบส
ρ_k	ค่าคงที่
m	ความเร็วเชิงมุมของรูปคลื่นไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

อุตสาหกรรมในปัจจุบัน มอเตอร์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ในการทำงานของเครื่องจักรทั้งขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ ซึ่งมอเตอร์ที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป จะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง(DC motor) หรือ มอเตอร์เหนี่ยวนำ(induction motor) ที่มีการคัปปลิง(coupling) ที่แกนของมอเตอร์(ED motor) เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วในการหมุน เนื่องจากมีการควบคุมที่ไม่ยุ่งยาก และราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมไม่สูงมาก แต่การใช้งานของมอเตอร์เหล่านี้ มีข้อเสียอันเนื่องมาจาก มีขนาดใหญ่ ข้อจำกัดในด้านสถานที่ติดตั้ง ต้องการการบำรุงรักษาเป็นประจำ และราคาของมอเตอร์เองค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่กำลังเท่ากัน จะมีขนาดเล็กและราคาถูกกว่า ที่สำคัญคือไม่ต้องการการบำรุงรักษามากนัก และมอเตอร์เหนี่ยวนำบางประเภทสามารถนำไปใช้ได้ใหญ่สถานที่ แต่สาเหตุที่ยังไม่ได้รับความนิยมมากนัก เนื่องจากเครื่องจักรที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป เป็นเครื่องจักรรุ่นเก่าซึ่งใช้มอเตอร์ประเภทอื่นอยู่ก่อน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกลจึงค่อนข้างยุ่งยาก และการควบคุมความเร็ว มอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ขึ้น ค่อนข้างยุ่งยาก เพราะมีความจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายพลังงาน ที่สามารถเปลี่ยนโวลต์เตจ(voltage) หรือ ความถี่(frequency) ได้ ทำให้ราคาของอุปกรณ์ที่นำมาใช้ควบคุมความเร็วค่อนข้างสูง

ปัจจุบัน ไมโครโพรเซสเซอร์(microprocessor) ได้ถูกพัฒนาให้มีความเร็วสูงขึ้น มีองค์ประกอบการทำงาน(function)มากขึ้น และมีขนาดเล็กลง จึงทำให้เราสามารถนำมาใช้ในการควบคุมต่างๆ เช่น การสร้างสัญญาณ PWM หรือ การควบคุมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้สะดวกขึ้น ประกอบกับพัฒนาการทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง(power electronic devices) ซึ่งสามารถทำการสวิตช์(switching) ที่ความถี่สูงขึ้น ก็ได้รับการพัฒนาควบคู่กันไป จึงทำให้เราสามารถควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ง่ายขึ้น เนื่องจากวิธีที่ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมมีอยู่หลายวิธี ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกศึกษาวิจัย และทดลองสร้างระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 0.75 kW พิกัดกระแส 3.3 A ที่พิกัดโวลต์เตจ 220 V ด้วยวิธีซิมูเลชันแบบคัปปลิง(uniform sampling) ซึ่งสามารถสร้างสัญญาณได้ง่ายเมื่อใช้ไมโครโพรเซสเซอร์ โดยใช้สัญญาณช่ายที่ประกอบ

ด้วยฮาร์โมนิกที่ 3 มามอดูเลทกับรูปคลื่นสามเหลี่ยมเพื่อให้ได้ไลน์โวลต์เตจสูงขึ้น และป้องกันการเกิดฮาร์โมนิก(harmonic)ความถี่ต่ำ โดยการเปลี่ยนสัดส่วนความถี่(frequency ratio) ระหว่างสองสัญญาณที่นำมามอดูเลท(modulate)กัน ขณะที่ความถี่เปลี่ยนแปลง ในการทดลองสามารถเปลี่ยนความถี่ได้ตั้งแต่ 0.5 ถึง 100 Hz โดยเปลี่ยนครึ่งละ 0.5 Hz และทำการวัดรูปคลื่นโวลต์เตจ และกระแส รวมทั้งแถบความถี่ของสัญญาณในสภาวะต่างๆ พบว่าแอมพลิจูดของรูปคลื่นสูงกว่าการมอดูเลทด้วยสัญญาณไซน์ปกติ และการเปลี่ยนสัดส่วนความถี่ช่วยป้องกันไม่ให้ฮาร์โมนิกที่ความถี่ต่ำเกิดขึ้น วิทยานิพนธ์นี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ จะอธิบายถึงวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ และเนื้อหาคร่าว ๆ ของแต่ละบทในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 2 อธิบายโครงสร้างและคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ รวมถึงความสัมพันธ์ของแรงบิด(torque) และความเร็ว(speed) เมื่อควบคุมในลักษณะต่าง ๆ

บทที่ 3 กล่าวถึงคุณสมบัติของรูปคลื่น PWM ซึ่งได้จากการมอดูเลทด้วยวิธีต่างๆ เพื่อพิจารณาเลือกวิธีที่เหมาะสม รวมทั้งการเพิ่มฮาร์โมนิกที่ 3 เพื่อให้ขนาดของโวลต์เตจสูงขึ้น

บทที่ 4 อธิบายรายละเอียดของวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ออกแบบสร้างขึ้น และไฟล์ชาร์ต การทำงานของโปรแกรมในส่วนต่างๆ รวมทั้งผลการทดลองขับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 0.75 kW เพื่อสังเกตแถบความถี่และรูปคลื่นของกระแส

บทที่ 5 บทสรุป

ส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นภาคผนวกอันประกอบด้วย ขนาดกิตัดของมอเตอร์ที่ใช้ รวมทั้งเขนเนอเรเตอร์ ซึ่งนำมาเป็นโหลดด้วย จากนั้นก็เป็น ทฤษฎีการหาแถบความถี่ของรูปสัญญาณแทนด้วยวิธี piecewise linear waveforms ร่วมกับการแปลงฟูเรียร์ (fourier transform) ท้ายสุดเป็นรายละเอียดของไมโครโปรเซสเซอร์ 8031 ที่ใช้ในการออกแบบ พร้อมทั้งโปรแกรมส่วนควบคุมโวลต์เตจ - ความถี่ และส่วนสร้างสัญญาณ PWM

บทที่ 2

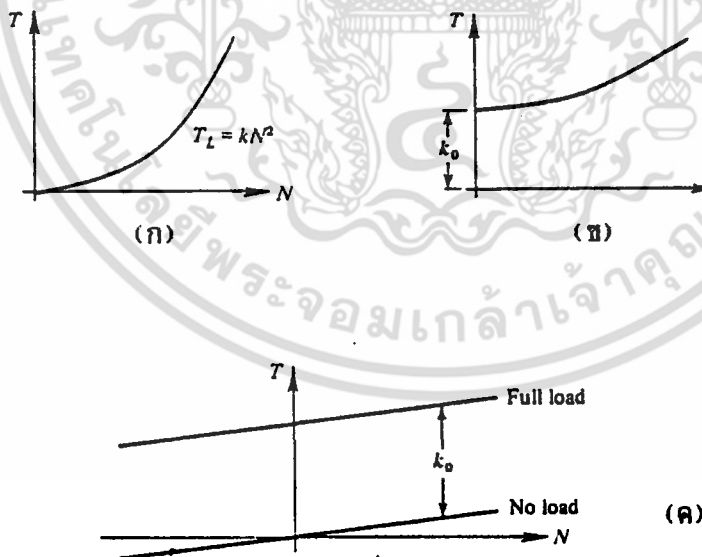
คุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

2.1 บทนำ

ในระบบควบคุมใดๆก็ตาม เราต้องมีความเข้าใจในองค์ประกอบพื้นฐาน และคุณสมบัติของระบบที่ต้องการควบคุมเสียก่อน เช่นเดียวกับการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งในบทนี้จึงกล่าวถึงวงจรสมมูลย์ (equivalent circuit) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [1,2,3,5] รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (torque) กับความเร็ว (speed) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง โวลต์ เตจ หรือ ความถี่ และผลของฮาร์โมนิก (harmonic) ที่จะเกิดขึ้นต่อมอเตอร์

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่โหลด (load torque) และแรงบิดที่มอเตอร์ กับความเร็ว

การนำมอเตอร์เหนี่ยวนำไปใช้งานในระบบต่างๆ สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรกในการควบคุมคือ ชนิดของโหลดที่มอเตอร์ต้องขับ โดยทั่วไปโหลดมีหลายประเภท และแต่ละประเภท ก็จะมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่โหลด-ความเร็วที่แตกต่างกัน โดยสามารถเขียนได้เป็น



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่โหลด-ความเร็ว (ก)พัดลมหรือโม่
(ข)คอมเพรสเซอร์ (ค)ปั๊มน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_L = f(N) \tag{2.1}$$

สำหรับความสัมพันธ์ของแรงบิดที่โหลด-ความเร็ว ที่พบเห็นโดยทั่วไป แสดงดังรูปที่ 2.1

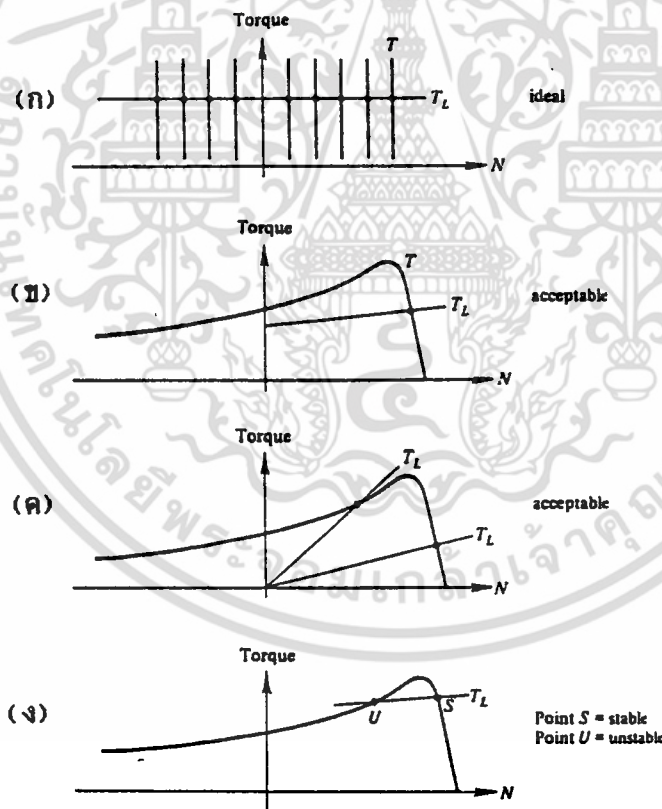
ได้แก่

$$T_L = kN^2 \quad ; \text{น้ดลมหรือโม่} \tag{2.2}$$

$$T_L = k_0 + k_1N + k_2N^2 + \dots \quad ; \text{คอมเพรสเซอร์} \tag{2.3}$$

$$T_L = k_0 + k_1N \quad ; \text{ปั้มน้} \tag{2.4}$$

จากการศึกษา พบว่าในระบบควบคุมที่ด้น แรงบิดที่มอเตอร์ที่ความเร็วต่างๆ ควรอยู่ใน



รูปที่ 2.2 คุณสมบัติ ณ จุดตัดกันของแรงบิดที่โหลด (T_L) และแรงบิดที่มอเตอร์ (T)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวตั้งฉาก หรือใกล้เคียงที่สุด เพื่อให้ความเร็วเปลี่ยนแปลงน้อย แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงบิดของ โหลด อย่างทันทีทันใด ดังรูปที่ 2.2(ก)

เมื่อพิจารณา แรงบิดที่โหลด(T_L) และแรงบิดที่มอเตอร์(T) บนแกนเดียวกัน ดังรูปที่ 2.2 จะเห็นว่า ที่จุดตัดของเส้นทั้งสองนั้น ควรจะให้เส้น T มีความชันน้อยกว่าเส้น T_L ดังจุด S ในรูป 2.2(ง) เพราะมอเตอร์จะรักษาระดับความเร็วไว้ได้ หากความเร็วเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากผลกระทบ จากภายนอก ส่วนที่จุด U จะไม่สามารถรักษาระดับความเร็วที่จุดนั้นไว้ได้

2.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อจ่ายโวลต์เตจรูปคลื่นไซน์

โดยทั่วไปการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นเมื่อจ่าย โวลต์รูปคลื่นไซน์ให้กับสเตเตอร์ (stator) ของมอเตอร์ก็จะเกิดฟลักซ์ (flux) ขึ้นในช่องว่าง (air gap) ซึ่งหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (synchronous) เป็น

$$\begin{aligned} N_1 &= (2\omega_1 / P) \quad \text{rad/s} \quad (2.5) \\ \text{หรือ} \quad &= (120f_1 / P) \quad \text{rpm} \end{aligned}$$

หากโรเตอร์ (rotor) หยุด ก็จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลภายในโรเตอร์ และทำให้เกิด mmf (magneto motive force) ทำให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทางเดียวกับฟลักซ์ ซึ่งหากโรเตอร์ หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส ก็จะไม่เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นระหว่างฟลักซ์กับโรเตอร์ ดังนั้นตามปกติความ เร็วของมอเตอร์ (N) จะหมุนช้ากว่า ซึ่งความแตกต่างของความเร็วทั้งสองนั้น ($N - N_1$) เราเรียกว่า ความเร็วสลิป (slip speed) และจะหาค่าของสลิปต่อหน่วย (per unit slip) ได้จาก

$$S = (N_1 - N) / N_1 \quad (2.6)$$

2.3.1 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เนื่องจาก มอเตอร์เหนี่ยวนำ มีลักษณะการทำงานเหมือนหม้อแปลงไฟฟ้า (transformer)

ดังนั้นจึงสามารถเขียนวงจรสมมูลแต่ละเฟสของมอเตอร์ได้เช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.3

จากรูป 2.3(ข) ได้ความสัมพันธ์ของกระแสโรเตอร์เป็น

$$I_2 = E_1 / (R_2/S + jX_2) \quad (2.7)$$

โดยที่ $E_1 = V_1 - I_1(R_1 + jX_1)$ (2.8)

และจะได้ขนาดกระแสเป็น

$$|I_2| = |E_1| / (\sqrt{(R_2/S)^2 + X_2^2}) \quad (2.9)$$

ในทางปฏิบัติพบว่า โวลต์เตจตกคร่อม $R_1 + jX_1$ น้อย ดังนั้นจึงประมาณได้ว่า

$$|E_1| \approx |V_1| \quad (2.10)$$

ซึ่งจะได้วงจรสมมูล ดังรูปที่ 2.3(ค) และได้กระแสโรเตอร์เป็น

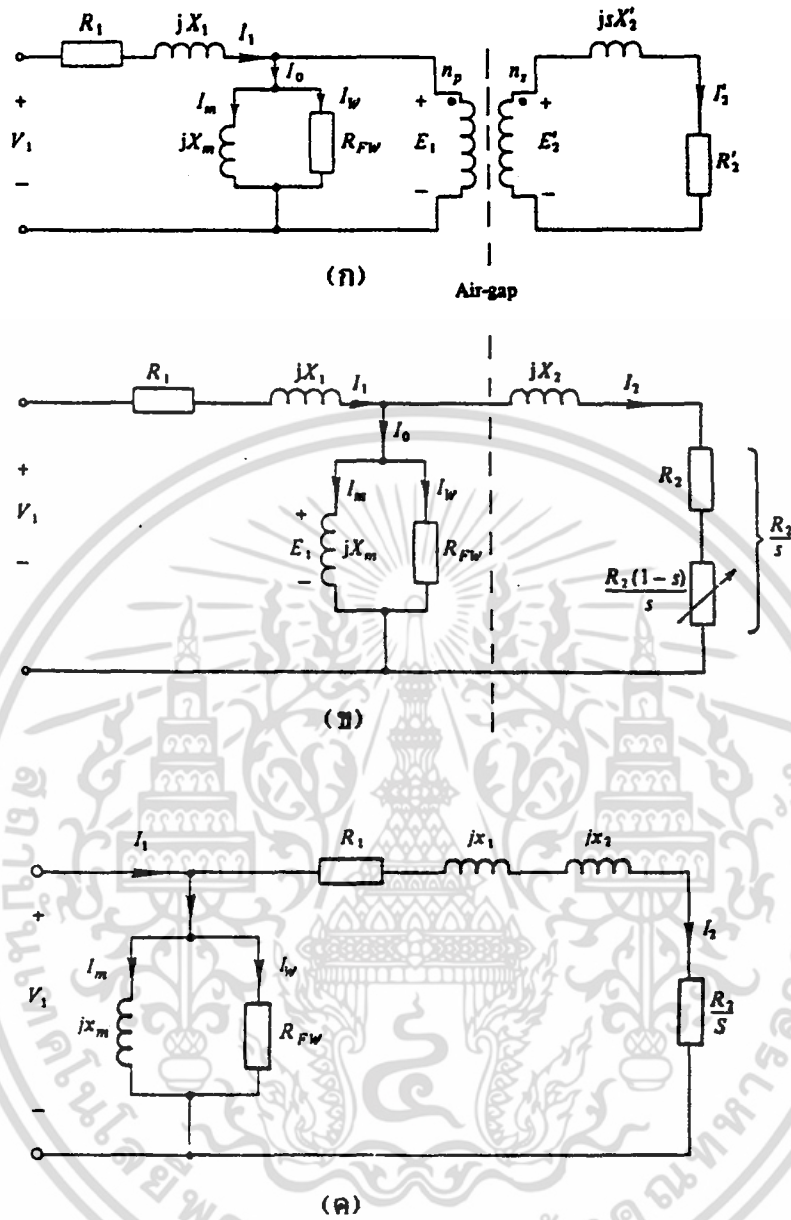
$$I_2 = V_1 / [(R_1 + R_2/S) + j(X_1 + X_2)] \quad (2.11)$$

และ $|I_2| = |V_1| / \sqrt{(R_1 + R_2/S)^2 + (X_1 + X_2)^2}$ (2.12)

สำหรับการหาค่า แรงบิดของมอเตอร์นั้น เราสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$T = P_o / N \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนเป็นกำลังทางกลหาได้จาก

$$P_o = [|I_2|^2 R_2 (1-S)] / S \tag{2.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการ (2.6) พบว่า

$$N = N_1(1-S) \quad (2.15)$$

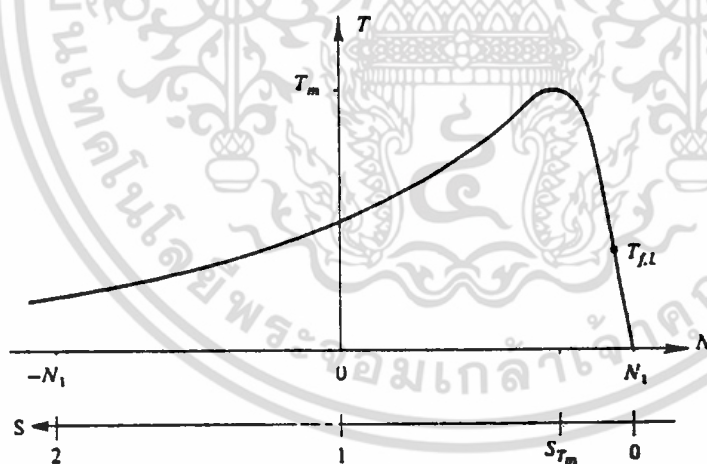
ดังนั้น

$$T = \frac{[|I_2|^2 R_2]}{[N_1 \cdot S]} \quad (2.16)$$

เมื่อแทนค่า $|I_2|$ จากสมการ (2.12) ลงในสมการ (2.16) จะได้

$$T = \frac{\{[|V_1|^2 / N_1] \cdot [R_2 / S]\}}{\{(R_1 + R_2/S)^2 + (X_1 + X_2)^2\}} \quad (2.17)$$

จากสมการนี้ จะเห็นว่าหากป้อนโวลต์เตจ และความถี่ คงที่แล้ว ตัวแปรที่จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ T ก็คือ S ซึ่งจะทำให้ได้ความสัมพันธ์ของแรงบิด-ความเร็ว ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

และสามารถหาค่าแรงบิดสูงสุดได้โดยการดิฟเฟอเรนเชียล สมการ (2.17) เทียบกับ S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

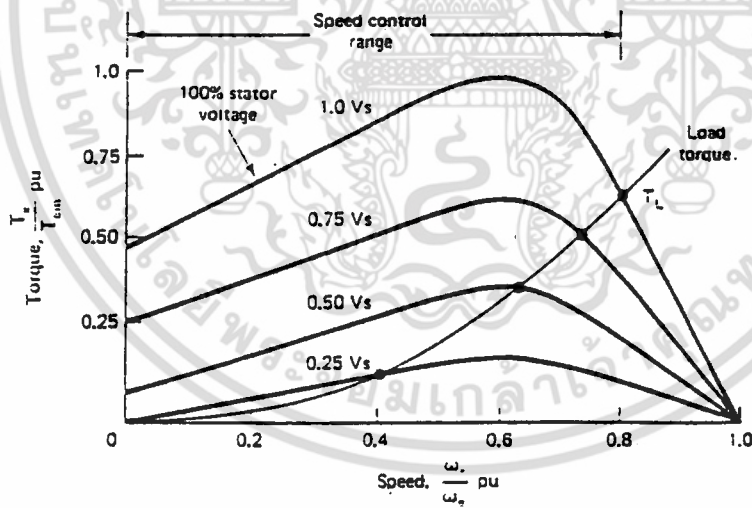
แล้วให้ เท่ากับ 0 ซึ่งจะทำให้ได้

$$S_{T_m} = R_2 / [\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}] \approx R_2 / [X_1 + X_2] \quad (2.18)$$

เมื่อแทน สมการ (2.18) ลงในสมการ (2.17) จะได้แรงบิดสูงสุดเป็น

$$T_m = \frac{\{ [|V_1|^2 / 2N_1] \} / \{ R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2} \}}{[|V_1|^2] / [2N_1 (X_1 + X_2)]} \quad (2.19)$$

2.3.2 ความสัมพันธ์ของแรงบิดกับความเร็ว เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง โวลต์ เตจหรือความถี่



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-ความเร็วเมื่อเปลี่ยน โวลต์ เตจ โดยความถี่คงที่

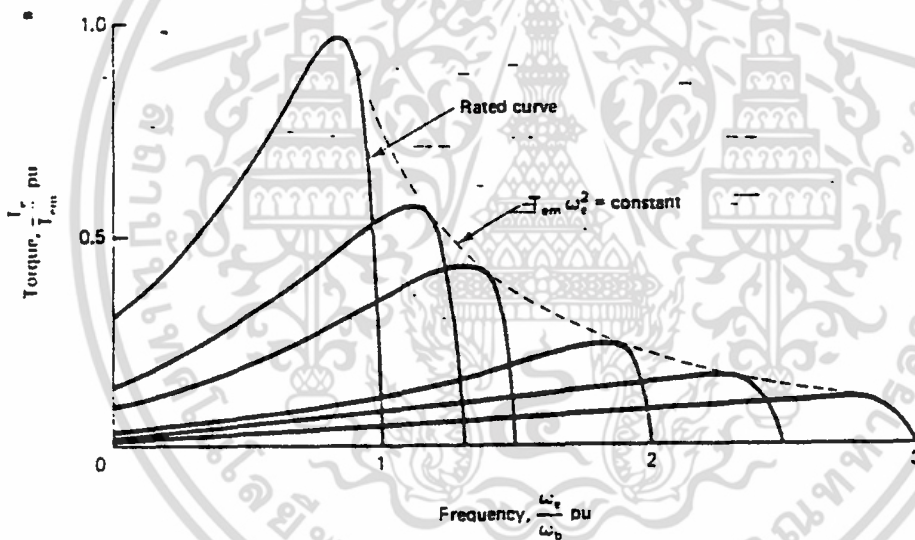
การพิจารณาความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ จากสมการ (2.17) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ ได้แก่

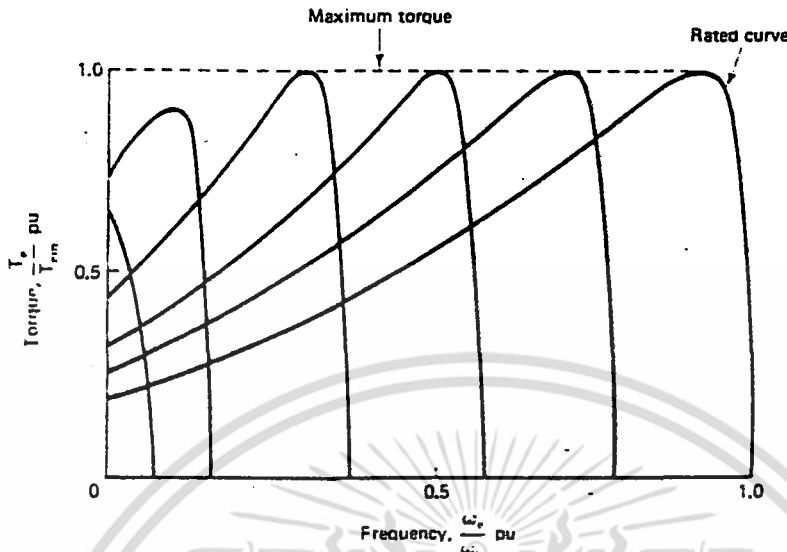
ก. เปลี่ยนโวลต์เตจโดยความถี่คงที่ วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดหากใช้ความคมความเร็วมอเตอร์เห็นยว่นา แต่ค่าแรงบิดสูงสุดจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อโวลต์เตจลดลง ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งได้แสดงให้เห็นแรงบิดที่ไหลตซึ่ง เป็นพัดลมหรือปั๊มควมคู้ไปด้วย จะเห็นว่าช่วงการควมควมเร็วนี้ จะต้องมีสลปมาก ซึ่งจะเป็นผลให้มพลังงานสูญเสียมากขึ้นด้วย

ข. เปลี่ยนความถี่โดยโวลต์เตจคงที่ จะให้ผลดังรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดสูงสุดในช่วงความถี่ที่มากกว่าปกติ เนื่องจากถาลความถี่ต่ำกว่านี้ โดยระดับโวลต์เตจเท่าปกติ ฟลักซ์จะเกิดอิมตัว(saturate) เกิดกระแสไหลมากที่สเตเตอร์ ดังนั้นในช่วงความถี่ต่ำกว่าความถี่ปกติ จึงควลดโวลต์เตจลงด้วยเพื่อให้ฟลักซ์ลดลง



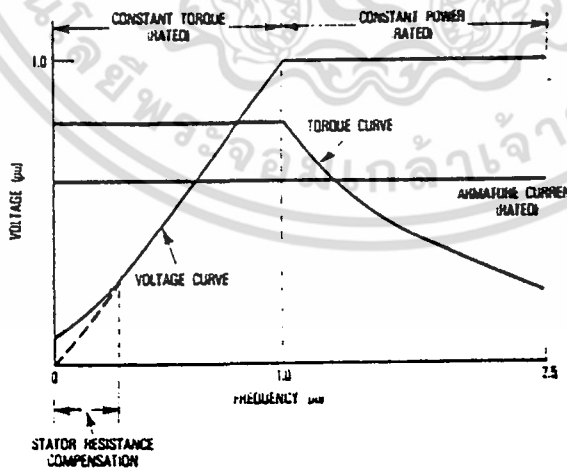
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-ความเร็ว เมื่อเปลี่ยนความถี่โดยโวลต์เตจคงที่

ค. เปลี่ยนความถี่โดยสัดส่วนของโวลต์เตจและความถี่ จะได้ผลดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะได้แรงบิดสูงสุดคงที่ อันเป็นผลมาจากฟลักซ์คงที่ แต่ในช่วงความถี่ต่ำนั้น ฟลักซ์จะลดลง เนื่องจากตกรวมที่อิมพีแดนซ์ (impedance) ของสเตเตอร์บางส่วน ดังนั้นในช่วงนี้จึงต้องชดเชยด้วยการเพิ่มโวลต์เตจขึ้นเพื่อให้ได้แรงบิดที่สูงขึ้น



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-ความเร็ว เมื่อเปลี่ยนความถี่โดย V/F คงที่

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวมาแล้วนั้น จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจกับความถี่ที่เหมาะสมดังรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของโวลต์เตจ, แรงบิด และกระแสสเตเตอร์เมื่อเปลี่ยนความถี่ไป โดยจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ แรงบิดคงที่ เมื่อความถี่ต่ำกว่า 1 pu และกำลังงานคงที่ เมื่อความถี่สูงกว่า 1 pu รวมทั้งมีการชดเชย ผลของอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ต่ำด้วย



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจ-ความถี่ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

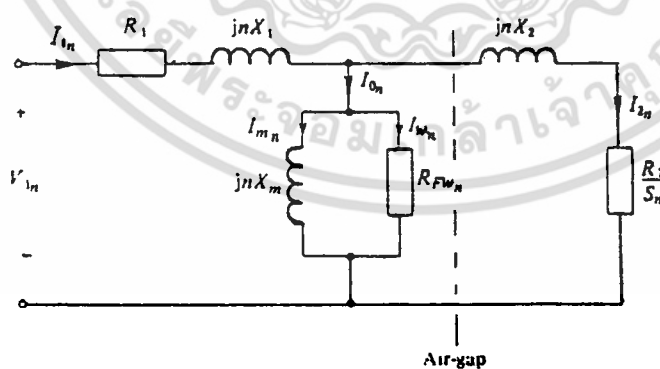
2.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อจ่ายโวลต์เตจที่ไม่ใช่รูปคลื่นไซน์

เนื่องจากแหล่งจ่ายพลังงานปกติที่ใช้กันอยู่ในชีวิตประจำวัน ไม่สามารถเปลี่ยนความถี่ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างแหล่งจ่ายพลังงานที่ปรับความถี่และโวลต์เตจได้ ซึ่งการสร้างแหล่งจ่ายพลังงานรูปคลื่นไซน์นั้นยุ่งยาก และมีประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้น วิธีที่ใช้กันทั่วไปคือการหารูปคลื่นที่ให้ผลใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ที่สุดมาใช้แทน และเนื่องจากรูปคลื่นที่นำมาใช้ไม่ใช่ไซน์ จึงมีฮาร์โมนิค (harmonics) อื่นๆ ประกอบรวมเข้ามาด้วย ในการวิเคราะห์ผลกระทบต่างๆที่จะเกิดขึ้นกับมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น ทำได้โดยแยกวิเคราะห์เป็นผลอันเกิดจากความถี่พื้นฐาน (fundamental frequency) และฮาร์โมนิคต่างๆแยกกัน แล้วนำผลกระทบจากแต่ละฮาร์โมนิคมารวมกัน ก็จะได้ผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้งหมด

2.4.1 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในการพิจารณาวงจรสมมูลย์เมื่อ โวลต์เตจ ไม่ใช่รูปคลื่นไซน์ ไม่แตกต่างจากวงจรสมมูลย์ในหัวข้อที่แล้วมากนัก จะเพิ่มเติมก็เพียงข้อกำหนดของวงจรสมมูลย์ของฮาร์โมนิคที่ n ดังนี้

- ค่ารีแอคแตนซ์ (reactance) ทั้งหมด จะเป็น n เท่าของค่าที่ได้จากความถี่พื้นฐาน
- ค่าสลิป S จะเป็นฮาร์โมนิคสลิป S_n
- ในการคำนวณความต้านทานด้านสเตเตอร์, โรเตอร์ และรีแอคแตนซ์ของโรเตอร์ที่ฮาร์โมนิคที่มีความถี่สูง ต้องคำนึงถึงผลของสกินเอฟเฟค (skin effect) ด้วย



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลย์เมื่อพิจารณาฮาร์โมนิคอันดับที่ n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อกำหนดต่างๆ จะได้ว่าวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.9 ซึ่งหาค่าฮาร์โมนิกสลิปได้จาก

$$S_n = (nN_1 \bar{F} N) / (nN_1) \quad (2.20)$$

โดยที่ เครื่องหมายลบใช้กับสลิปของฮาร์โมนิกที่ให้ mmf หมุนทิศทางเดียวกับที่มอเตอร์ หมุน ซึ่งได้แก่ $n = 3h + 1$ เช่น 1, 7, 13, ... และเครื่องหมายบวกเมื่อเป็นสลิปของฮาร์โมนิกที่ให้ mmf หมุนทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ได้แก่ $n = 3h + 2$ เช่น 5, 11, 17, ...

2.4.2 ผลกระทบของฮาร์โมนิกที่ต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยรูปคลื่นที่ไม่เป็นสายัณห์ จะมีฮาร์โมนิกรวมอยู่ด้วย ซึ่งฮาร์โมนิกเหล่านี้ จะทำให้เกิดผลกระทบที่เป็นผลเสีย 2 ข้อ ได้แก่

ก. เกิดความร้อน(heating)เพิ่มขึ้น เนื่องจากความสูญเสียในขดลวดที่สเตเตอร์(stator copper losses) และที่โรเตอร์(rotor copper losses) ซึ่งกรณีมอเตอร์ 3 เฟส หาได้จาก

$$P_{1s} = 3(I_1^2 + I_n^2)R_1 \quad (2.21)$$

$$P_{1r} = 3(I_1^2 + I_n^2)R_2 \quad (2.22)$$

ข. เกิดแรงบิดไม่สม่ำเสมอ(torque pulsation) ในขณะที่หมุนที่ความเร็วต่ำๆ และแรงเฉื่อยทางกล(mechanical inertia)น้อย ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำของฟลักซ์ กับ mmf ที่โรเตอร์ของฮาร์โมนิกที่ต่างกัน

2.5 สรุป

ในบทนี้ต้องการอธิบายถึงคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยกล่าวถึงความสัมพันธ์ของแรงบิด-ความเร็วเมื่อเปลี่ยนโวลต์เตจหรือความถี่ เพื่อเป็นประโยชน์ในการเลือกวิธีการควบคุม รวมทั้งอธิบาย

บายถึงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยมุ่งเน้นกรณีที่จ่ายโวลต์เตจรูปคลื่นไซน์ เนื่องจากกรณีที่
ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ สามารถวิเคราะห์ผลกระทบได้โดยแยกเป็นผลอันเกิดจากแต่ละฮาร์โมนิก แล้วจึงนำ
มารวมกัน และสุดท้ายกล่าวถึงผลเสียอันจะเกิดขึ้นเมื่อมีฮาร์โมนิกรวมอยู่ด้วย



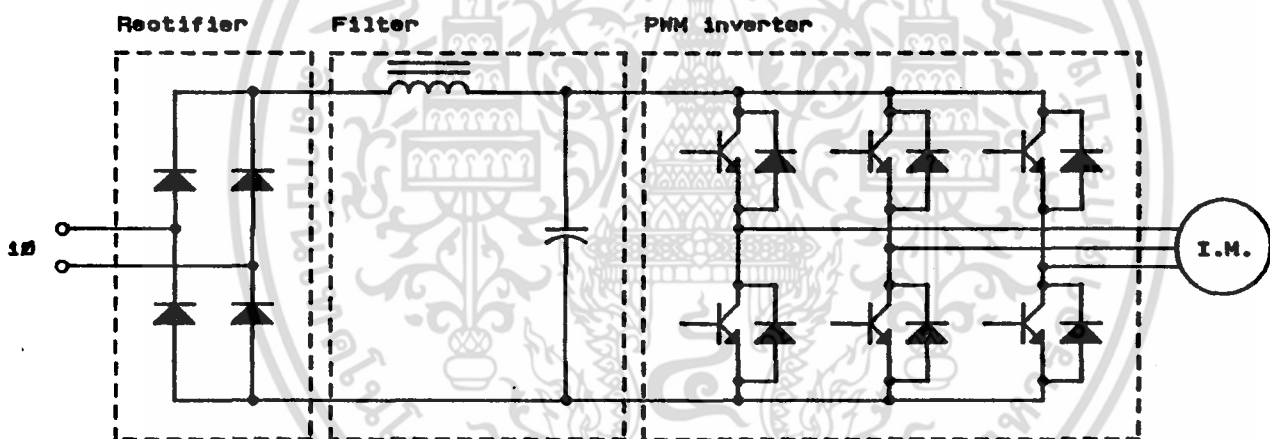
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

คุณลักษณะของรูปคลื่น PWM

3.1 บทนำ

การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ ต้องการแหล่งจ่ายพลังงานที่ปรับความถี่ได้ และเพื่อจะรักษาแรงบิดสูงสุดให้คงที่ด้วย จึงจำเป็นต้องปรับโวลต์เตจได้ โดยมีสัดส่วนระหว่างโวลต์เตจและความถี่คงที่ ซึ่งวิธีออกแบบแหล่งจ่ายพลังงานนี้มีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้มากที่สุด คือวิธีขับขลิวเอ็ม-อินเวอร์เตอร์ (PWM Inverter) ดังแสดงวงจรแหล่งจ่ายพลังงานในรูปที่ 3.1 เนื่องจาก สามารถควบคุมขนาดโวลต์เตจหรือความถี่ เพื่อจ่ายให้แก่มอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ส่วนอินเวอร์เตอร์ได้เลย โดยไม่จำเป็นต้องควบคุมที่ส่วนเรกติไฟร์ (rectifier)



รูปที่ 3.1 แสดงวงจรส่วนจ่ายพลังงานให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

จากวงจรในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่

- ส่วนเรกติไฟร์ ใช้ไดโอด 4 ตัว ต่อแบบบริดจ์ มีหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับ จากแหล่งจ่ายพลังงานแบบเฟสเดียว (single phase) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง
- ส่วนกรองความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) ทำให้ไฟฟ้ากระแสตรง จากวงจรเรกติไฟร์เรียบขึ้น

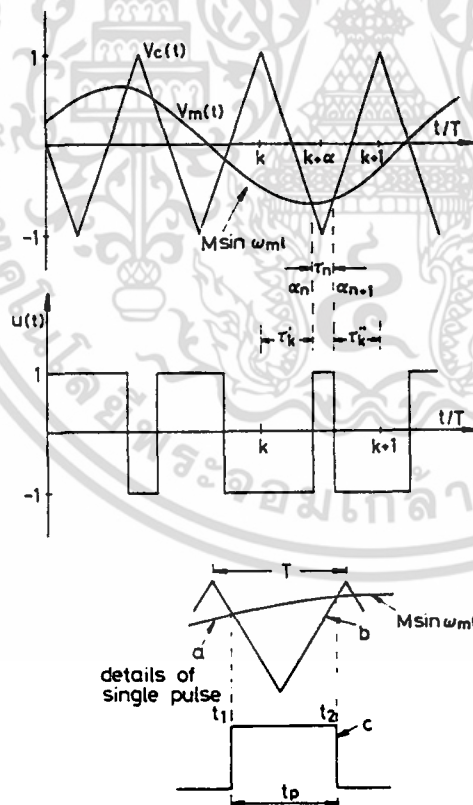
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วน PWM อินเวอร์เตอร์ ประกอบด้วย ทราซิสเตอร์กำลัง (power transistor) 6 ตัวต่อกันแบบบริดจ์ ทำหน้าที่เสมือนสวิตช์สองทาง 3 ชุด เพื่อสร้างสัญญาณ PWM ในแต่ละเฟส จ่ายให้แก่มอเตอร์เหนี่ยวนำ

การสร้างรูปคลื่น PWM ให้แก่ส่วนอินเวอร์เตอร์นั้น มีหลายวิธี ซึ่งจะมีวิธีการสร้างรูปคลื่น และผลของฮาร์โมนิกที่แตกต่างกัน ในบทนี้ จึงเลือกพิจารณาารูปคลื่นแบบต่างๆ ที่มีวิธีสร้างรูปคลื่นใกล้เคียงกัน เพื่อเลือกวิธีที่เหมาะสม นำมาใช้ในการออกแบบวงจรต่อไป นอกจากนี้ ยังปรับปรุงรูปคลื่นด้วยการเพิ่มฮาร์โมนิกที่ 3 เพื่อให้ได้โวลต์เดจระหว่างไลน์สูงขึ้นด้วย

3.2 วิธีการสร้างรูปคลื่น PWM [8, 9]

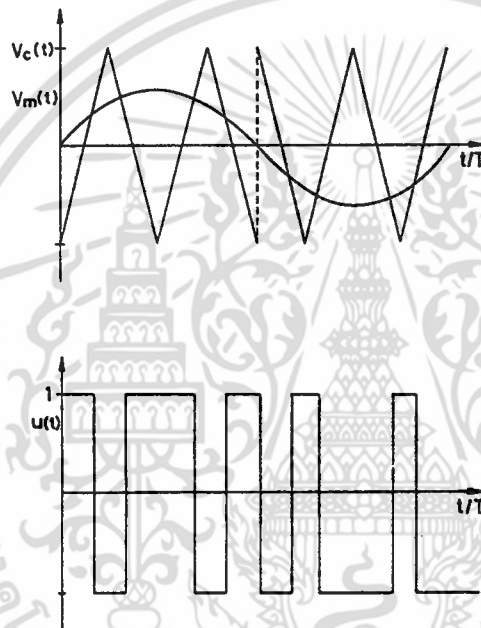
ในการสร้างรูปคลื่น PWM เพื่อใช้ขับมอเตอร์เหนี่ยวนำมีหลายวิธี ซึ่งในเอกสารอ้างอิง [9] ได้เปรียบเทียบรูปคลื่น PWM ที่ได้จากการมอดูเลต (modulate) ด้วยวิธีต่างๆ 6 ชนิด ได้แก่



รูปที่ 3.2 การสร้างรูปคลื่น PWM ด้วยวิธีเนซอรัลแรมปลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วิธีเนเชอรัลแซมปลิง (natural sampling) มีวิธีสร้างรูปคลื่น PWM ดังรูปที่ 3.2 เหมาะสำหรับการออกแบบโดยใช้วงจรรวม เนื่องจากเป็นวิธีดั้งเดิมจึงนิยมให้เป็นรูปคลื่นเปรียบเทียบกับรูปคลื่นที่สร้างโดยวิธีอื่น วิธีนี้จะเกิดฮาร์โมนิคย่อย (sub-harmonic) ขึ้น หากสัดส่วนของความถี่ระหว่างรูปคลื่นสามเหลี่ยม และรูปคลื่นที่นำมาถอดเลข ไม่เป็นจำนวนเต็มคี่ที่เป็นจำนวนเท่าของสาม ในบางครั้งจึงเรียกว่า "วิธีสับฮาร์โมนิคแซมปลิง (subharmonic sampling)"



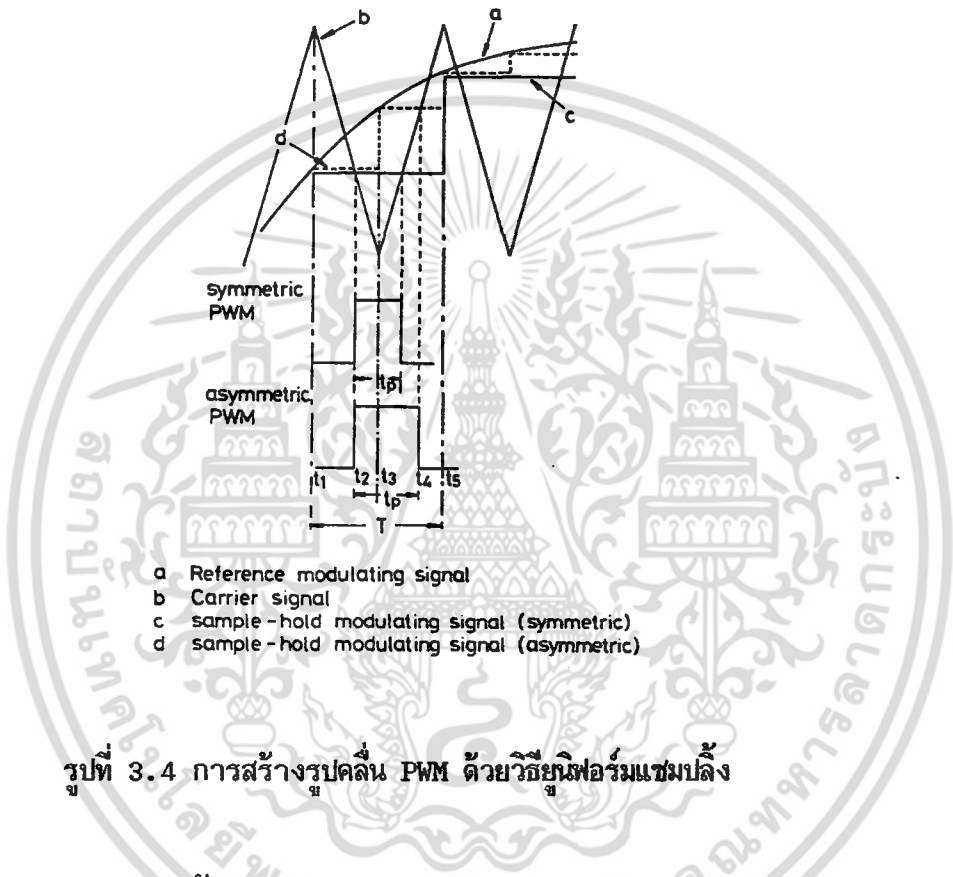
รูปที่ 3.3 การสร้างรูปคลื่น PWM ด้วยวิธี โมดิฟายสับฮาร์โมนิคแซมปลิง

- วิธีโมดิฟายด์สับฮาร์โมนิคแซมปลิง(modified subharmonic sampling) วิธีนี้สร้างรูปคลื่น PWM ด้วยวิธีเดียวกับวิธีเนเชอรัลแซมปลิง แต่จะปรับปรุง โดยให้ส่วนสี่ของความถี่ระหว่างรูปคลื่นสามเหลี่ยมและรูปคลื่นที่นำมาถอดเลขเป็นจำนวนเต็ม โดยครึ่งคาบของรูปคลื่นจะสมมาตรกัน เพื่อลดการเกิดฮาร์โมนิคย่อย ดังแสดงวิธีสร้างรูปคลื่น PWM ในรูปที่ 3.3

- วิธียูนิฟอร์มแซมปลิงแบบสมมาตร (symmetric uniform sampling) ดังแสดงวิธีสร้างรูปคลื่น PWM ในรูปที่ 3.4 เป็นวิธีที่สามารถสร้างด้วยวงจรดิจิทัลได้ เนื่องจากรู้ตำแหน่งของ

การสุ่มค่าของรูปคลื่นที่นำมามอดูเลตแน่นอน วิธีนี้จะ ได้รูปคลื่นพัลส์ (pulse) ในแต่ละช่วงสมมาตรกัน และสามารถหาค่าความกว้างของพัลส์ได้จาก

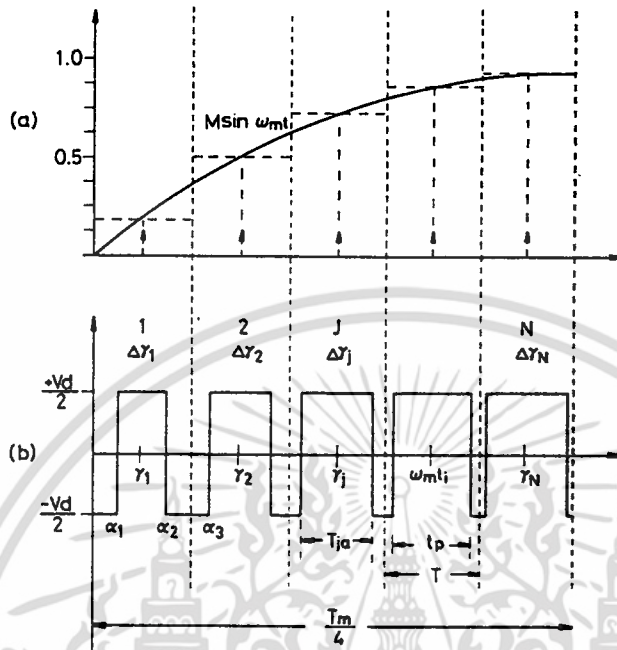
$$t_p = T/2 \{ 1 + M \cdot \sin(\omega_m t_1) \} \quad (3.1)$$



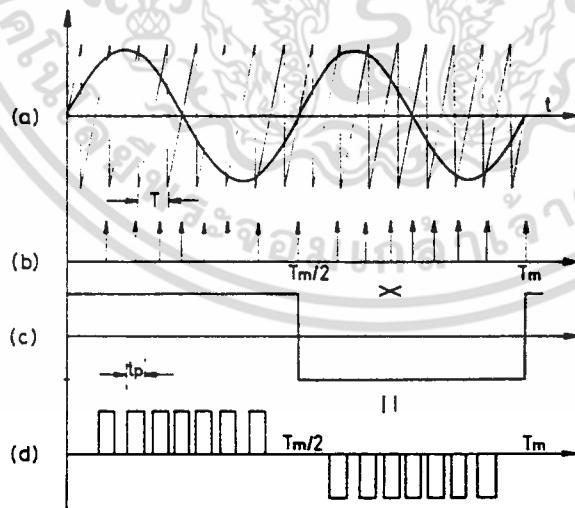
รูปที่ 3.4 การสร้างรูปคลื่น PWM ด้วยวิธีซุ่มค่าแบบไม่สมมาตร

- วิธีซุ่มค่าแบบไม่สมมาตร (asymmetric uniform sampling) ดังรูปที่ 3.4 มีวิธีสร้างรูปคลื่น PWM เช่นเดียวกับวิธีซุ่มค่าแบบสมมาตร แต่ตำแหน่งการสุ่มค่าของรูปคลื่นที่นำมามอดูเลต จะเป็น 2 เท่า ทำให้ รูปคลื่น PWM ไกล่เคียงกับวิธีเนเชอรัลซุ่มค่ามากขึ้น สามารถหาค่าความกว้างของพัลส์ได้จาก

$$t_p = T/2 [1 + (M/2) \cdot \{ \sin(\omega_m t_1) + \sin(\omega_m t_3) \}] \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.5 การสร้างรูปคลื่น PWM ด้วยวิธีตั้งตอลข่ายน์



รูปที่ 3.6 การสร้างรูปคลื่น PWM ด้วยวิธีมอดเลตตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วิธีดิจิทัลซายน์ (digital sinusoidal PWM) ดังรูปที่ 3.5 วิธีนี้เหมาะสำหรับการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ (vector control) เนื่องจากสามารถใช้ไมโครโปรเซสเซอร์คำนวณความกว้างของพัลส์ได้จาก

$$t_p = T/2 \{ 1 + M \cdot \sin(\omega_m t_1) \} \quad ; \text{ สวิตชิง 2 ระดับ (half bridge) } \quad (3.3)$$

$$t_p = T \cdot M \cdot \sin(\omega_m t_1) \quad ; \text{ สวิตชิง 3 ระดับ (full bridge) } \quad (3.4)$$

- วิธีมอดูเลตตำแหน่ง (pulse position modulation หรือ PPM) ดังรูปที่ 3.6 วิธีนี้ตำแหน่งของพัลส์จะเปลี่ยนแปลง ตามรูปคลื่นที่นำมามอดูเลต โดยความกว้างของพัลส์จะกำหนดได้จาก

$$t_p = T/2 (1 + M) \quad ; \text{ สวิตชิง 2 ระดับ (half bridge) } \quad (3.5)$$

$$t_p = T \cdot M \quad ; \text{ สวิตชิง 3 ระดับ (full bridge) } \quad (3.6)$$

3.3 การเปรียบเทียบฮาร์โมนิกของรูปคลื่นแบบต่างๆ

ในการหาฮาร์โมนิกของรูปคลื่น ที่ได้จากการมอดูเลตดังกล่าวแล้วนั้น มีหลายวิธี สำหรับวิธีที่นำมาใช้ในบทนี้ จะแทนความสัมพันธ์ของรูปคลื่น ด้วยวิธี piecewise linear waveforms แล้วนำมาวิเคราะห์อนุกรมฟูเรียร์ (fourier series) จะได้

$$F(\omega t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cdot \cos(n\omega t) + B_n \cdot \sin(n\omega t)] \quad (3.7)$$

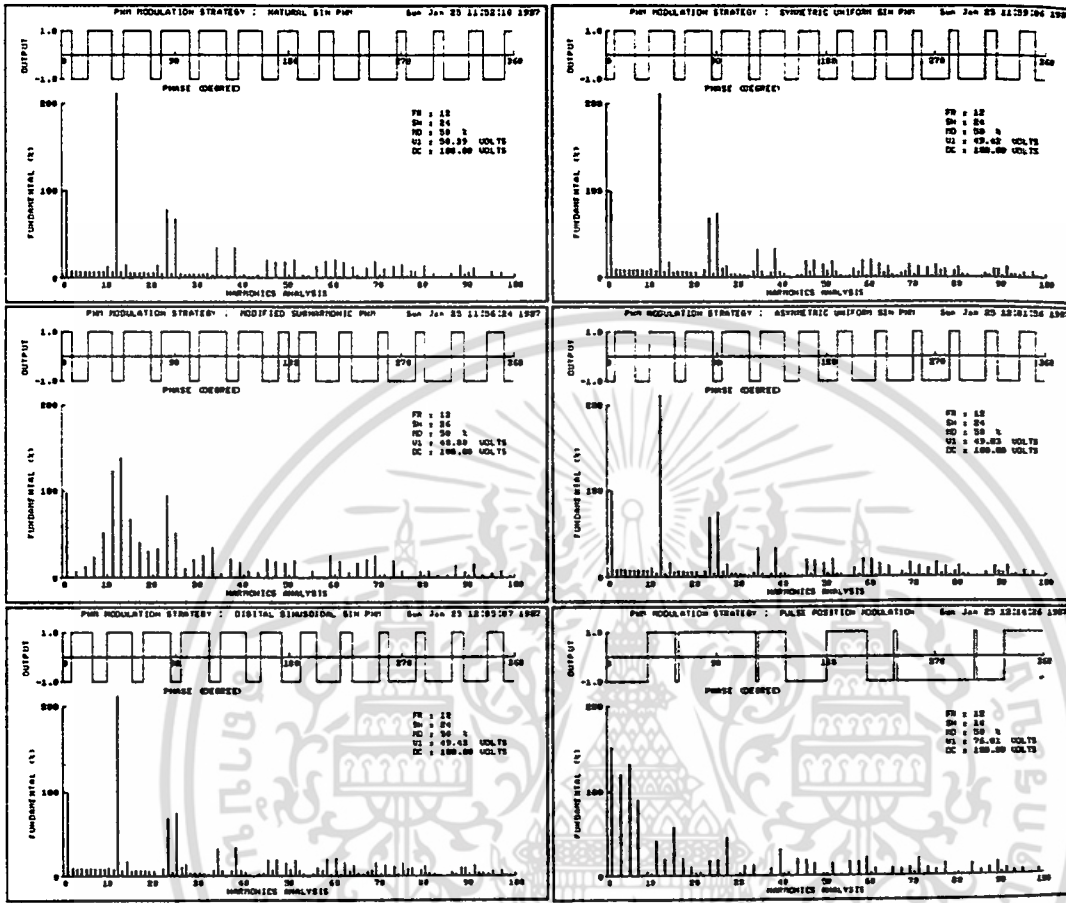
$$\text{โดยที่} \quad A_0 = (1/2\pi) \cdot \sum_{k=1}^M [(1/2) \cdot (X_{k+1} - X_k) \cdot (Y_k + Z_{k+1})] \quad (3.8)$$

$$A_n = (1/n\pi) \cdot \sum_{k=1}^M [Z_{k+1} \sin(nX_{k+1}) - Y_k \sin(nX_k) + (\rho_k/n) \cdot \{\cos(nX_{k+1}) - \cos(nX_k)\}] \quad (3.9)$$

$$B_n = (1/n\pi) \cdot \sum_{k=1}^M [-Z_{k+1} \cos(nX_{k+1}) + Y_k \cos(nX_k) + (\rho_k/n) \cdot \{\sin(nX_{k+1}) - \sin(nX_k)\}] \quad (3.10)$$

$$\rho_k = (Z_{k+1} - Y_k) / (X_{k+1} - X_k) \quad (3.11)$$

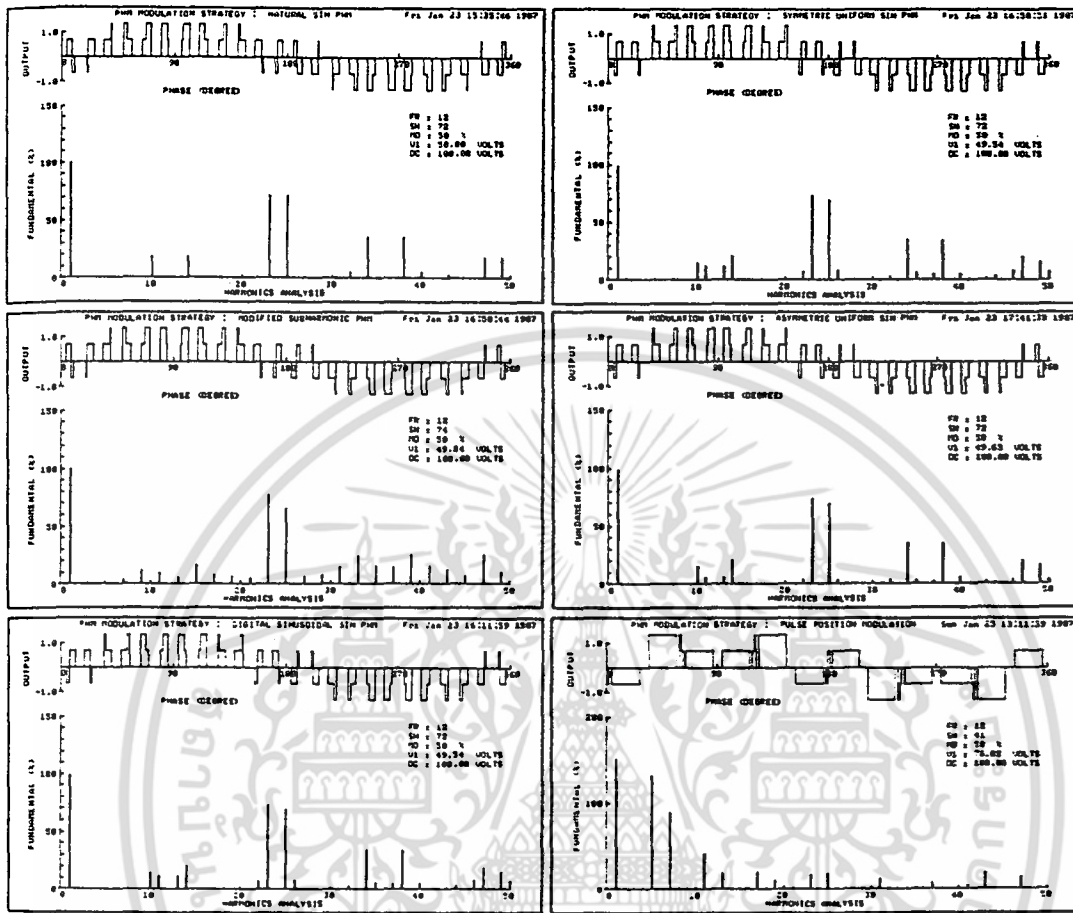
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ฮาร์โมนิคของรูปคลื่นแบบเฟสเดียว เมื่อ MD = 50% และ FR = 12

จากสมการ (3.8)-(3.10) จะได้ฮาร์โมนิคของรูปคลื่นแบบต่างๆ เมื่อสัดส่วนของ โวลต์เตจ(modulation depth หรือ MD) = 50% สัดส่วนของความถี่ (frequency ratio หรือ FR)= 12 กรณีรูปคลื่นเฟสเดี่ยวดังรูปที่ 3.7 และรูปคลื่นสามเฟสดังรูปที่ 3.8 ซึ่งจะเห็นว่า วิธีซิมพอร์ม แชนป์ลิงทั้งสองแบบ และวิธีดีจิตอลซายน์ จะลดฮาร์โมนิคอันดับที่ต่ำกว่า FR ลงได้ เช่นเดียวกับวิธีเเน เซอร์วัลแชนป์ลิง ส่วนวิธี โมติฟายด์สับฮาร์โมนิคแชนป์ลิง และวิธีมอดูเลทตำแหน่ง แม้จะขจัดฮาร์โมนิคคู่ได้ แต่ก็ยังมีฮาร์โมนิคอันดับต่ำเกิดขึ้น

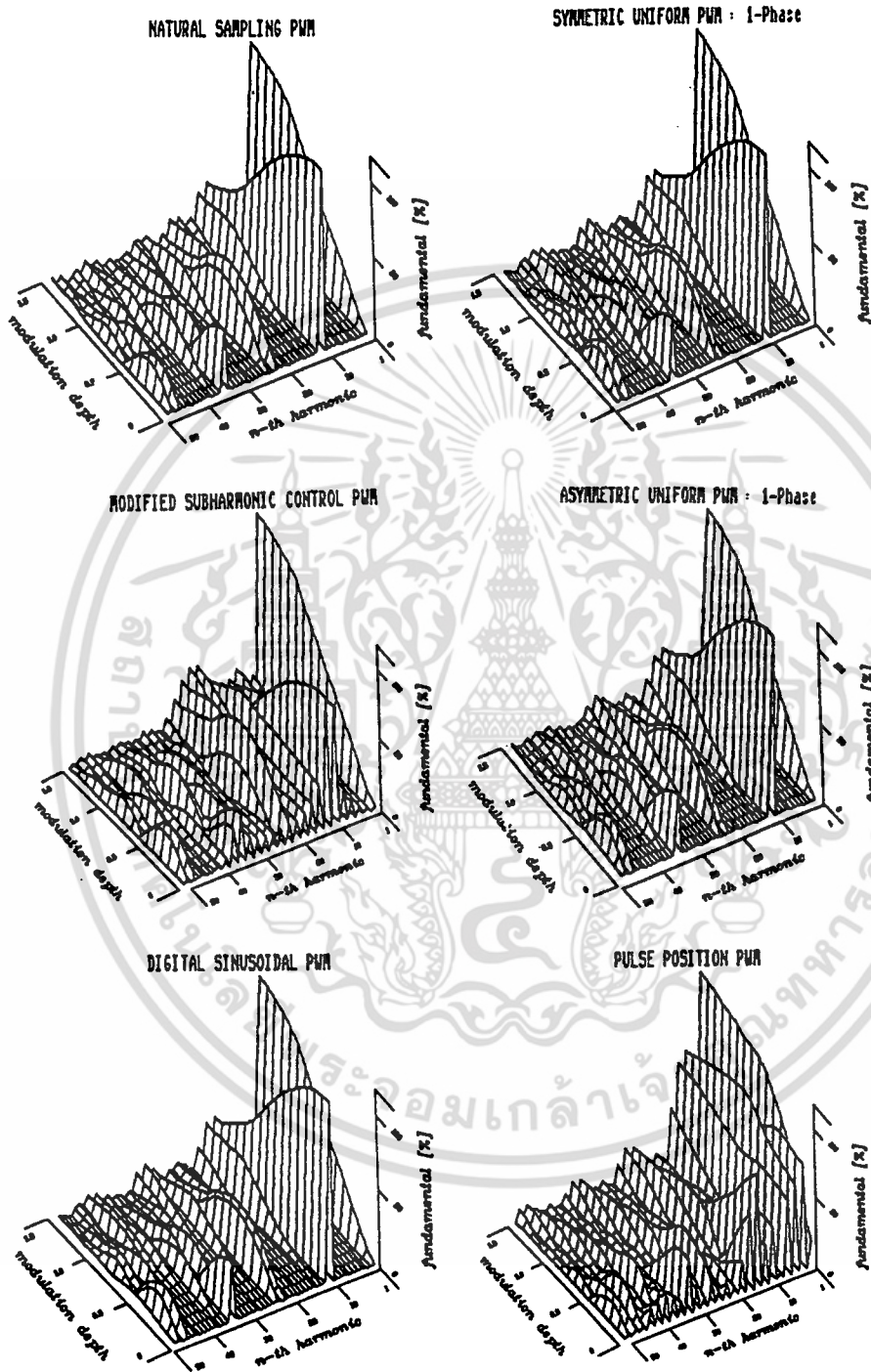
หากพิจารณาฮาร์โมนิค เมื่อเปลี่ยนแปลง MD จาก 0-150% โดยเพิ่มขึ้นครึ่งละ 10%



รูปที่ 3.8 ฮาร์โมนิคของรูปคลื่นแบบสามเฟส เมื่อ MD = 50% และ FR = 12

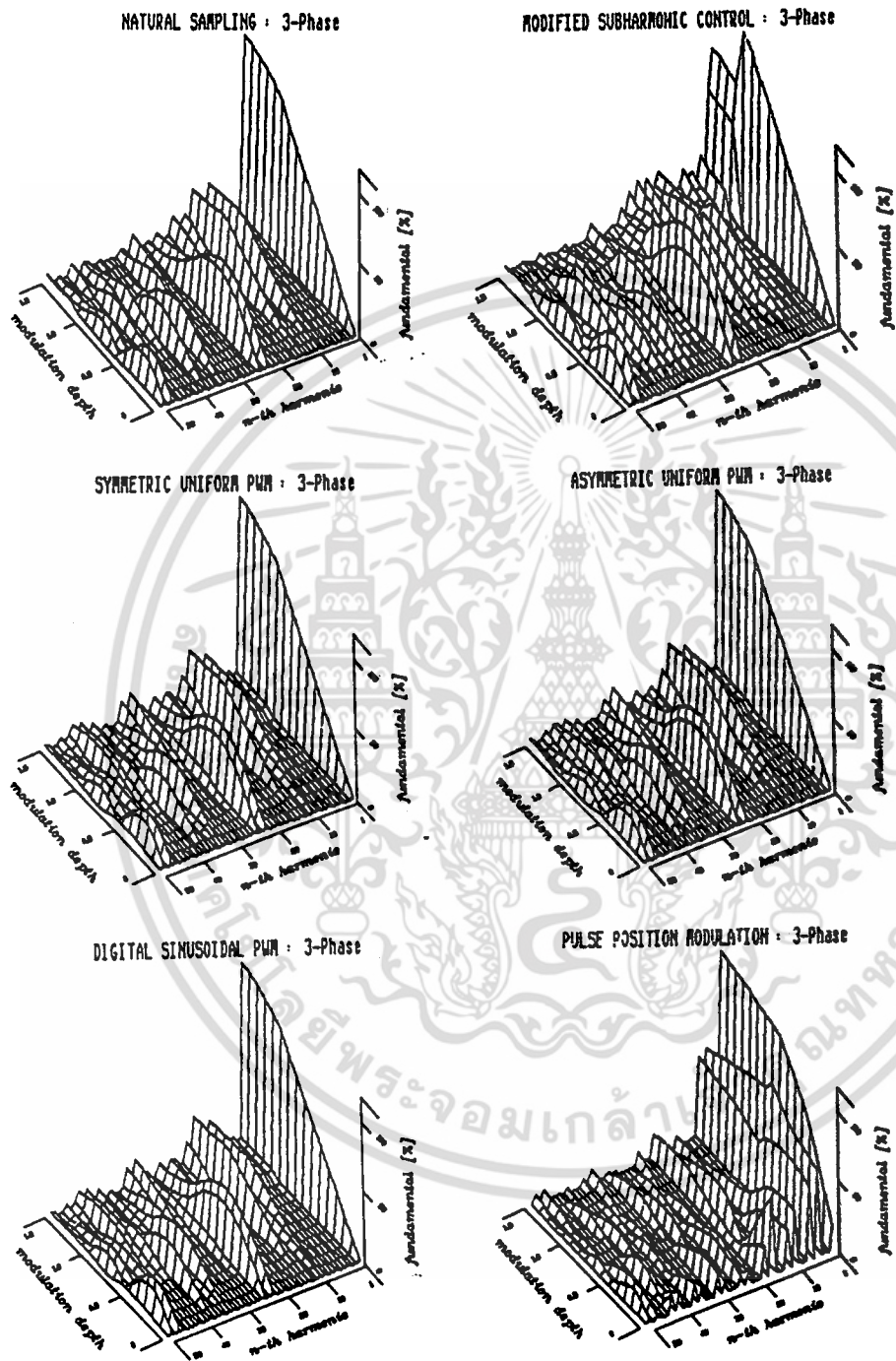
และให้ FR = 12 คงที่ ในการวิเคราะห์รูปคลื่นเฟสเดี่ยว และสามเฟส จะได้ผลดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ จะเห็นว่า วิธีโมดิฟายด์สี่ฮาร์โมนิค จะเกิดฮาร์โมนิคอันดับต่ำขึ้นเมื่อ MD มากกว่า 100% และวิธีมอดูเลทตำแหน่ง จะมีฮาร์โมนิคอันดับต่ำเกิดขึ้นทุกค่าของ MD

ส่วนรูปที่ 3.11 และ 3.12 นั้น แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงฮาร์โมนิคของรูปคลื่นแบบต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลง FR จาก 6-24 โดยเพิ่มขึ้นครึ่งละสอง และให้ MD = 50% คงที่ จะเห็นว่าฮาร์โมนิคที่ความถี่ต่ำ ถูกเลื่อนไปเป็นความถี่ที่สูงขึ้น เมื่อ FR เพิ่มขึ้น



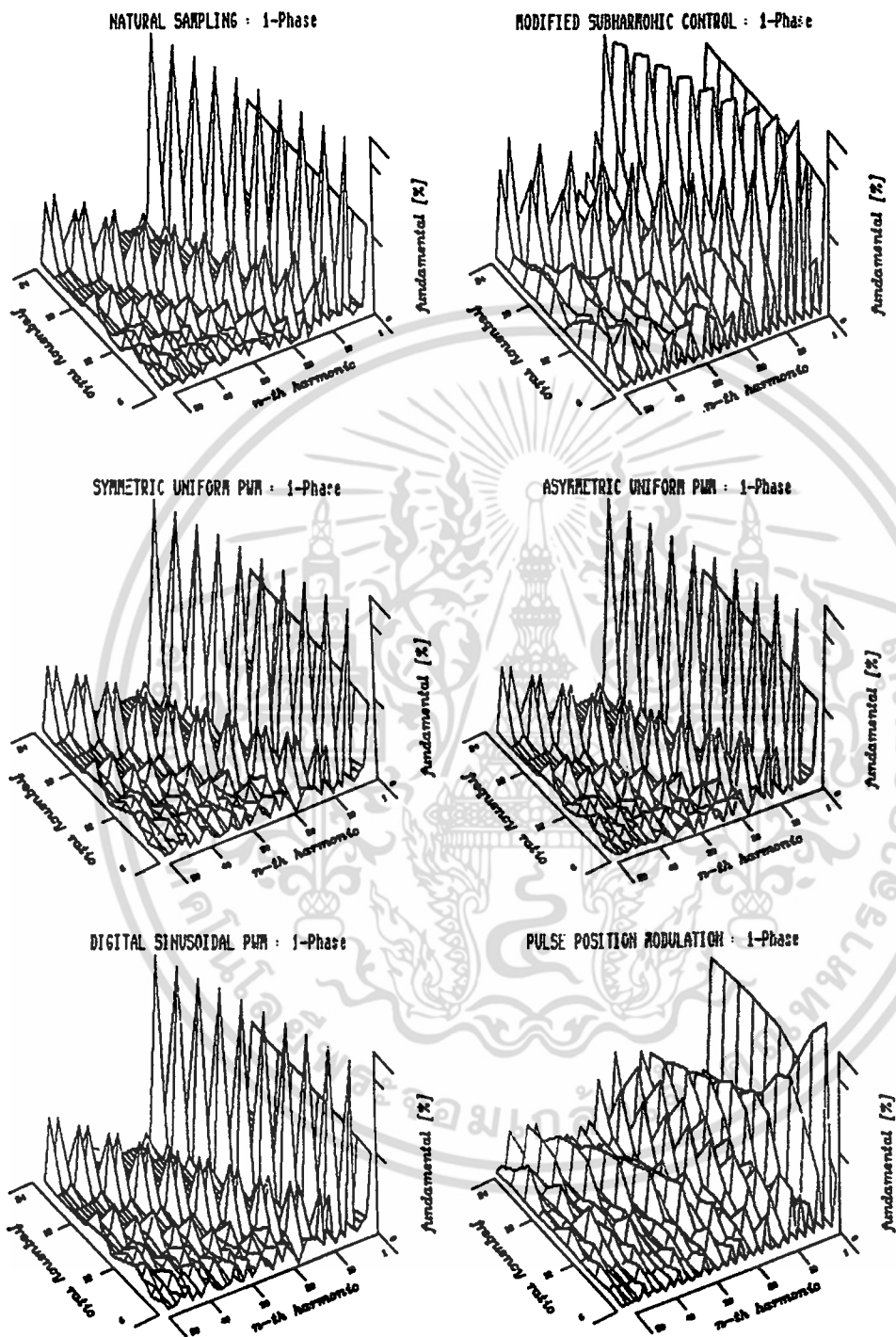
รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงฮาร์โมนิกของรูปคลื่นแบบเฟสเดียว เมื่อ MD = 0 ถึง 150% และ FR = 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



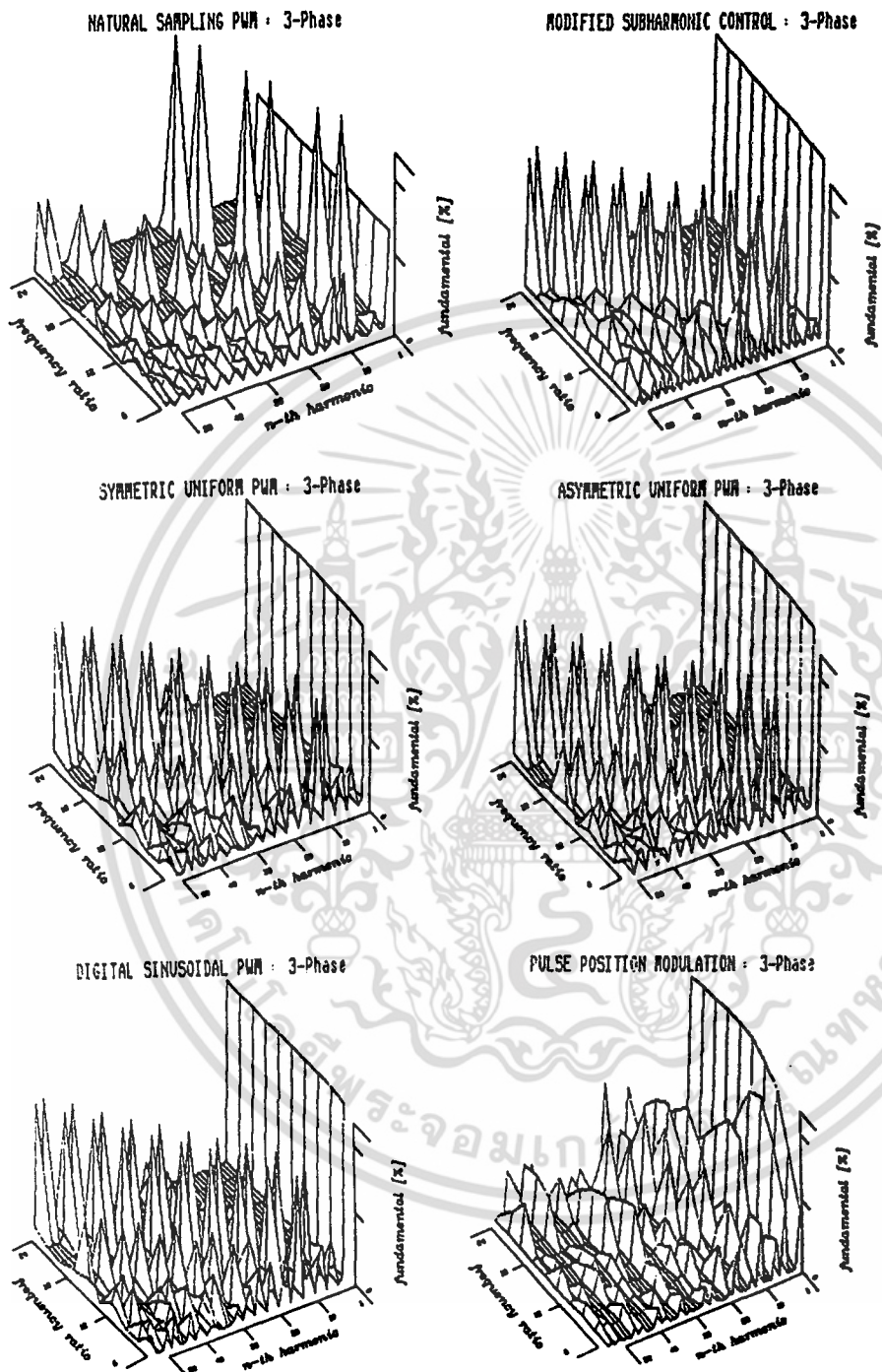
รูปที่ 3.10 การเปลี่ยนแปลงฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแบบสามเฟส เมื่อ MD = 0 ถึง 150% และ FR = 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 การเปลี่ยนแปลงฮาร์โมนิกของรูปคลื่นแบบเฟสเดียว เมื่อ MD = 50% และ FR = 6 ถึง 24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 การเปลี่ยนแปลงฮาร์โมนิกของรูปคลื่นแบบสามเฟส เมื่อ MD = 50% และ FR = 6 ถึง 24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การปรับปรุงรูปแบบสัญญาณ PWM [6]

จากวงจรในรูปที่ 3.1 เนื่องจากระดับของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) เทียบเท่ากับค่าสูงสุดของโวลต์เตจอินพุท ดังนั้น

$$V_{dc} = \sqrt{2} V_{in} \quad (3.12)$$

แต่รูปคลื่นจากอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็น

$$V_{out(\text{phase})} = (V_{dc}/2) \cdot (1/\sqrt{2}) = (V_{in}/2) \quad (3.13)$$

ซึ่งจะทำให้ได้โวลต์เตจระหว่างไลน์ต่อมอเตอร์เป็น

$$V_{out} = (V_{in} \cdot \sqrt{3})/2 = 0.866 V_{in} \quad (3.14)$$

จะเห็นว่า รูปคลื่นที่ได้จากการมอดูเลชันขนาดลดลงจากโวลต์เตจอินพุท วิธีการหนึ่งที่จะเพิ่มขนาด V_{out} ทำได้โดยเพิ่มฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 เข้าไป ซึ่งโดยทั่วไปจะไม่มีผลต่อโวลต์เตจระหว่างไลน์เมื่อจ่ายไฟสามเฟส การคำนวณหาขนาดของฮาร์โมนิกที่ 3 ที่เหมาะสมทำได้โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของรูปคลื่น

$$y = \sin(\omega t) + a \cdot \sin(3\omega t) \quad (3.15)$$

เมื่อนำมาดิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับ ωt เพื่อหาค่า ωt ที่ทำให้ค่า y สูงหรือต่ำที่สุด จะได้

$$\cos(\omega t) = 0 \quad (3.16)$$

และ
$$\cos(\omega t) = \sqrt{[(9a-1)/12a]} \quad (3.17)$$

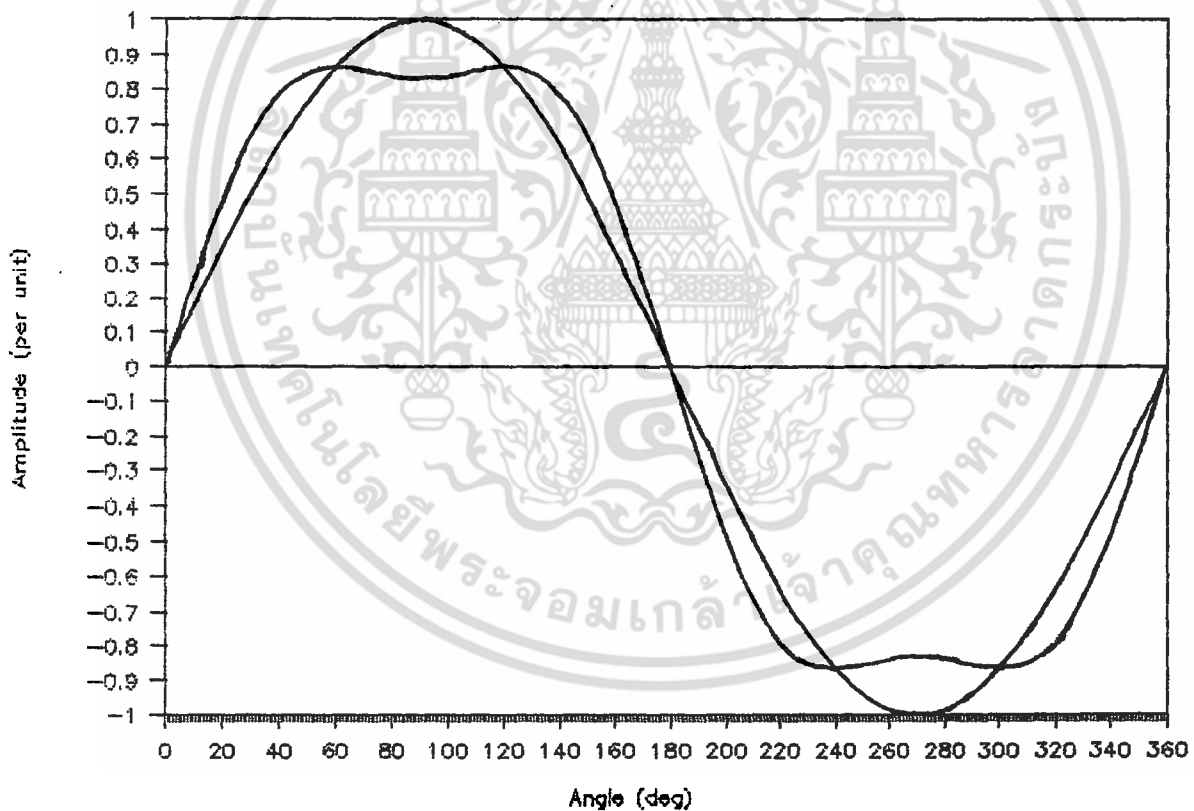
หลังจากนี้หาค่าที่ได้จากสมการที่ (3.17) มาหาค่า $\sin(\omega t)$ จะได้

$$\sin(\omega t) = \sqrt{[(3a-1)/12a]} \quad (3.18)$$

จาก $\sin(3\omega t) = 3.\sin(\omega t) - 4.\sin(3\omega t)$ (3.19)

นำสมการที่ (3.18) และ (3.19) แทนลงในสมการที่ (3.15) แล้วดิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับ a จะได้ค่า a ที่ทำให้ค่า y ต่ำที่สุดเป็น

$$a = 1/6 \quad (3.20)$$



รูปที่ 3.13 รูปคลื่นไซน์ปกติ เปรียบเทียบกับรูปคลื่นไซน์ที่เพิ่มฮาร์โมนิกที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น จะ ได้ความสัมพันธ์จากสมการที่ 3.15 เป็น

$$y = \sin(\omega t) + (1/6)\sin(3\omega t) \quad (3.21)$$

เมื่อนำมาเขียนรูปคลื่นจะ ได้ดังรูปที่ 3.13 ซึ่งมีขนาดลดลงจากรูปคลื่นไซน์ปกติ ทำให้เพิ่มขนาดขึ้นไปได้อีก $2/\sqrt{3}$ เท่าพอดี ก็จะเป็นผลให้

$$V_{out} = V_{in} \quad (3.22)$$

3.5 สรุป

ในบทนี้อธิบายถึงรูปคลื่น PWM ที่ได้จากการมอดูเลตแบบต่างๆ การเปลี่ยนแปลงฮาร์โมนิกของแต่ละวิธี เมื่อเปลี่ยนค่า MD หรือ FR ซึ่งพบว่า วิธีมอดูเลตแบบมอดูเลตทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตร และวิธีดิจิทัลซายน์ จะให้ผลใกล้เคียงกับวิธีเนชั่นแนลแอมพลิง รวมทั้ง การปรับปรุงรูปคลื่นให้มีขนาดสูงขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้ วิธีสร้างรูปคลื่น PWM ที่เหมาะสมต่อไป

บทที่ 4

ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

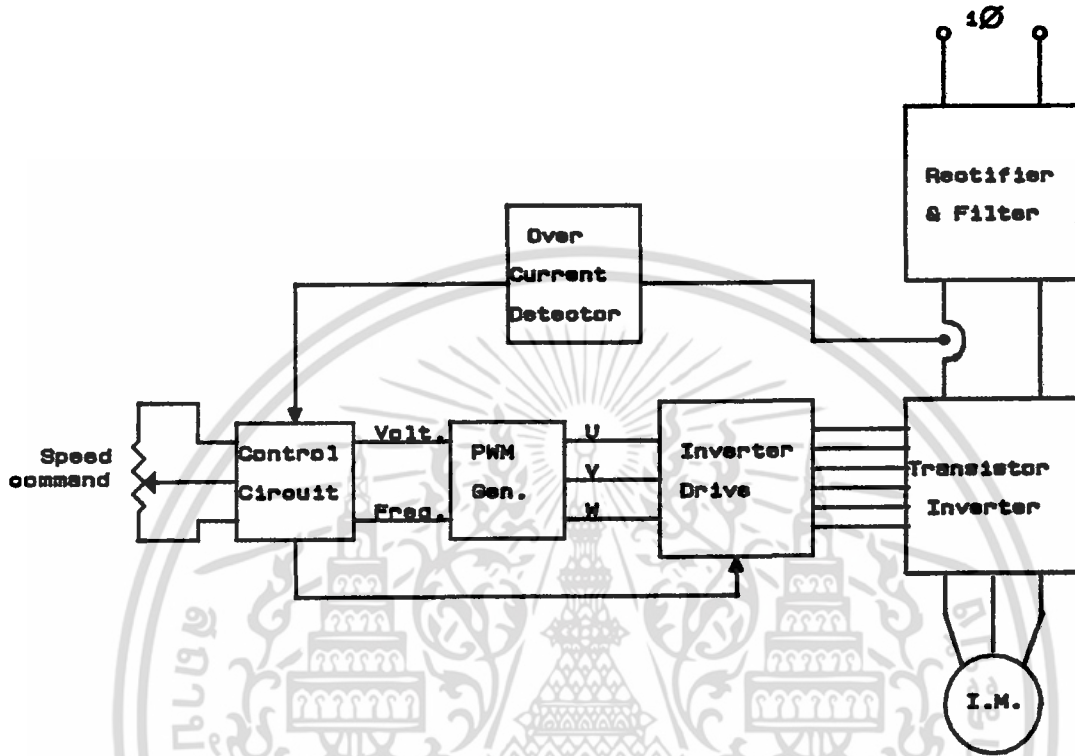
4.1 บทนำ

จากคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่สามารถควบคุมความเร็วได้ โดยการเปลี่ยนความถี่ และให้สัดส่วนของโวลต์ต่อความถี่คงที่ ในช่วงความถี่ต่ำกว่าพิกัด พบว่าความเร็วจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักหากแรงบิดที่โหลดเพิ่มขึ้น โดยต่ำกว่าแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ ประกอบกับลักษณะของรูปคลื่น PWM ชนิดยูนิฟอร์มแชนเปลิ่งแบบไม่สมมาตร ซึ่งมีขนาดแถบความถี่ (spectrum) ของฮาร์โมนิกที่ไม่แตกต่างจากวิธีเนเชอรัลแชนเปลิ่ง แต่เหมาะสมที่จะควบคุมด้วยวิธีทางดิจิทัล ในบทนี้จึงกล่าวถึงการนำไมโครโปรเซสเซอร์ เบอร์ 8031 มาใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ โดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ 2 ชุด ทำงานร่วมกัน ชุดแรกมีหน้าที่สร้างรูปคลื่น PWM ด้วยวิธี ยูนิฟอร์มแชนเปลิ่ง ตามค่าโวลต์ต่อความถี่ และความถี่ที่ได้รับมาจากชุดที่สองซึ่งเป็นชุดควบคุม ที่รับค่าความถี่ หิศทาง อัตราเร่ง และอัตราหน่วง นำมาเพื่อกำหนดค่าโวลต์ต่อความถี่ที่เหมาะสมให้ชุดแรก นอกจากนั้น จะกล่าวถึงหลักการการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม รวมทั้งรายละเอียดของวงจรต่างๆ ในตอนท้ายของบทนี้ ได้แสดงผลการทดลองขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาด 0.75 kW ซึ่งคัปเปลิ่ง (coupling) กับโหลด เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC generator) ที่จ่ายกระแสให้กับหลอดไฟ

4.2 ส่วนประกอบของชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์

ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.1 แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ส่วนวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (power electronics) ประกอบด้วย วงจรตัดกระแสและกรองความถี่ต่ำผ่าน (rectifier and filter) มีหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อจ่ายให้แก่วงจรทรานซิสเตอร์อินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีลักษณะเป็นเหมือนสวิตช์สองทาง 3 ชุด มีหน้าที่สร้างรูปคลื่น PWM 3 เฟส จ่ายให้แก่มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อไป อีกส่วนหนึ่งคือส่วนควบคุม ประกอบด้วย วงจรควบคุมโวลต์ต่อความถี่ ซึ่งจะส่งค่าโวลต์ต่อความถี่ที่เหมาะสมให้แก่วงจรสร้างสัญญาณ PWM เพื่อนำไปขับเบสของทรานซิสเตอร์กำลัง ในวงจรทรานซิส

เตอร์อินเวอร์เตอร์ และวงจรตรวจสอบกระแส ซึ่งมีหน้าที่ตรวจสอบไม่ให้กระแสเกินขีดจำกัดที่ถูกระก้าหนดไว้



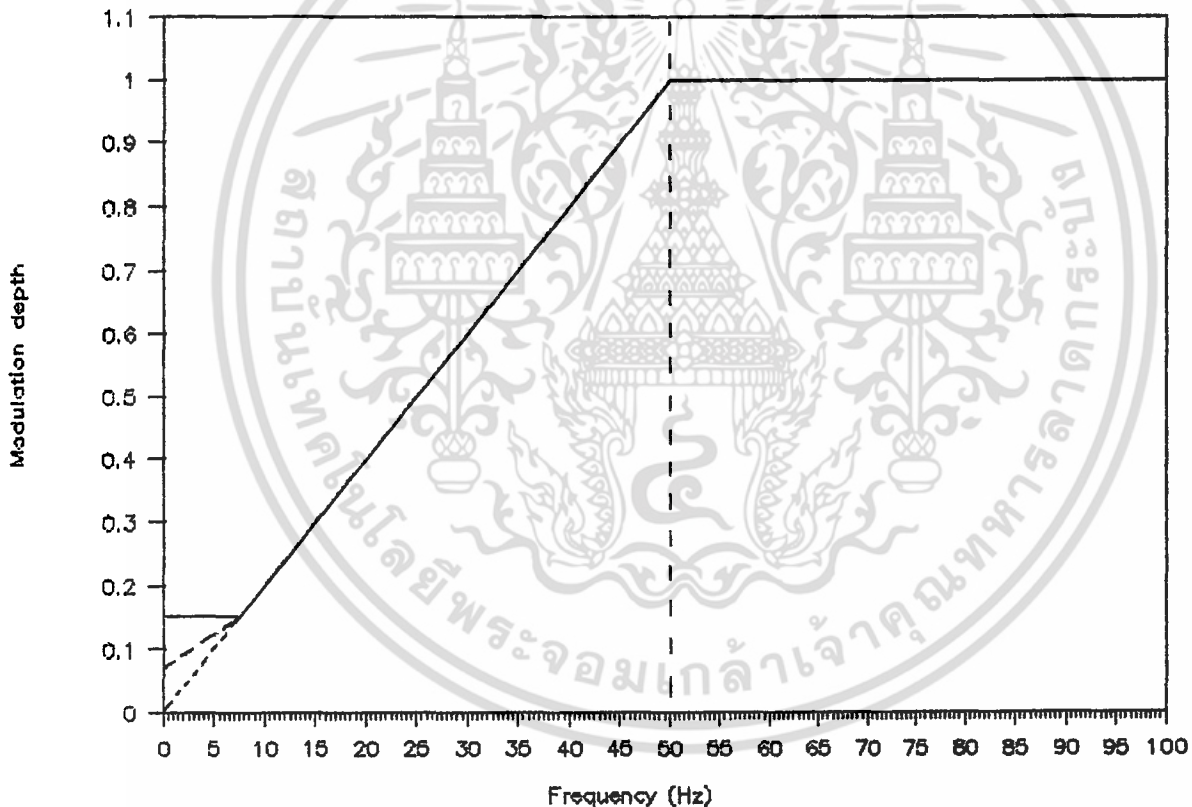
รูปที่ 4.1 บล็อกแสดงชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

4.3 การออกแบบวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์

การออกแบบวงจรควบคุมนี้ ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์เบอร์ 8031 เป็นหลัก โดยรูปแบบการควบคุมอื่นได้แก่ สัดส่วนของโวลท์เทียบกับความถี่ การเพิ่มโวลท์เตจในช่วงความถี่ต่ำ สัดส่วนความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยมกับรูปคลื่นที่นำมอดูเลท อัตราเร่ง หรืออัตราหน่วง ตลอดจนลักษณะของรูปคลื่นที่นำมอดูเลท ล้วนกระทำโดยใช้โปรแกรมทั้งสิ้น ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการควบคุม จึงกระทำได้โดยเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรแกรมเท่านั้น ซึ่งจะทำให้สามารถนำไปใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบใดก็ได้ สำหรับรายละเอียดในการออกแบบวงจรในแต่ละส่วนนั้น จะแยกอธิบายเป็นหัวข้อต่อไป

4.3.1 การออกแบบวงจรควบคุมโวลต์เตจและความถี่

เนื่องจากความสัมพันธ์ของ โวลต์เตจและความถี่ ควรจะมีสัดส่วนคงที่ในช่วงความถี่ต่ำกว่า พิกัด ซึ่งจะทำให้ฟลักซ์คงที่ เป็นผลให้แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์คงที่ และ โวลต์เตจคงที่ในช่วงที่ความถี่ เปลี่ยนแปลงมากกว่าพิกัด นอกจากนี้ควรจะต้องชดเชยผลของ โวลต์เตจที่ตกคร่อมบนความต้านทานของ ขดลวดสเตเตอร์ด้วย วงจรนี้ จึงถูกออกแบบให้ ความสัมพันธ์ระหว่าง โวลต์เตจและความถี่ เป็นดังรูปที่ 4.2 โดยที่โวลต์เตจคงที่ ในช่วงความถี่มากกว่า 50 Hz ส่วนที่ความถี่ต่ำกว่า 50 Hz จะให้สัดส่วน ของโวลต์เตจและความถี่คงที่ นอกจากนี้ ที่ความถี่ต่ำกว่า 7.5 Hz จะสามารถเปลี่ยนแปลงระดับ โวลต์เตจเพิ่มขึ้นได้ 16 ระดับ เพื่อชดเชยผลของ โวลต์เตจที่ตกคร่อมความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง โวลต์เตจ กับความถี่

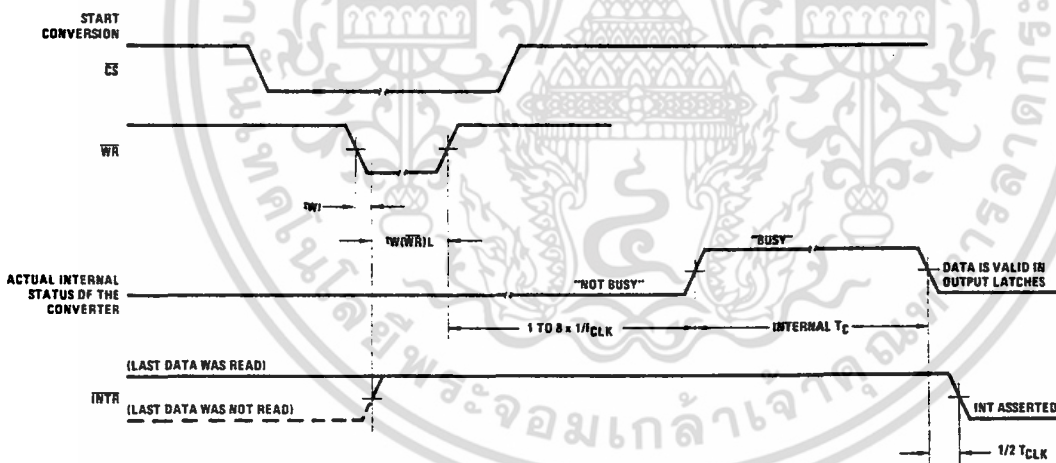
นอกจากการควบคุมความสัมพันธ์ระหว่าง โวลต์เตจกับความถี่แล้ว วงจรนี้ จะควบคุมอัตรา

แรงโดยเปลี่ยนความถี่ จาก 0.5 Hz ถึง 100 Hz และอัตราท่วงโดยเปลี่ยนความถี่ จาก 100 Hz ถึง 0.5 Hz ในช่วงเวลาที่กำหนดได้ ตั้งแต่ 0.2 ถึง 75 วินาที โดยค่าอัตราเร่ง อัตราท่วง และระดับโวลต์เตจที่เพิ่มขึ้นในช่วงความถี่ต่ำ จะถูกอ่านเมื่อความถี่เป็นศูนย์เท่านั้น เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงค่าในขณะที่มอเตอร์กำลังหมุน

วงจรควบคุม โวลต์เตจและความถี่ แสดงดังรูปที่ 4.3 ประกอบด้วย

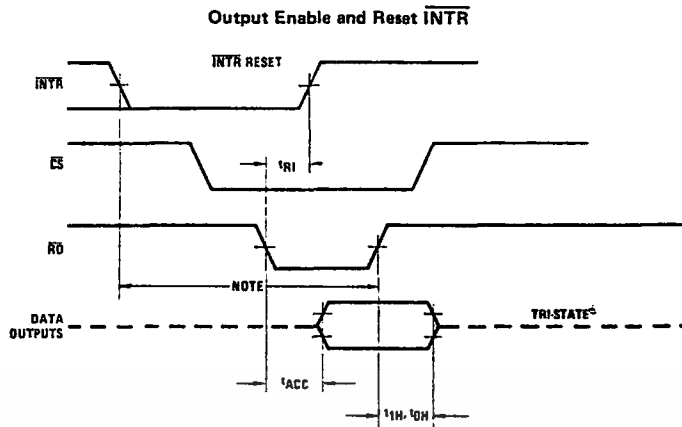
- อุปกรณ์รับค่าความถี่ที่ต้องการ ใช้ไอซีแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล เบอร์ ADC0805 มีความละเอียดขนาด 8 บิต ช่วงเวลาแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล 100 μ s ทำหน้าที่รับค่าความถี่ที่กำหนดด้วยความต้านทานปรับค่าได้ เป็นสัญญาณอนาลอก แล้วแปลงเป็นข้อมูลดิจิตอล ส่งให้แก่สข้อมูลของระบบ เพื่อให้ไมโครโปรเซสเซอร์นำไปประมวลผลต่อไป

กระบวนการในการแปลงสัญญาณ เริ่มขึ้น โดยที่ 8031 สั่งให้ ADC0805 เริ่มแปลงข้อมูลอนาลอกดังแผนภูมิเวลา (timing diagram) รูปที่ 4.4 แล้วรอสัญญาณอินเทอร์รัพท์ (interrupt) จาก ADC0805



รูปที่ 4.4 แผนภูมิเวลาการเริ่มแปลงข้อมูลอนาลอกเป็นดิจิตอล

หลังจาก ADC0805 ส่งสัญญาณอินเทอร์รัพท์มายัง 8031 แล้ว 8031 ก็จะตอบสนองการอินเทอร์รัพท์โดยกระโดดไปทำคำสั่งในโปรแกรมอินเทอร์รัพท์ (interrupt routine) ซึ่งจะอ่านข้อมูลจาก ADC0805 ดังแผนภูมิเวลา รูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภูมิเวลา การอ่านข้อมูลดิจิทัลจาก ADC0809

ข้อมูลดิจิทัลที่อ่านได้จาก ADC0805 นี้ จะเป็นค่าความถี่อ้างอิง เพื่อเปรียบเทียบในการส่งข้อมูลความถี่ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงต่อไป

- อุปกรณ์รับค่าการเพิ่มระดับโวลต์เตจที่ความถี่ต่ำ ค่าอัตราเร่ง และอัตราหน่วง ใช้ไอซีเบอร์ 74LS244 ทำหน้าที่เป็นพอร์ทอินพุท รับค่าที่กำหนดโดยสวิตช์เลขฐานสอง (binary switch) และสวิตช์ DPDT (double pole double throw) 8031 จะอ่านค่าเหล่านี้เฉพาะเมื่อความถี่เป็นศูนย์เท่านั้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าเหล่านี้ ขณะที่มีมอเตอร์หมุน จะไม่มีผลต่อการหมุนของมอเตอร์ การเพิ่มระดับโวลต์เตจที่ความถี่ต่ำ กระทำโดย 8031 อ่านค่าจากสวิตช์เลขฐานสอง มาอ้างอิงเพื่อชี้ตำแหน่งในหน่วยความจำถาวร (ROM) ซึ่งเก็บชุดข้อมูลของโวลต์เตจที่เพิ่มขึ้น แล้วนำมาเก็บไว้ในหน่วยความจำชั่วคราวภายใน 8031 (internal RAM หรือ RAM) เพื่อนำมาประกอบกับค่าโวลต์เตจ ที่ค่าความถี่ตั้งแต่ 8 Hz ถึง 100 Hz ซึ่งเก็บเป็นชุดข้อมูลคงที่อยู่ภายใน ROM แล้ว สำหรับค่าอัตราเร่งและอัตราหน่วง 8031 ต้องอ่านค่าสวิตช์เลขฐานสองร่วมกับสวิตช์ DPDT โดยที่สวิตช์เลขฐานสองจะส่งข้อมูลได้เป็น 0, 1, 2, ..., 14, 15 และสวิตช์ DPDT จะกำหนดตัวคูณของอัตราเร่งหรืออัตราหน่วง จากสวิตช์เลขฐานสองเป็น $\times 0.2$, $\times 1$ หรือ $\times 5$ ซึ่งจะทำได้กำหนดอัตราเร่งหรืออัตราหน่วง ได้ตั้งแต่ 0.2 ถึง 75 วินาที การกำหนดระยะเวลาเร่งหรือหน่วง กระทำโดยนำค่าที่อ่านได้จากสวิตช์ทั้งสองชุดมาประกอบกันเพื่อชี้ตำแหน่งของข้อมูล ซึ่งเป็นค่าคงที่ของลูป (loop) สำหรับระยะเวลาเร่งหรือหน่วง แล้วใช้ไทม์เมอร์ภายใน 8031 กำหนดให้ส่งสัญญาณอินเทอร์พท์ทุกๆ 1 ms เพื่อลดค่าลูปจนครบ แล้วจึงส่งค่าโวลต์เตจและความถี่ออกไป ดังนั้น การเปลี่ยนความถี่จาก 0 Hz ถึง 100

Hz โดยเพิ่มครั้งละ 0.5 Hz จึงใช้เวลาอย่างน้อยที่สุดเป็น 200 ms หรือ 0.2 วินาที นั้นเอง

นอกจากการรับค่า การเพิ่มระดับโวลต์เตจ อัตราเร่งหรืออัตราหน่วงแล้ว วงจรส่วนนี้จะรับสัญญาณต่างๆ ที่ควบคุมการหมุนของมอเตอร์ด้วย ได้แก่

ทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งกำหนดด้วยสวิตช์ SPDT หาก 8031 ตรวจสอบแล้วพบว่าต้องกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ก็จะลดความถี่ลงจนเป็นศูนย์ก่อน แล้วจึงส่งสัญญาณให้ส่วนสร้างรูปคลื่นPWM สลับเฟสของรูปคลื่นที่ส่งไปขับมอเตอร์ และเพิ่มความถี่กลับคืนสู่ค่าเดิม

การหมุนหรือหยุด กำหนดด้วยสวิตช์ SPDT จะมีผลให้ 8031 เพิ่มความถี่จนถึงค่าที่กำหนดหรือลดความถี่ลงจนเป็นศูนย์ ด้วยอัตราเร่งหรืออัตราหน่วงที่กำหนดไว้ ตามลำดับ เมื่อเริ่มต้นโปรแกรม 8031 จะตรวจสอบสถานะของสวิตช์นี้ หากไม่อยู่ในสภาวะหยุด ก็จะไม่ทำงาน

การหยุดหมุนฉุกเฉิน เกิดขึ้นเมื่อกระแสเกินระดับที่อาจทำให้อุปกรณ์เสียหาย โดยวงจรตรวจสอบกระแส จะส่งสัญญาณมาอินเทอร์พรัท 8031 มีผลให้ส่วนควบคุมไม่ส่งรูปคลื่น PWM ให้ส่วนทรานซิสเตอร์อินเวอร์เตอร์ ทำให้ทรานซิสเตอร์ทุกตัวไม่นำกระแส จนกว่าจะรีเซ็ตระบบ จึงจะสามารถเริ่มการทำงานใหม่ได้

การคงความถี่ขณะเร่ง เกิดขึ้นเมื่ออัตราเร่งถูกกำหนดให้เร็วเกินไป เป็นผลให้กระแสเกินระดับที่กำหนดไว้ แต่ต่ำกว่าระดับของการหยุดหมุนฉุกเฉินดังกล่าวแล้ว หากกระแสกลับคืนสู่ระดับปกติก็จะสามารถเพิ่มความถี่ขึ้นได้ต่อไป

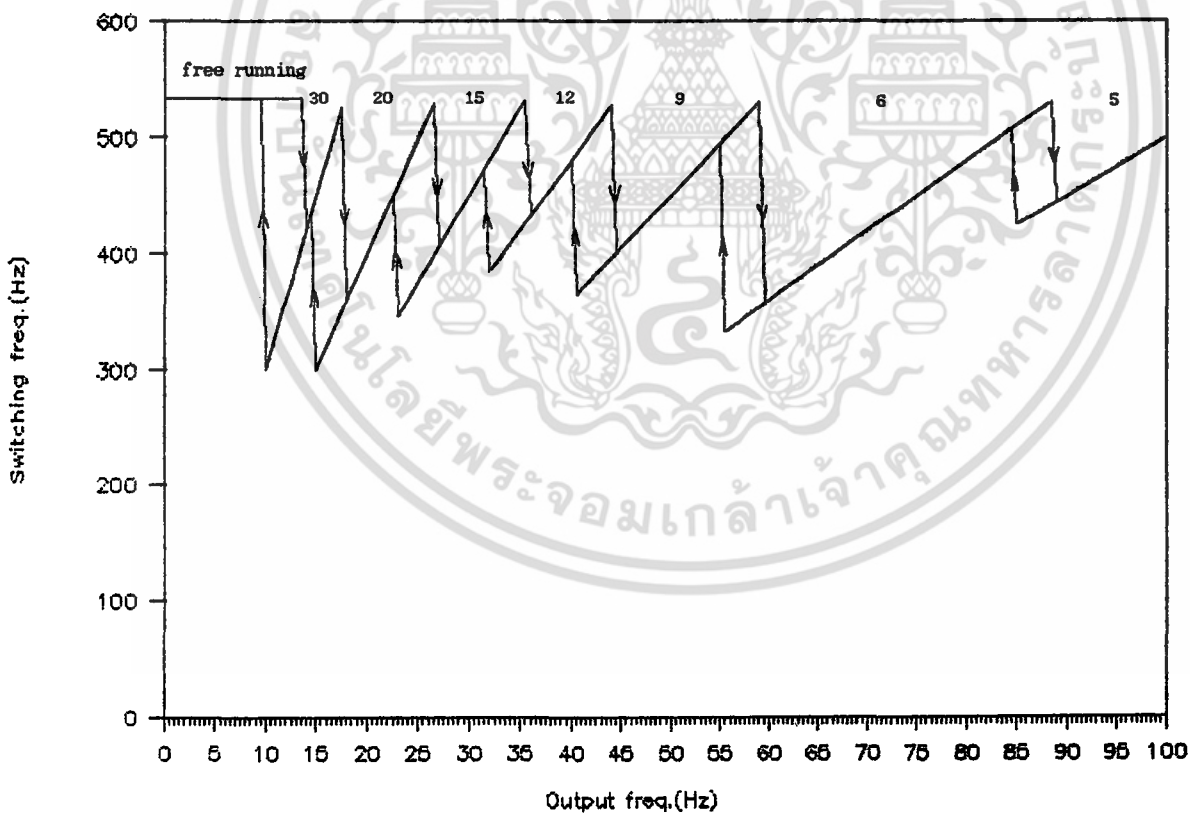
- อุปกรณ์แลตช์ (latch) ค่าโวลต์เตจและความถี่ ใช้ไอซีเบอร์ 74LS374 ซึ่งเป็น D ฟลิปฟลอป ทำหน้าที่เป็นพอร์ตเอาต์พุต แลทช์ค่าไว้ให้แก่วงจรสร้างรูปคลื่น PWM ต่อไป

สำหรับโฟลว์ชาร์ต (flowchart) แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม ส่วนควบคุมโวลต์เตจและความถี่นี้ แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยมีรายละเอียดของโปรแกรมในภาคผนวก ง.

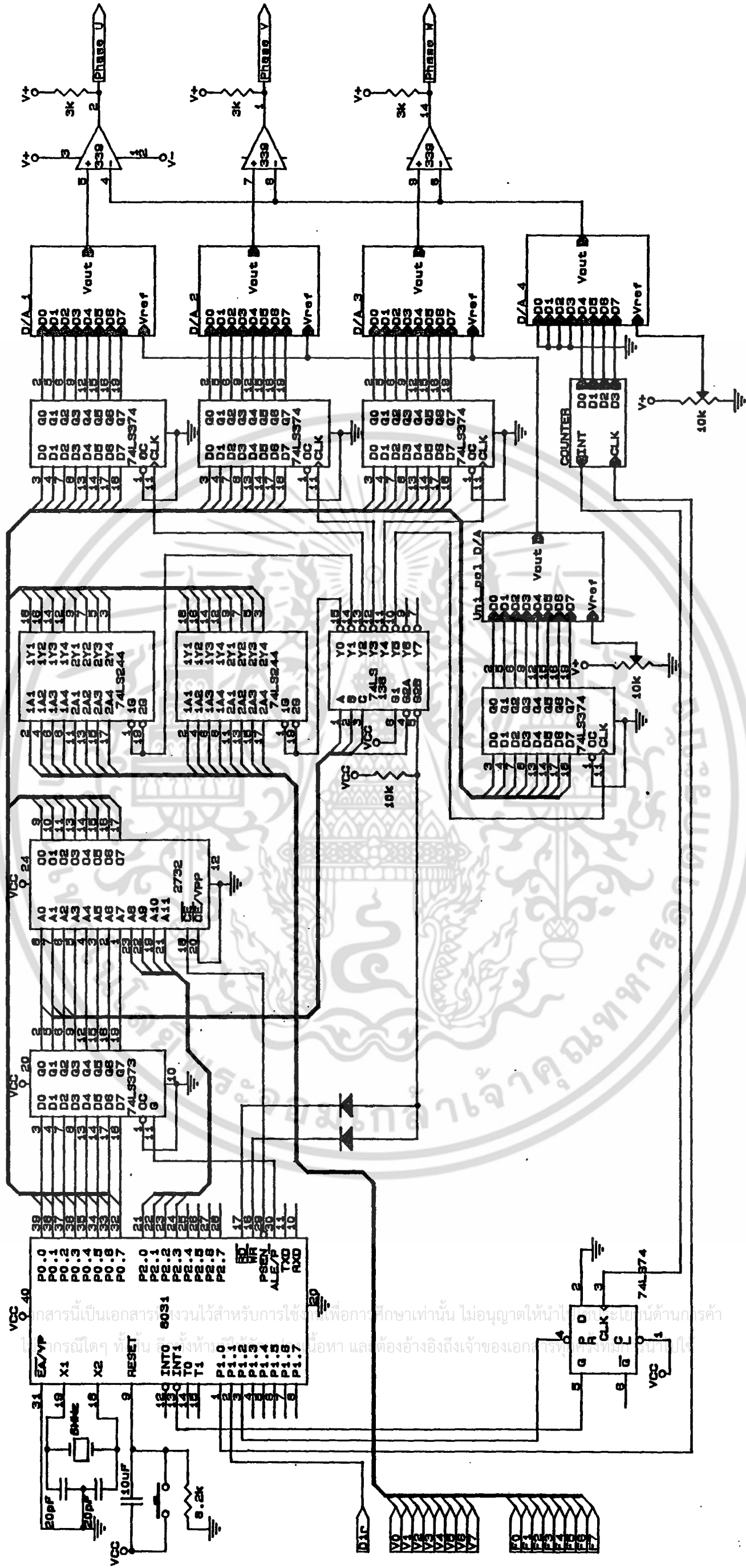
4.3.2 การออกแบบวงจรสร้างรูปคลื่น PWM

วงจรสร้างรูปคลื่น PWM จะรับค่าโวลต์เตจ ความถี่ และทิศทาง จากวงจรควบคุมโวลต์เตจและความถี่ นำมาสร้างรูปคลื่น PWM เพียงอย่างเดียว โดยใช้วิธียูนิฟอร์มแอมปลิง ซึ่งเมื่อพิจารณา รูปที่ 3.11 และ 3.12 พบว่า หากสัดส่วนของความถี่ FR ยังมีค่ามาก ก็จะเป็นผลให้ฮาร์โมนิคเลื่อนไปเกิดขึ้นในตำแหน่งที่ความถี่สูง แต่การให้ FR สูงมากนั้น จะทำให้ความถี่การสวิตช์สูงขึ้นเมื่อความถี่ของรูปคลื่นเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ ความสูญเสียจากการสวิตช์เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น การลด FR ลงขณะที่ความถี่ของรูปคลื่น PWM เพิ่มขึ้น เพื่อรักษาความถี่ของการสวิตช์ให้อยู่ภายในช่วงที่กำหนด จึงเป็นวิธีที่เหมาะสม

จากการออกแบบกำหนดให้ ความถี่การสวิตช์อยู่ระหว่าง 300 Hz ถึง 533 Hz ดังรูปที่ 4.7 มีช่วงเดดแบนด์ (dead band) ระหว่างความสัมพันธ์ของการเพิ่มความถี่ และลดความถี่ ขณะ



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่รูปคลื่น และความถี่สวิตช์



Title	PMM Generator circuit
Size	B
Document Number	REV
Date	April 14, 1991
Sheet	of

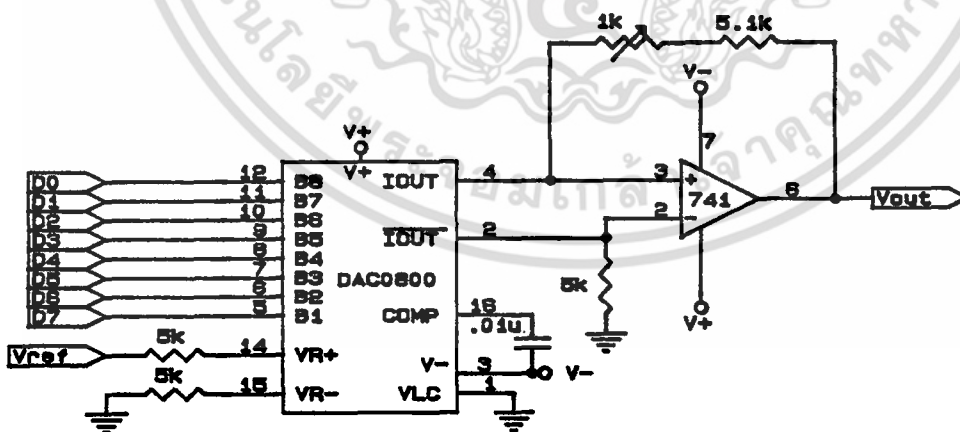
รูปที่ 4.8 วงจรสร้างรูปคลื่น PMM

เปลี่ยน FR ประมาณ 5 Hz นอกจากนั้น ที่ความถี่รูปคลื่นต่ำกว่า 10 Hz เมื่อลดความถี่ และต่ำกว่า 15 Hz เมื่อเพิ่มความถี่ จะมอดูเลตด้วยวิธีเนเชอรัลแรมปลิ่ง โดยรักษาความถี่การสวิตช์คงที่ ที่ 533 Hz และเมื่อเพิ่มความถี่รูปคลื่นขึ้นสูงกว่านี้ จนถึง 100 Hz ก็จะมีค่า FR ลงเป็น 30, 20, 15, 12, 9, 6 และ 5 ตามลำดับ

วงจรสร้างรูปคลื่น PWM แสดงดังรูปที่ 4.8 ประกอบด้วย

- อุปกรณ์รับค่าโวลต์เตจและความถี่ ใช้ไอซีเบอร์ 74LS244 ทำหน้าที่เป็นพอร์ทอินพุท รับค่ามาจากวงจรควบคุมโวลต์เตจและความถี่ เพื่อนำมาสร้างรูปคลื่น ที่มีระดับโวลต์เตจและความถี่ตามที่กำหนด

- อุปกรณ์สร้างรูปคลื่นสามเหลี่ยม ประกอบด้วยวงจรรีบขึ้น-ลง ดังรูปที่ 4.8 โดยได้รับสัญญาณนาฬิกา (CLK) จาก 8031 เพื่อให้ 8031 สามารถควบคุมความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยมได้ เมื่อวงจรรีบทำการนับขึ้นจนถึงค่าสูงสุด หรือนับลงจนถึงค่าต่ำสุด ก็จะส่งสัญญาณเอนเทอร์พท์ 8031 เพื่อให้ส่งข้อมูลของรูปคลื่นออกมา ซึ่งกรณีดังกล่าวนี้ จะเกิดขึ้นเมื่ออยู่ในโหมดการมอดูเลตด้วยวิธียูนิฟอร์มแรมปลิ่งแบบไม่สมมาตร ข้อมูลดิจิทัลจากวงจรรีบ จะส่งให้แก่วงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นอนาลอก แบบให้เอาต์พุตบวก-ลบ ดังวงจรรูปที่ 4.9 ซึ่งจะทำได้ระดับโวลต์เตจสูงสุด-ต่ำสุด เป็น +10V และ -10V ตามลำดับ



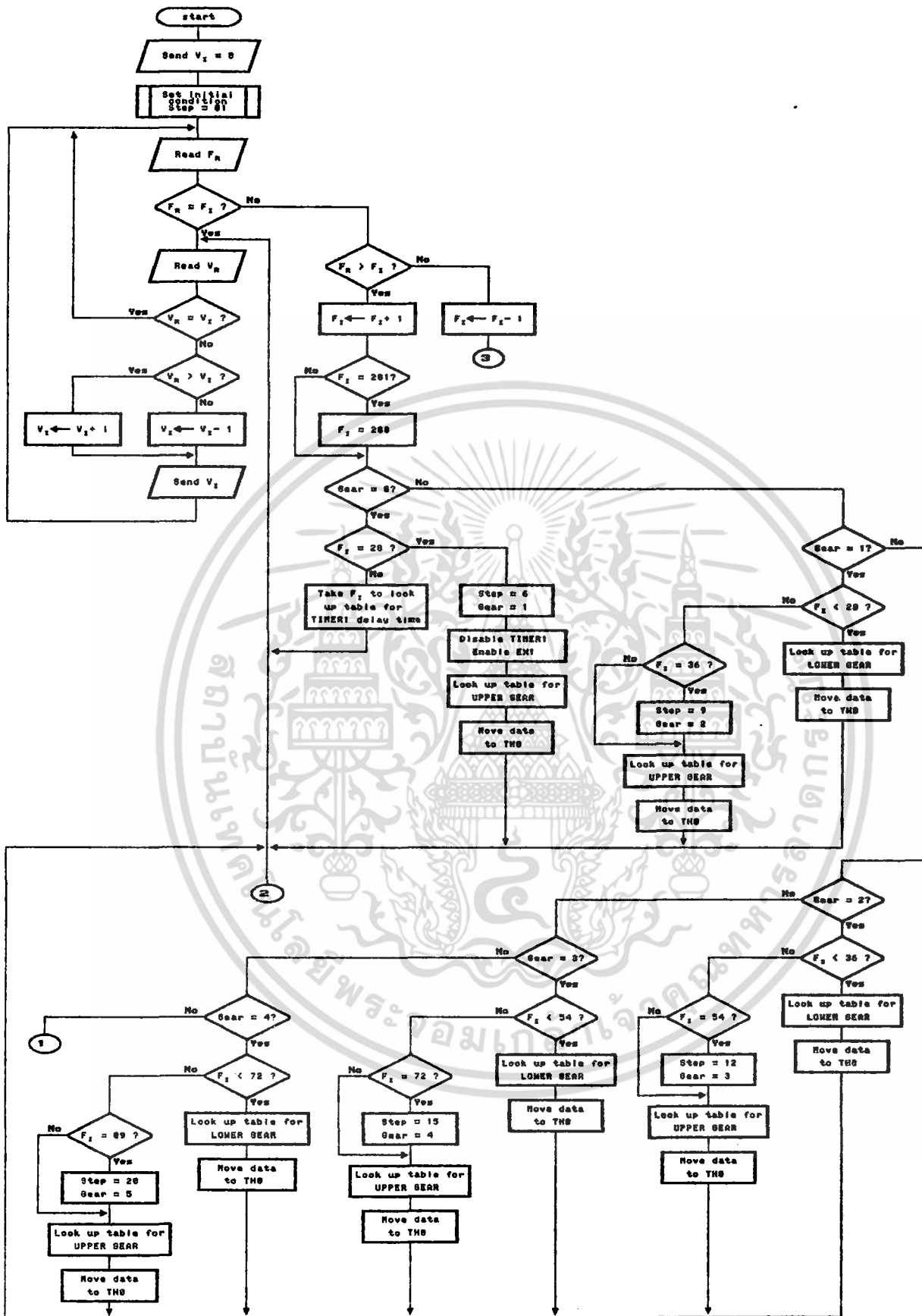
รูปที่ 4.9 วงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอกแบบให้เอาต์พุตบวก-ลบ

- อุปกรณ์สร้างรูปคลื่นที่ต้องการนำมาถอดเลข ประกอบด้วย D-ฟิลิปพลอป ทำหน้าที่เป็นพอร์ทเอาต์พุตพร้อมกับวงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอก รูปที่ 4.9 วงจรชุดนี้จะรับข้อมูลดิจิทัลจาก 8031 ซึ่งจะนำข้อมูลของรูปคลื่นที่เก็บไว้ในหน่วยความจำถาวร ส่งออกมาเป็นลำดับ ลักษณะของการส่งข้อมูลจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับ ช่วงความถี่ของรูปคลื่น หรือขึ้นอยู่กับ FR นั้นเอง โดยแสดงได้ดังตารางในรูปที่ 4.10

gear	frequency ratio	step (deg)
0	-	1
1	30	6
2	20	9
3	15	12
4	12	15
5	9	20
6	6	30
7	5	36

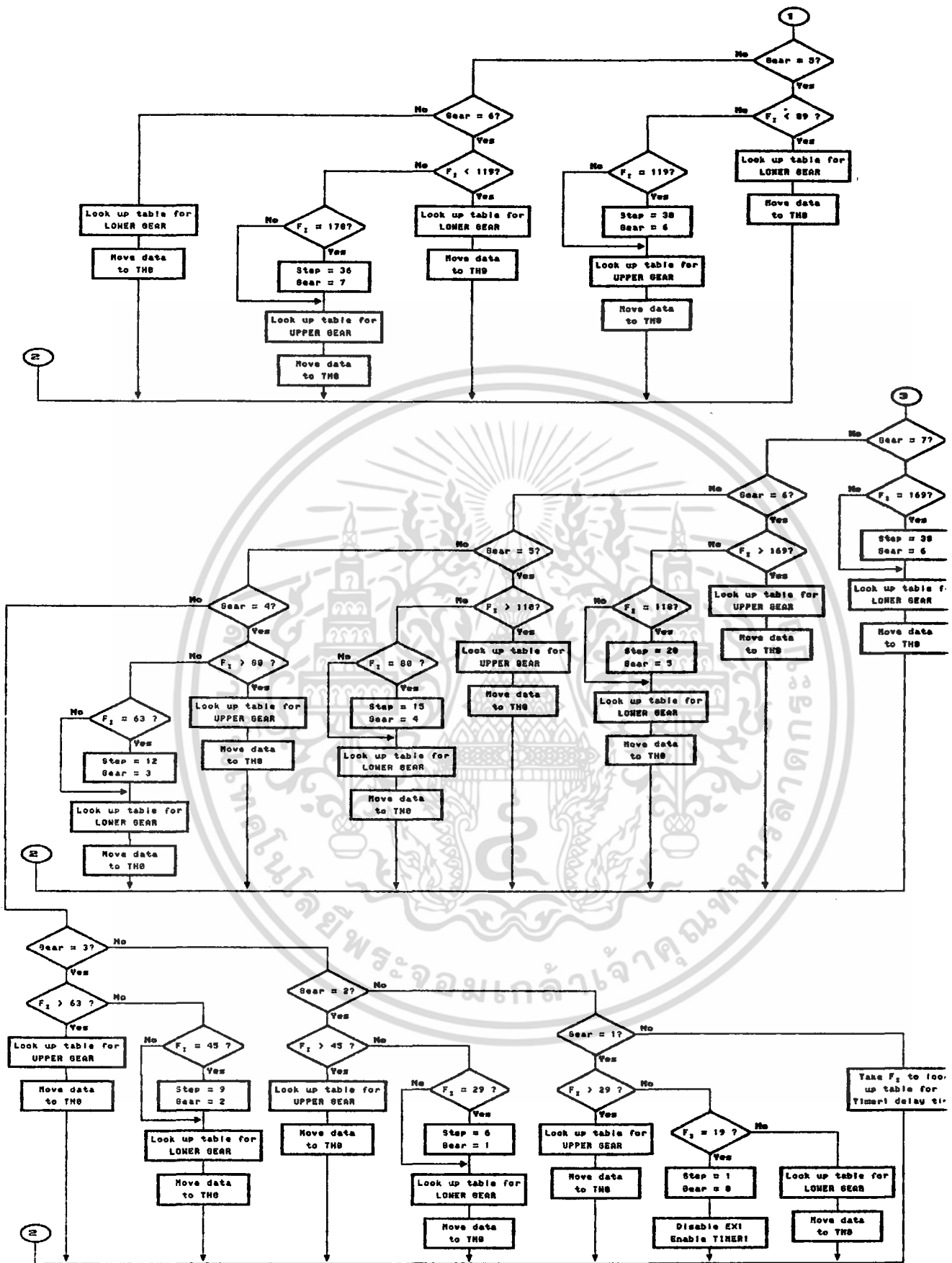
รูปที่ 4.10 ตารางความสัมพันธ์ของสัดส่วนความถี่กับช่วงการส่งข้อมูล

จากรูปที่ 4.10 การส่งข้อมูลของ 8031 เมื่อเกียร์ (gear) มากกว่าศูนย์ จะกระทำทุกครึ่งเมื่อได้รับการอินเทอร์พท์จากวงจรนับขึ้น-ลง ซึ่งเป็นการถอดเลขด้วยวิธีฟิลลิปฟอร์มแซมปลิงแบบไม่สมมาตรนั่นเอง และความถี่ของรูปคลื่น ก็จะกำหนดได้ด้วยความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยมซึ่งควบคุมด้วยสัญญาณนาฬิกาดังกล่าวแล้ว สำหรับกรณีที่เกียร์เป็นศูนย์ ก็จะเป็นการถอดเลขแบบเนเชอรัลแซมปลิง ซึ่งความถี่ของรูปคลื่น ถูกกำหนดด้วยค่าเวลาหน่วงจาก ไทม์เมอร์ภายใน 8031 ในการส่งข้อมูลของรูปคลื่นออกแต่ละครั้ง ขณะที่สัญญาณนาฬิกาที่ 8031 ส่งให้แก่วงจรนับขึ้น-ลง มีความถี่คงที่ และ 8031 ไม่ตอบ



รูปที่ 4.11 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมส่วนสร้างรูปคลื่น PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

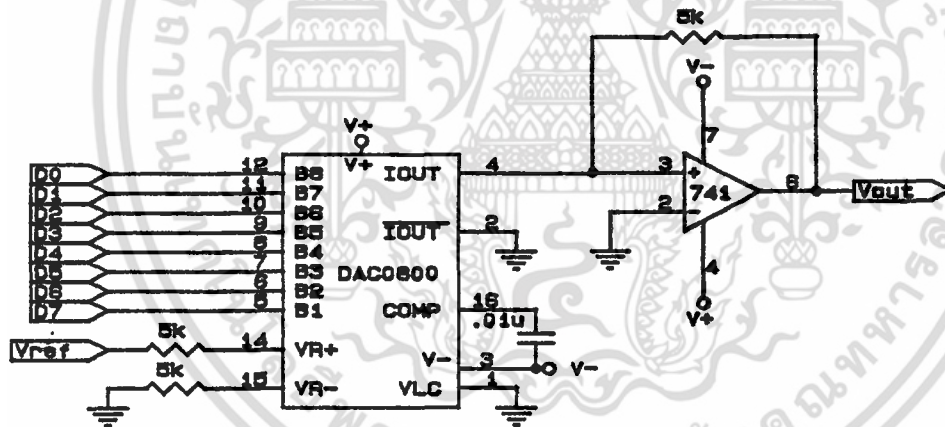


รูปที่ 4.11(ต่อ) โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมส่วนสร้างรูปคลื่น PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนองการอินเทอร์พรีตของวงจรนับขึ้น-ลง สำหรับโพลีชาร์ตการทำงาน ของโปรแกรมส่วนสร้างรูปคลื่น PWM ซึ่งแสดงให้เห็นขั้นตอนในการตรวจสอบช่วงความถี่ของรูปคลื่นในการเปลี่ยนสัดส่วนความถี่ด้วย แสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งแบ่งการตรวจสอบช่วงความถี่เป็น 2 แบบ คือ การตรวจสอบเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น และการตรวจสอบเมื่อความถี่ลดลง เนื่องจากค่าความถี่ของรูปคลื่น เมื่อเปลี่ยนสัดส่วนความถี่ระหว่างสองเกียร์ที่ติดกันมีค่าไม่เท่ากัน ทั้งนี้เพราะกำหนดให้มีเดดแบนด์ด้วย

การควบคุมระบบโวลต์เตจของรูปคลื่นที่นำมาทดสอบนี้ กระทำได้โดยเปลี่ยนแปลงระดับโวลต์เตจอ้างอิง (V_{ref}) ในวงจรรูปที่ 4.9 จากวงจรรูปที่ 4.8 ออกแบบโดยใช้ วงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกอีกชุดหนึ่ง ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งให้อาห์พุทตั้งแต่ 0 ถึง 10 โวลต์ ดังนั้น 8031 จะสามารถควบคุมระดับโวลต์เตจของรูปคลื่นแต่ละเฟส ได้โดยส่งข้อมูลดิจิทัลให้แก่วงจรนี้ สำหรับเอาต์พุทจากวงจรสร้างรูปคลื่นที่นำมาทดสอบแต่ละเฟส จะถูกนำมาเข้าวงจรเปรียบเทียบรูปคลื่น กับรูปคลื่นสามเหลี่ยมทำให้ได้รูปคลื่น PWM เพื่อใช้ขับมอเตอร์เหนี่ยวนำให้แก่วงจรในส่วนต่อไป

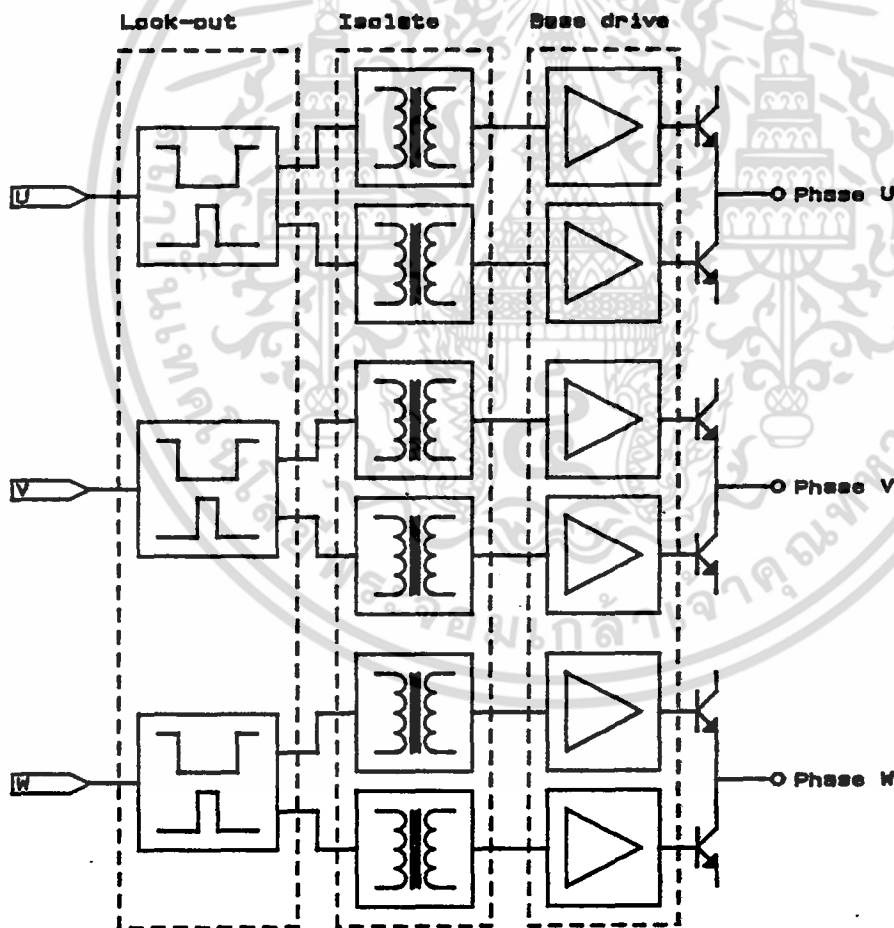


รูปที่ 4.12 วงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกแบบให้อาห์พุทบวก

4.3.3 วงจรขับอินเวอร์เตอร์

เนื่องจากรูปคลื่น PWM 3 เฟส จากวงจรสร้างรูปคลื่น ต้องนำมาขับชุด PWM อินเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย ทรานซิสเตอร์กำลัง 6 ตัว โดยแต่ละเฟสจะประกอบด้วย ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว นำกระแสสลับกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างวงจรขับอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสม เพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่างไลน์ และแยกส่วนของวงจรควบคุม กับวงจรไฟฟ้ากำลังออกจากกัน องค์ประกอบของวงจรขับอินเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ แสดงดังรูปที่ 4.13 ซึ่งประกอบด้วย

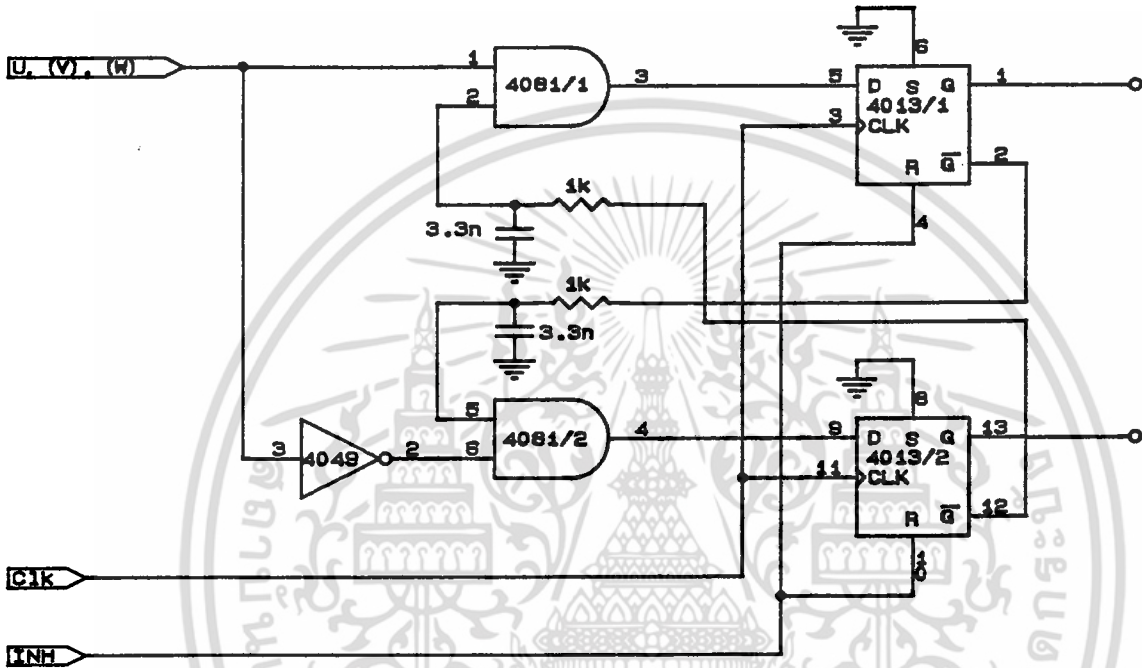
- วงจรหน่วงสัญญาณ
- วงจรแยกสัญญาณ
- วงจรขับเบส



รูปที่ 4.13 โครงสร้างของวงจรขับอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วงจรหน่วงสัญญาณ (lock-out) มีหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรระหว่างไลน์ อันเนื่องมาจากสตอเรจไทม์ (storage time) ของทรานซิสเตอร์กำลัง โดยนำรูปคลื่น PWM 3 เฟส จากวงจรสร้างรูปคลื่น PWM มาแยกสัญญาณแต่ละเฟสออกเป็น 2 สัญญาณ ที่มีสถานะ "high" ไม่พร้อมกัน โดยที่ในช่วงเวลาหน่วงเกิดขึ้นระหว่างขอบขาขึ้น และขอบขาลงของสัญญาณทั้งสอง

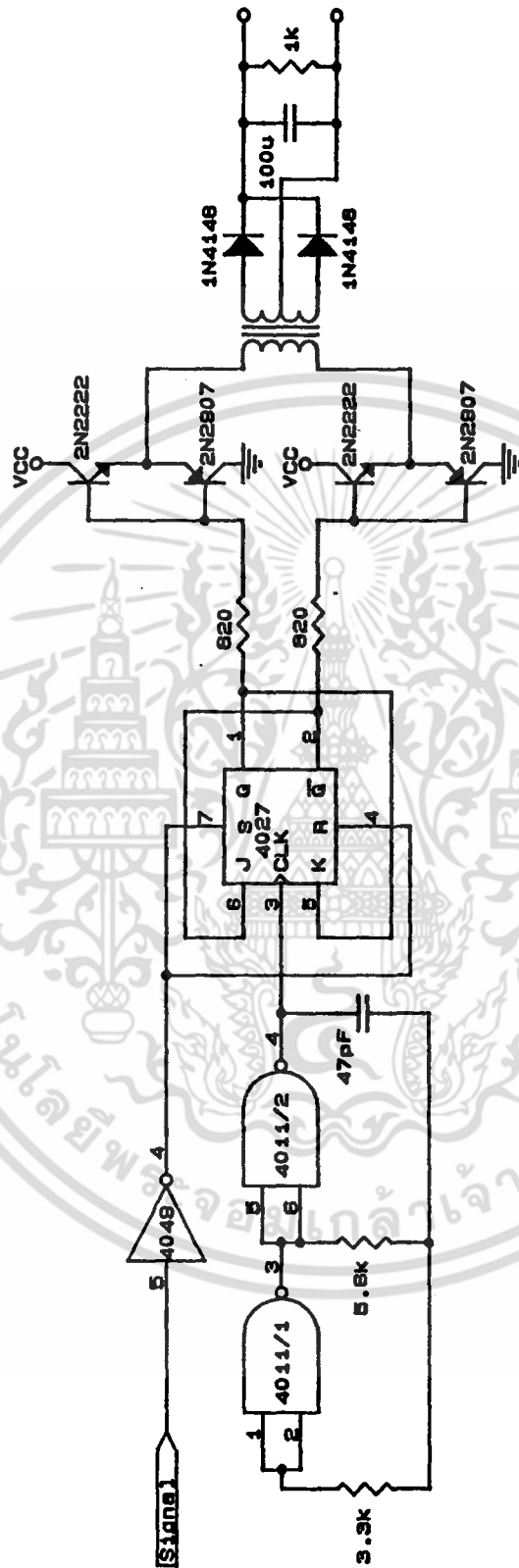


รูปที่ 4.14 วงจรหน่วงสัญญาณ

วงจรหน่วงสัญญาณในรูปที่ 4.14 ช่วงเวลาหน่วงขึ้นอยู่กับค่าไทม์คอนสแตนต์ (time constant) ของความต้านทาน ตัวเก็บประจุ และความถี่ของสัญญาณนาฬิกา (CLK) ซึ่งในการออกแบบใช้ค่า 100 kHz ทำให้ได้ค่าเวลาหน่วงต่ำที่สุด เท่ากับ $10\ \mu\text{s}$ นอกจากนี้ วงจรยังถูกควบคุมการส่งสัญญาณด้วยสัญญาณอินฮิบิต (inhibit) จาก 8031 ด้วย ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ 8031 พบว่า กระแสเกินระดับที่กำหนดไว้ จึงส่งสัญญาณอินฮิบิต ทำให้เอาต์พุตของวงจรหน่วงสัญญาณ เป็นศูนย์ทั้งหมด นั่นคือ ทรานซิสเตอร์กำลังทุกตัวจะต้องหยุดนำกระแส

- วงจรแยกสัญญาณ (isolate) แสดงวงจรดังรูปที่ 4.15 มีหน้าที่แยกกราวด์ ไฟเลี้ยง และสัญญาณของส่วนที่เป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ จากวงจรหน่วงสัญญาณ กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

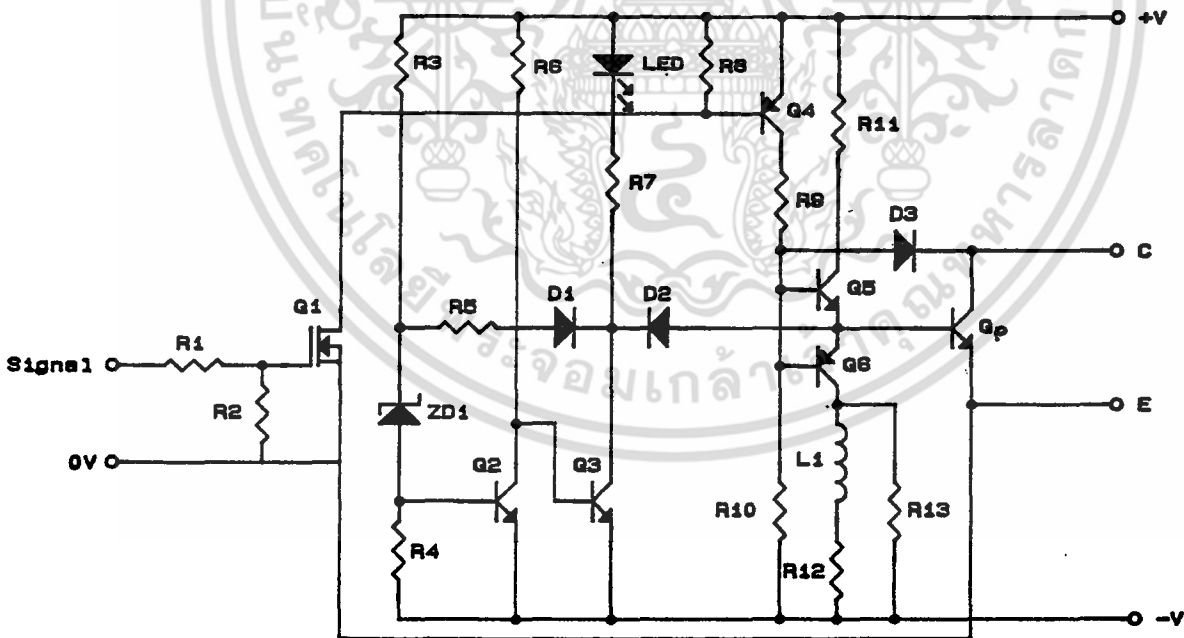


รูปที่ 4.15 วงจรแยกสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกัน โดยใช้พัลส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์ (pulse transformer) เป็นอุปกรณ์แยกสัญญาณ ด้วยการนำสัญญาณจากวงจรหนึ่งสัญญาณ มามอดูเลตด้วยความถี่ประมาณ 2 MHz โดยใช้ JK-ฟลิปฟล็อป จากนั้นก็ส่งผ่านพัลส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์ แล้วสัญญาณที่ผ่านมาก็จะถูกนำมาตัดกระแส และกรองความถี่สูงออก ซึ่งก็จะทำให้ได้สัญญาณ ที่มีลักษณะ เช่นเดียวกับสัญญาณจากวงจรหนึ่งสัญญาณ เพื่อนำไปใช้ขับเบสของทรานซิสเตอร์กำลังต่อไป

- วงจรขับเบส มีหน้าที่ขยายสัญญาณ เพื่อใช้ขับกระแสเบสของทรานซิสเตอร์กำลัง ดังวงจรรูปที่ 4.16 เมื่อมีสัญญาณผ่านมาจากส่วนแยกสัญญาณ ทรานซิสเตอร์ Q_1, Q_4 และ Q_5 จะนำกระแส จ่ายกระแสเบสให้แก่ทรานซิสเตอร์กำลัง Q_2 ทำให้ Q_2 นำกระแส เมื่อไม่มีสัญญาณจากส่วนแยกสัญญาณ Q_5 จะนำกระแสเพียงตัวเดียว เพื่อดึงกระแสเบสออกจาก Q_2 ทำให้หยุดนำกระแสได้เร็วขึ้น การต่อ D_3 ช่วยให้ Q_2 นำกระแสในช่วงควอซีแซตเทอเรชัน (quasi-saturation) สำหรับ Q_2 และ Q_3 นั้น จะทำงานร่วมกับซีเนอร์ไดโอด ZD_1 เพื่อตรวจสอบระดับไฟเลี้ยงของวงจรขับเบสไม่ให้ต่ำเกินไป มิฉะนั้นอาจทำให้ Q_2 นำกระแสอย่างไม่สมบูรณ์



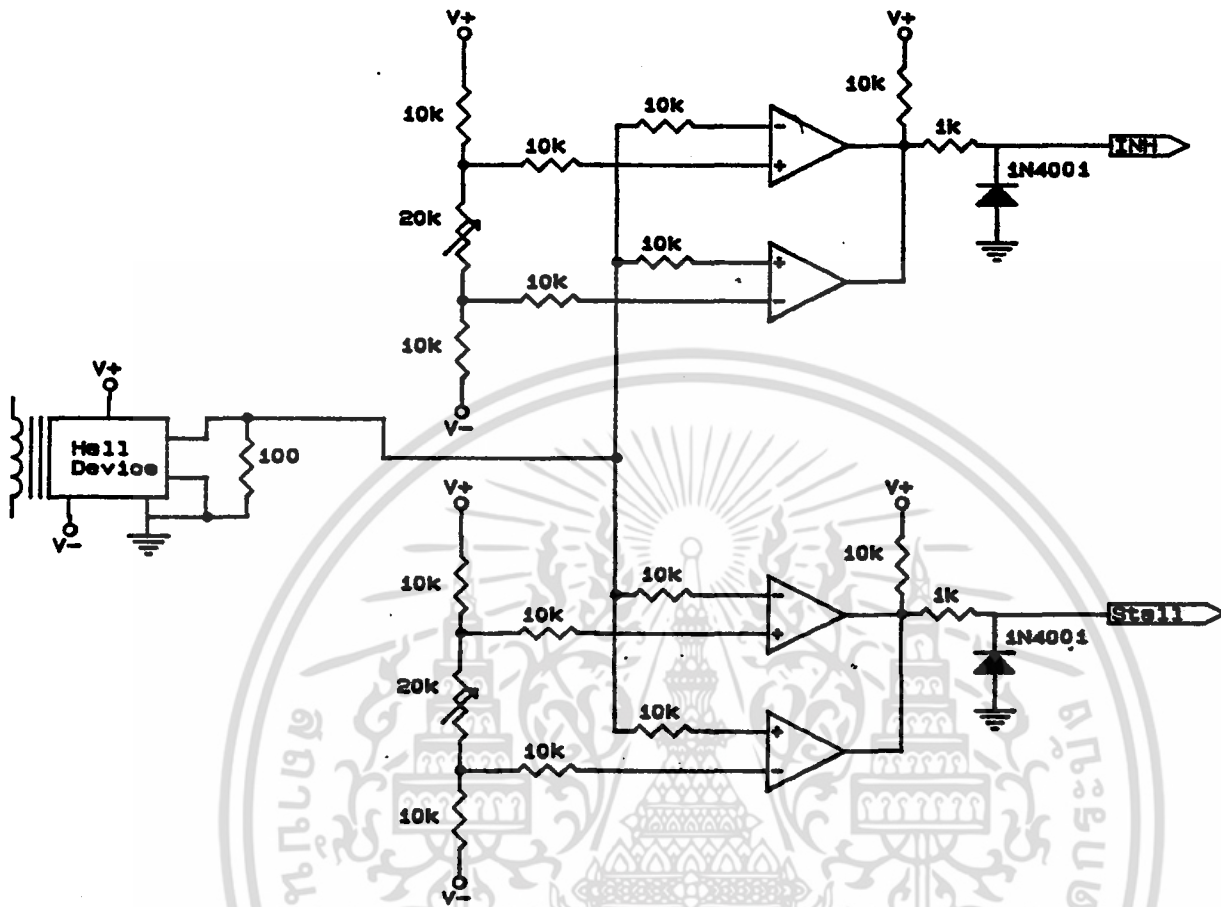
รูปที่ 4.16 วงจรขับเบส

4.4 วงจรป้องกัน

การออกแบบอุปกรณ์หรือเครื่องมือใดๆก็ตาม วงจรป้องกันเป็นส่วนสำคัญ ที่จะบ่งบอกถึงความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์หรือเครื่องมือชิ้น ซึ่งในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ด้วยอินเวอร์เตอร์นั้น ผลของขนาดกระแสที่เกิดขึ้น อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแส (di/dt) หรือ อัตราการเปลี่ยนแปลงโวลต์เตจ (dv/dt) จะทำให้ มอเตอร์หรืออุปกรณ์อื่นเสียหายได้ ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ จึงป้องกันขนาดกระแสเกินพิกัด โดยใช้วงจรตรวจสอบกระแส ซึ่งจะส่งสัญญาณให้แก่ 8031 เมื่อกระแสเกินพิกัด เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดแก่มอเตอร์ หรืออุปกรณ์อื่น และใช้วงจรสแน็บเบอร์ (snubber) ที่ทรานซิสเตอร์กำลังในชุดอินเวอร์เตอร์ เพื่อป้องกันผลของ di/dt และ dv/dt ซึ่งจะทำความเสียหายให้แก่ทรานซิสเตอร์กำลัง

4.4.1 วงจรตรวจสอบกระแส

วงจรมีหน้าที่ตรวจสอบกระแส แล้วนำมาเปรียบเทียบระดับอ้างอิง และส่งสัญญาณไปยัง 8031 ดังแสดงวงจรในรูปที่ 4.17 ประกอบด้วย อุปกรณ์วัดกระแสเป็น DCCT (DC current transformer) ซึ่งจะมีขนาดกระแสเอาต์พุตเปลี่ยนแปลง ตามขนาดกระแสอินพุต เมื่อต่อความต้านทานที่เอาต์พุต ก็จะได้ระดับโวลต์เตจ ที่เปลี่ยนแปลงตามขนาดกระแสอินพุต จากนั้น นำโวลต์เตจที่ได้มาเข้าวงจรเปรียบเทียบแรงดัน 2 ชุด ซึ่งกำหนดค่าระดับโวลต์เตจอ้างอิงที่แตกต่างกัน โดยสามารถปรับระดับโวลต์เตจอ้างอิงของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน ที่ความต้านทานปรับค่าได้ของแต่ละชุด ซึ่งกำหนดให้วงจรส่งสัญญาณให้แก่ 8031 เมื่อขนาดกระแสมากกว่า 4 A และ 8 A ตามลำดับ ดังนั้น หากขนาดกระแสมากกว่า 4 A แต่น้อยกว่า 8 A ซึ่งอาจเกิดจาก การกำหนดค่าอัตราเร่งของมอเตอร์เร็วเกินไป จะเป็นผลให้ 8031 คงความถี่ของมอเตอร์ไว้จนกว่า ขนาดกระแสจะลดลงจนต่ำกว่า 4 A การป้องกันลักษณะนี้เรียกว่า "stall protection" หากขนาดกระแสมากกว่า 8 A อาจเกิดจาก การลัดวงจรของทรานซิสเตอร์กำลัง หรืออุปกรณ์อื่น ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายแก่มอเตอร์ได้ 8031 ก็จะยับยั้งการจ่ายรูปคลื่น PWM จนกว่าระบบจะถูกรีเซ็ต (reset) เพื่อเริ่มการทำงานใหม่ การป้องกันลักษณะนี้เรียกว่า "overcurrent protection"



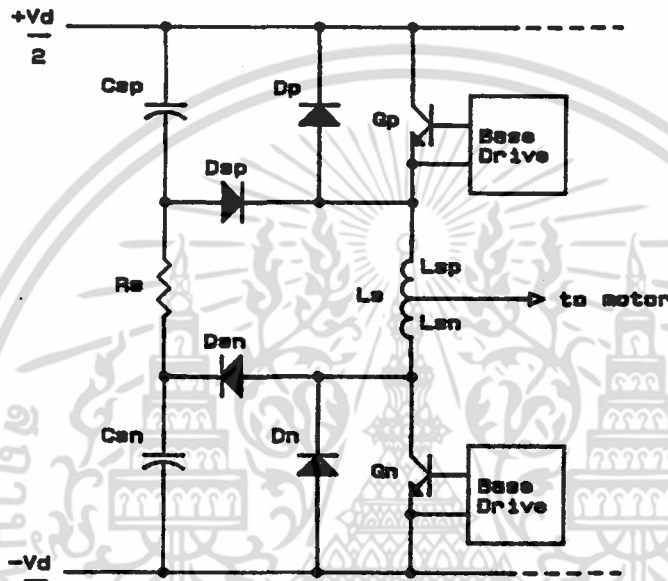
รูปที่ 4.17 วงจรตรวจสอบกระแส

4.4.2 วงจรป้องกันทรานซิสเตอร์กำลัง [10]

วงจรสับเบอร์ที่นำมาใช้ป้องกันการเกิด di/dt และ dv/dt ต่อทรานซิสเตอร์กำลังที่มากเกินไป แสดงดังรูปที่ 4.18 ซึ่งแสดงองค์ประกอบของวงจรชุดทรานซิสเตอร์กำลังเฟสเดียวในสามเฟส ภายในวงจรประกอบด้วยไดโอด D_p และ D_n ซึ่งต่อคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_p และ Q_n ตามลำดับ เพื่อป้องกันกระแสที่อาจไหลย้อนกลับเข้าไปยังซาว์ทมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์กำลัง นอกจากนี้มีตัวเหนี่ยวนำ L_{sp} และ L_{sn} ซึ่งต่ออนุกรมกับทรานซิสเตอร์กำลังทั้งสองตัว ช่วยจำกัดขนาดของ di/dt ที่ผ่านทรานซิสเตอร์กำลังทั้งสอง และเนื่องจากตัวเหนี่ยวนำทั้งสองพันขมวดกันเหมือนกัน จึงเกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กระหว่างกัน มีสัมประสิทธิ์ร่วม k ทำให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำรวมเป็น

$$L_s = 2L_u(1+k)$$

ดังนั้น di/dt ที่ผ่าน Q_p และ Q_n จึงถูกจำกัดให้เป็น E_d/L_s ส่วนตัวเก็บประจุ C_{ep} และ C_{en} ซึ่งต่อขนานกับทรานซิสเตอร์กำลัง จะป้องกัน dv/dt ที่เกิดขึ้นกับทรานซิสเตอร์แต่ละตัวขณะหยุดนำกระแส และความต้านทาน R_u จะช่วยสลายพลังงานภายในตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุทั้งหมดโดยเร็ว



รูปที่ 4.18 วงจรป้องกันทรานซิสเตอร์กำลัง

4.5 ชิ้นงานของวิทยานิพนธ์

ชิ้นงานของวิทยานิพนธ์แบ่งออกเป็นสามส่วน คือ ส่วนวงจรควบคุม ส่วนวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และส่วนวงจรป้องกัน ส่วนวงจรควบคุม แยกออกเป็นสองส่วนติดต่อกัน ผู้ใช้ แสดงในรูปที่ 4.19 ประกอบด้วย 8031 และหน่วยความจำซึ่งเก็บโปรแกรมควบคุมการทำงาน สวิตช์ 2 ชุด มีหน้าที่กำหนดให้หมุน-หยุด และกำหนดทิศทางการหมุนของมอเตอร์ พร้อมทั้งความต้านทานปรับค่าได้ ซึ่งกำหนดความเร็วของรูปคลื่นที่ถูกติดตั้งไว้ภายนอก บนแผ่นวงจรประกอบด้วย สวิตช์เลขฐานสอง ซึ่งกำหนดระดับการเพิ่มโวลต์เตจที่ความถี่ต่ำ และอัตราเร่งหรืออัตราหน่วง รวมทั้งมีลวดเชื่อมซึ่งกำหนดตัวคูณของอัตราเร่งหรืออัตราหน่วงด้วย

รูปที่ 4.20 เป็นวงจรสร้างรูปคลื่น PWM ประกอบด้วย 8031 และหน่วยความจำเช่นเดียวกัน นอกจากนี้บนแผ่นวงจรจะประกอบด้วย D/A จำนวน 5 ชุด โดยจะสร้างรูปคลื่นสามเหลี่ยม 1 ชุด สร้างรูปคลื่นที่นำมาถอดเลขกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม 3 ชุด และควบคุมระดับโวลต์เตจของรูปคลื่น 1 ชุด

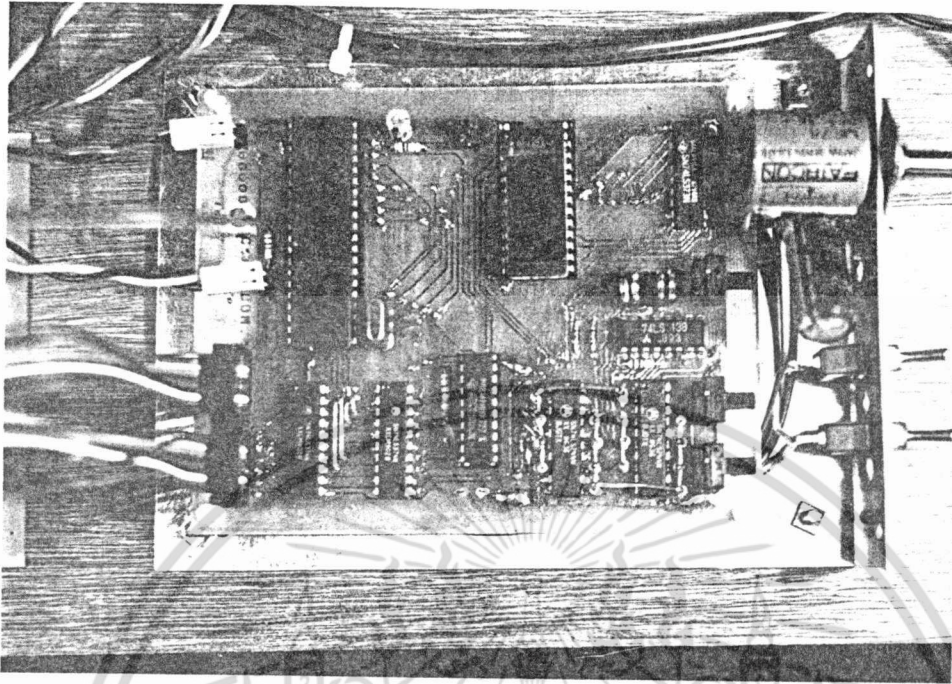
รูปที่ 4.21 เป็นชุดวงจรขับอินเวอร์เตอร์ ประกอบด้วยวงจรท่วงสัญญาณ ซึ่งจะส่งสัญญาณ PWM ที่ผ่านขบวนการท่วงสัญญาณแล้ว ให้แก่วงจรแยกสัญญาณและวงจรขับเบส 6 ชุด ในรูปจะข้อมแผ่นวงจรสองชั้น และเห็นพัลส์ที่ทรานส์ฟอร์มเมอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์แยกสัญญาณอยู่บนแต่ละบอร์ดด้วย

รูปที่ 4.22 เป็นวงจรแหล่งจ่ายไฟแบบสวิทชิง จำนวน 6 ชุด จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่ชุดขับอินเวอร์เตอร์ ในส่วนวงจรขับเบสทั้ง 6 ชุด

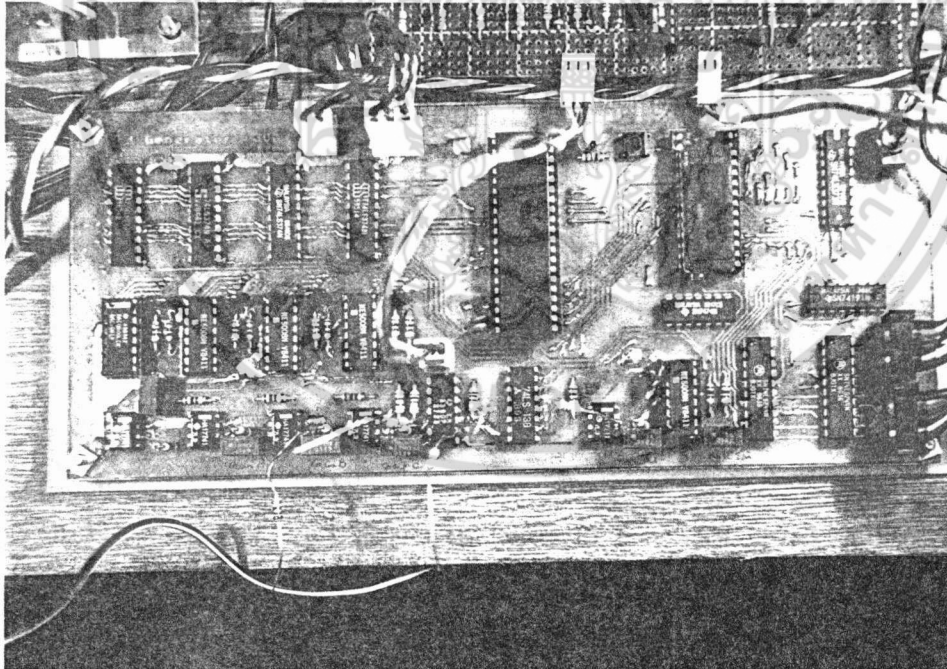
รูปที่ 4.23 เป็นวงจรทรานซิสเตอร์กำลัง ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์กำลัง 6 ตัว ยึดบนแผ่นระบายความร้อนซึ่งแยกกัน ในรูปแสดงให้เห็นวงจรสับเบอร์ 3 ชุด ซึ่งประกอบด้วย R, L และ C ที่ใช้ป้องกันทรานซิสเตอร์กำลังร่วมอยู่ด้วย

รูปที่ 4.24 เป็นวงจรตรวจสอบกระแส ซึ่งใช้อุปกรณ์วัดกระแสเป็น DCCCT วัดกระแสจากชุดเรกติไฟร์ที่จ่ายไฟตรงให้แก่ชุดอินเวอร์เตอร์ นำมาผ่านวงจรเปรียบเทียบบนแผ่นวงจรพิมพ์ด้านล่างของรูป เพื่อส่งสัญญาณให้แก่ชุดควบคุมต่อไป

รูปที่ 4.25 เป็นวงจรทั้งหมดที่ออกแบบสร้างขึ้นโดยแยกเป็นส่วนๆ ได้แก่วงจรควบคุมโวลต์เตจและความถี่ วงจรสร้างรูปคลื่น PWM ชุดวงจรขับอินเวอร์เตอร์ วงจรจ่ายไฟชุดวงจรขับเบส วงจรตรวจสอบกระแส และวงจรทรานซิสเตอร์กำลัง ส่วนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ที่นำมาใช้ทดสอบวางไว้ด้านล่าง

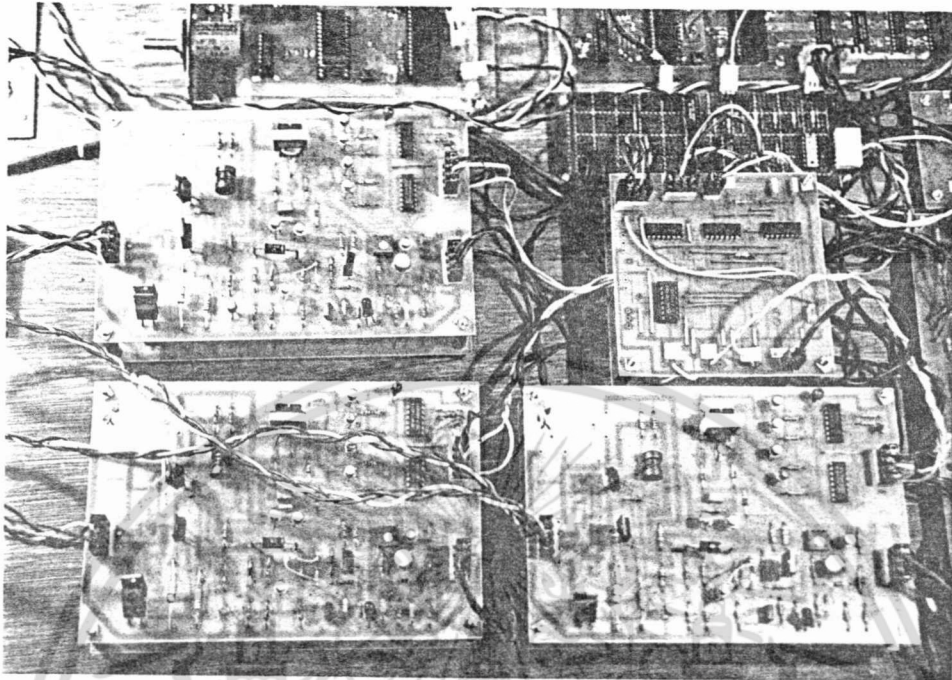


รูปที่ 4.19 ภาพวงจรควบคุม โวลต์ที่เตจและความถี่

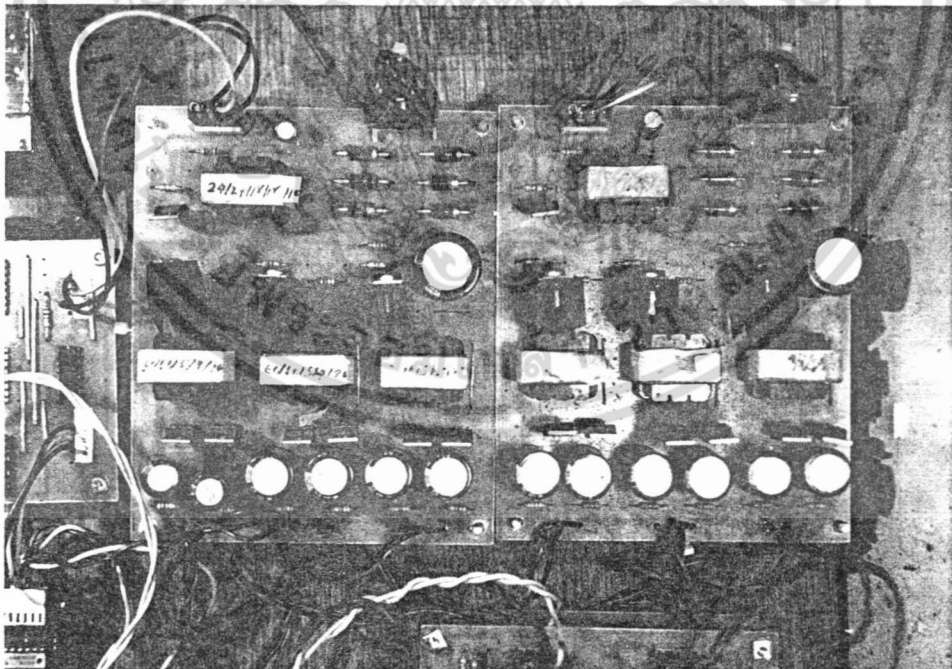


รูปที่ 4.20 ภาพวงจรสร้างรูปคลื่น PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

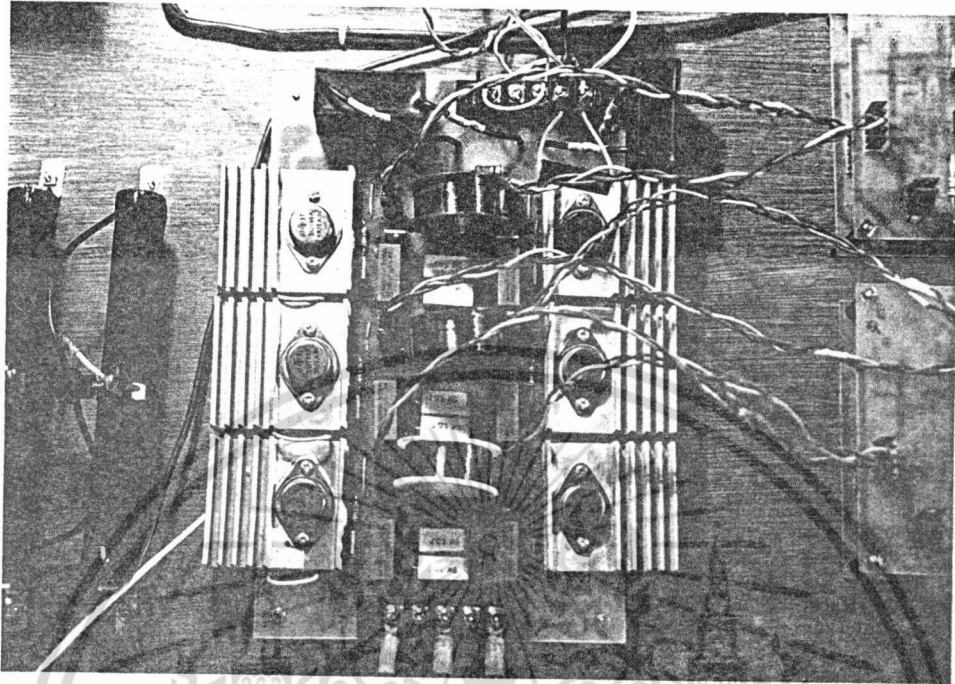


รูปที่ 4.21 ภาพชุดวงจรขับอินเวอร์เตอร์

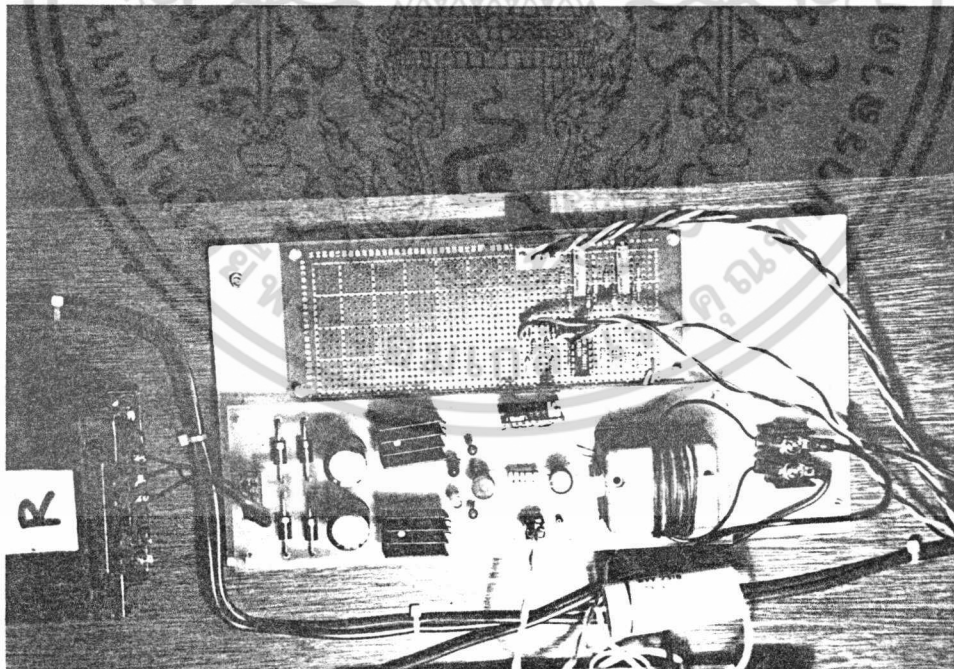


รูปที่ 4.22 ภาพวงจรแหล่งจ่ายไฟแบบสวิทชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

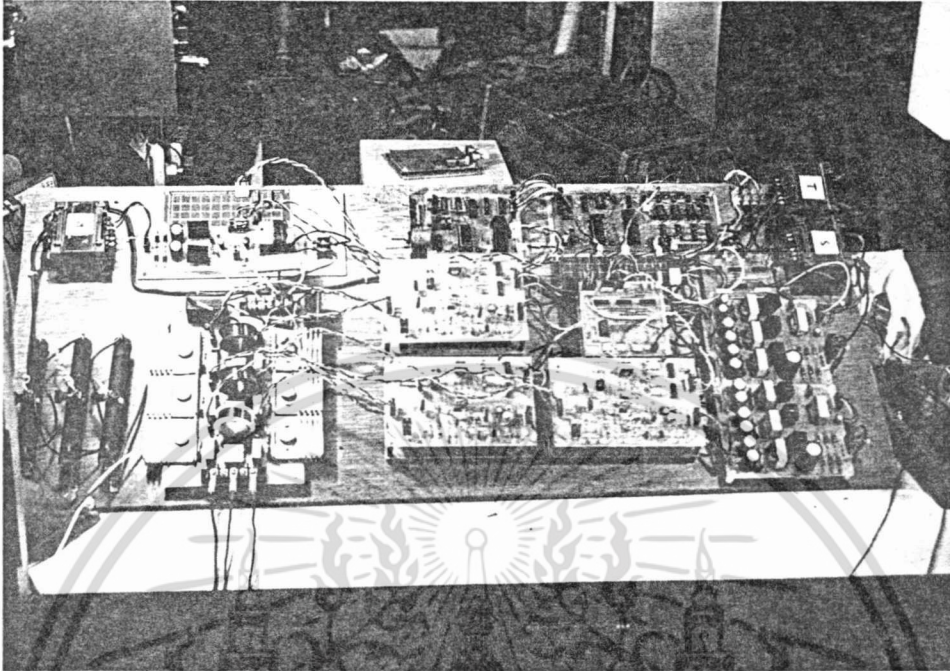


รูปที่ 4.23 ภาพวงจรทรานซิสเตอร์กำลัง



รูปที่ 4.24 ภาพวงจรตรวจสอบกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ภาพวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ผลการทดลอง

เมื่อนำชุดที่ออกแบบสร้างขึ้น มาทดลองขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 0.75 kW แล้ววัดรูปคลื่นสามเหลี่ยมเปรียบเทียบกับรูปคลื่นที่สร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ในสมการ (3.21) ด้วยวิธีมอดูเลทแบบยูนิฟอร์มแชนเปลิ่ง ที่ความถี่ต่างๆ ภายในช่วง FR ค่าต่างๆ จากชุดสร้างรูปคลื่น PWM ได้รูปสัญญาณดังรูปที่ 4.26 (ก)-(ข) ตามลำดับ เมื่อทำการวัดโวลต์เตจระหว่างเฟสจะ ได้ผลเป็นรูปคลื่นซายน์ ซึ่งจะแตกต่างกันไป ตามแต่รูปคลื่นที่ถูกสร้างขึ้นในช่วง FR ต่างๆ ดังรูปที่ 4.27 (ก)-(ข)

จากนั้นทำการวัดรูปคลื่นโวลต์ เตจที่มอเตอร์ เปรียบเทียบกับรูปคลื่นกระแส ในช่วง FR ต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.28 (ก)-(ข) ซึ่งจะเห็นว่ารูปคลื่นกระแสใกล้เคียงกับรูปคลื่นซายน์มาก

จากวงจรได้ออกแบบสวิตช์เพิ่มเติม เพื่อเลือกชนิดของรูปคลื่นที่นำมามอดูเลท เป็นฟังก์ชันซายน์ปกติ หรือมีฮาร์โมนิกที่ 3 รวมอยู่ด้วย เมื่อวัดแถบความถี่เปรียบเทียบกัน ได้ผลของแถบความถี่เมื่อวัดเฟสโวลต์เตจจากชุดสร้างสัญญาณ โดยลดความถี่จาก 100 Hz จนกระทั่งหยุด ดังรูปที่ 4.29 ซึ่งจะเห็นว่าที่ความถี่เป็น 0 Hz จะ ได้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ประมาณ 533 Hz และเมื่อเปลี่ยนทิศทางการหมุนของมอเตอร์ จะ ได้แถบความถี่ดังรูปที่ 4.30 เมื่อวัดแถบความถี่ที่ไลน์ของมอเตอร์ในทำนองเดียวกัน ได้ผลดังรูปที่ 4.31 และ 4.32 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าบางฮาร์โมนิกหายไป เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.29 และ 4.30 และจะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของแถบความถี่เป็นช่วงๆ โดยความถี่ฮาร์โมนิกในขณะที่ลดความถี่ของรูปคลื่นลง จะเปลี่ยนไปเกิดในช่วงที่ความถี่สูงขึ้น อันเป็นผลจากการเปลี่ยน FR ในขณะเปลี่ยนความถี่ของรูปคลื่น นอกจากนั้นในรูปที่ 4.33 แสดงให้เห็นผลของ stall protection เมื่อเร่งความเร็วขึ้น

เมื่อคัปปลิ่งมอเตอร์เข้ากับเอนเนอเรเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และวัดการเปลี่ยนแปลงความเร็วจากทาโคเอนเนอเรเตอร์ (Tacho-generator) โดยเปลี่ยนอัตราเร่งและอัตราหน่วง ระหว่าง 0 Hz กับ 100 Hz ได้ผลดังรูปที่ 4.34 ซึ่งเร่งด้วยเวลา 2 วินาที และหน่วงด้วยเวลา 10 วินาที ส่วนรูปที่ 4.35 จะกำหนดในทำนองกลับกัน เมื่อสังเกตการกลับทิศของมอเตอร์ดังรูปที่ 4.36 จะเห็นว่าความเร็วค่อยๆ ลดลงจนเป็นศูนย์ก่อน จึงเพิ่มความเร็วขึ้นในอีกทิศทางหนึ่ง ส่วนรูปที่ 4.37 เป็นผลที่เกิดขึ้นเมื่อต่อเอนเนอเรเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับหลอดไฟ โดยป้อนความถี่รูปคลื่น PWM 100 Hz ให้แก่มอเตอร์ และเพิ่มหลอดไฟทีละดวง ทำการวัดกำลังไฟฟ้าที่หลอดไฟ พบว่าความเร็วเป็น 2906 rpm

เมื่อไม่มีโหลดไฟ และความเร็วลดลงเป็น 2872, 2834, 2784 และ 2712 rpm เมื่อเพิ่มโหลดไฟเข้าไปที่ละโหลดและวัตกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่โหลดไฟเป็น 118.3, 226.1, 322.9 และ 407.7 วัตต์ ตามลำดับ จนกระทั่งถึงระดับที่แรงบิดที่โหลดเกินแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ที่ความถี่ 100 Hz ทำให้ความเร็วมอเตอร์ลดลงจนเป็นศูนย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DATE: 06-03-1998
 TIME: 16:20:02

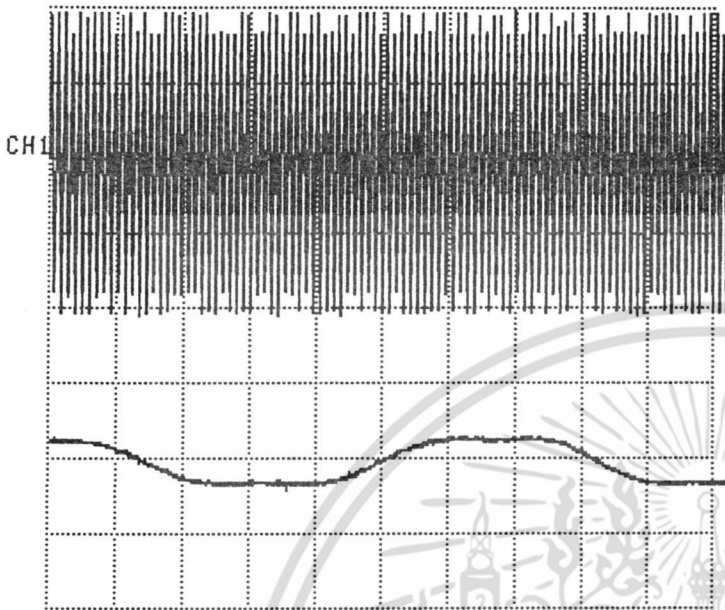
SIGNALPARAMETER:

CH1 - VOLTS/DIV: 5 V
 CH2 - VOLTS/DIV: 5 V
 TIMEBASE-SEC/DIV: 20ms

PRINTERPARAMETER:

ZOOMRANGE - CH1:0-9
 ZOOMRANGE - CH2:0-9
 HARDCOPY SOURCE :HM 205-3

REMARKS:



(ก) gear = 0 FR = free running

DATE: 06-03-1998
 TIME: 16:22:04

SIGNALPARAMETER:

CH1 - VOLTS/DIV: 5 V
 CH2 - VOLTS/DIV: 5 V
 TIMEBASE-SEC/DIV: 10ms

PRINTERPARAMETER:

ZOOMRANGE - CH1:0-9
 ZOOMRANGE - CH2:0-9
 HARDCOPY SOURCE :HM 205-3

REMARKS:



(ข) gear = 1 FR = 30

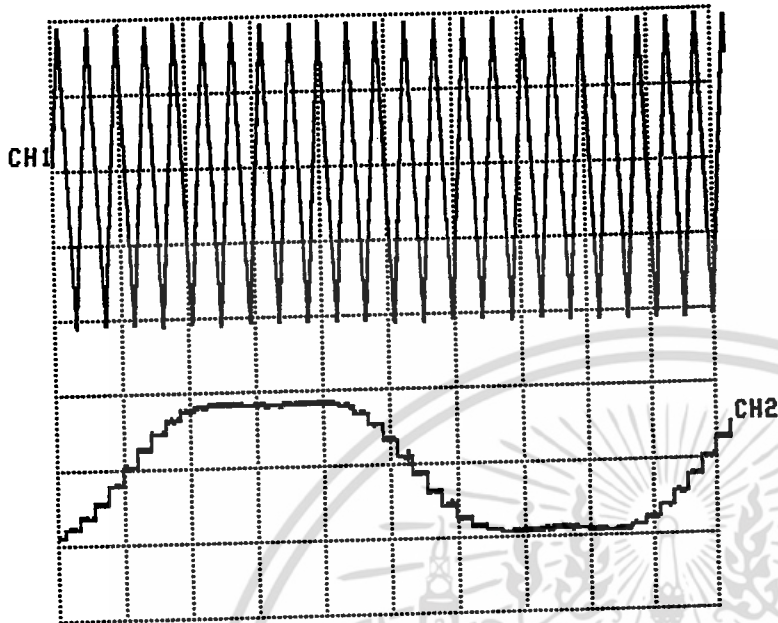
รูปที่ 4.26 รูปคลื่นสามเหลี่ยมเทียบกับรูปคลื่นหน้ามอดูเลขที่ FR ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DATE: 06-03-1990
 TIME: 16:23:58

SIGNALPARAMETER:

CH1 - VOLTS/DIV: 5 V
 CH2 - VOLTS/DIV: 5 V
 TIMEBASE-SEC/DIV: 5ms



PRINTERPARAMETER:

ZOOMRANGE - CH1:0-9
 ZOOMRANGE - CH2:0-9
 HARDCOPY SOURCE :HM 205-3

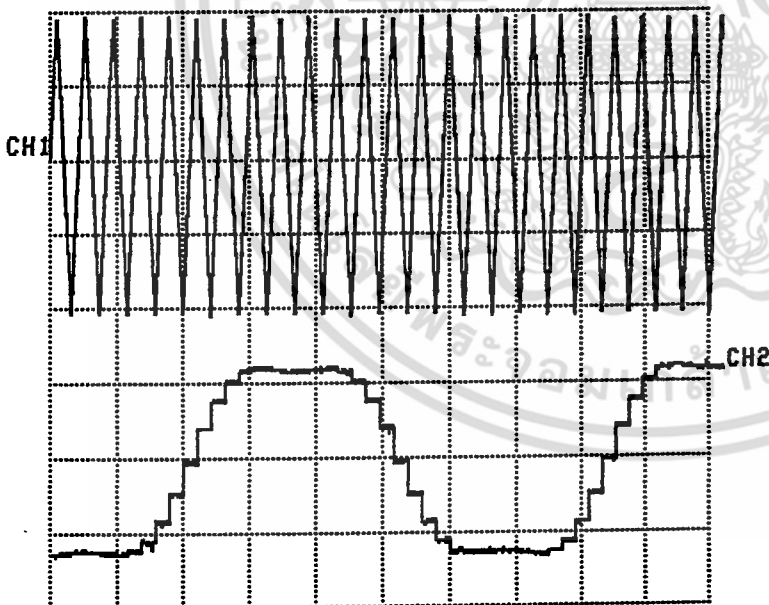
REMARKS:

(ค) gear = 2 FR = 20

DATE: 06-03-1990
 TIME: 16:26:00

SIGNALPARAMETER:

CH1 - VOLTS/DIV: 5 V
 CH2 - VOLTS/DIV: 5 V
 TIMEBASE-SEC/DIV: 5ms



PRINTERPARAMETER:

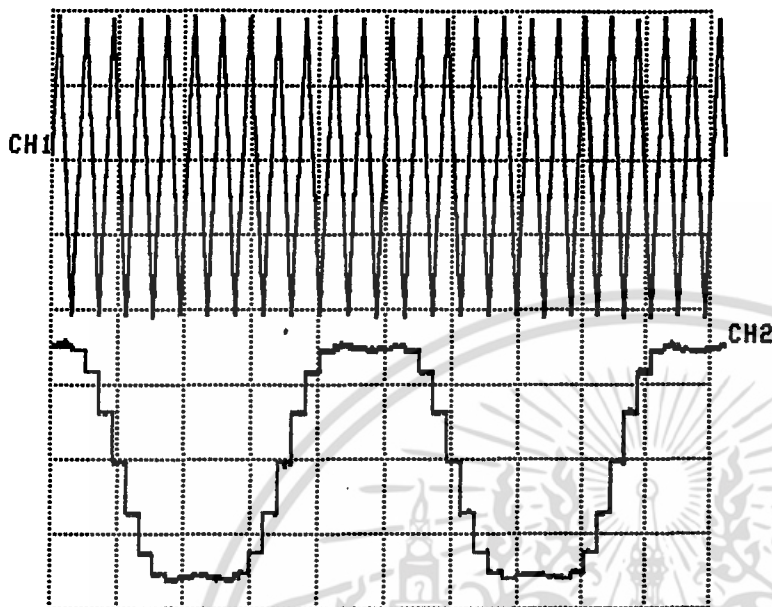
ZOOMRANGE - CH1:0-9
 ZOOMRANGE - CH2:0-9
 HARDCOPY SOURCE :HM 205-3

REMARKS:

(ง) gear = 3 FR = 15

รูปที่ 4.26(ต่อ) รูปคลื่นสามเหลี่ยมเทียบกับรูปคลื่นที่นำมาถอดเลขที่ FR ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



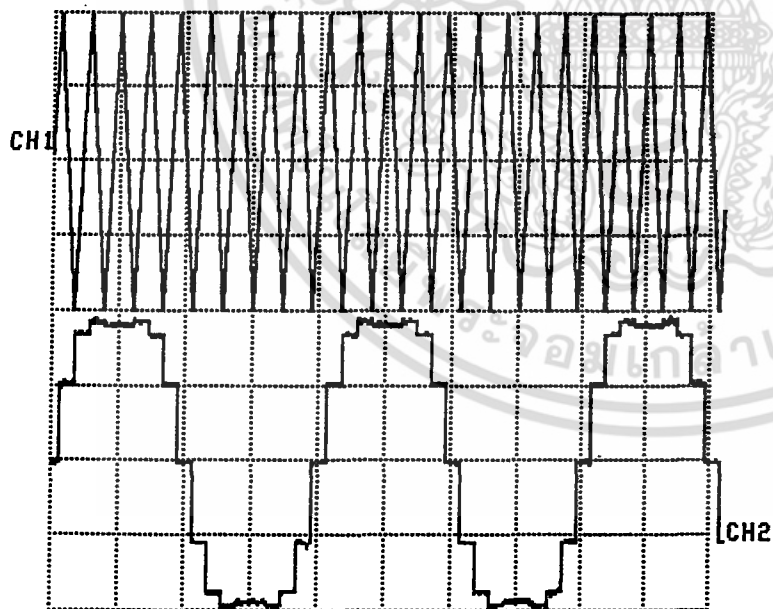
DATE: 06-03-1990
TIME: 16:29:57

SIGNALPARAMETER:
CH1 - VOLTS/DIV: 5 V
CH2 - VOLTS/DIV: 5 V
TIMEBASE-SEC/DIV: 5ms

PRINTERPARAMETER:
ZOOMRANGE - CH1:0-9
ZOOMRANGE - CH2:0-9
HARDCOPY SOURCE :HM 205-3

REMARKS:

(จ) gear = 4 FR = 12



DATE: 06-03-1990
TIME: 16:31:35

SIGNALPARAMETER:
CH1 - VOLTS/DIV: 5 V
CH2 - VOLTS/DIV: 5 V
TIMEBASE-SEC/DIV: 5ms

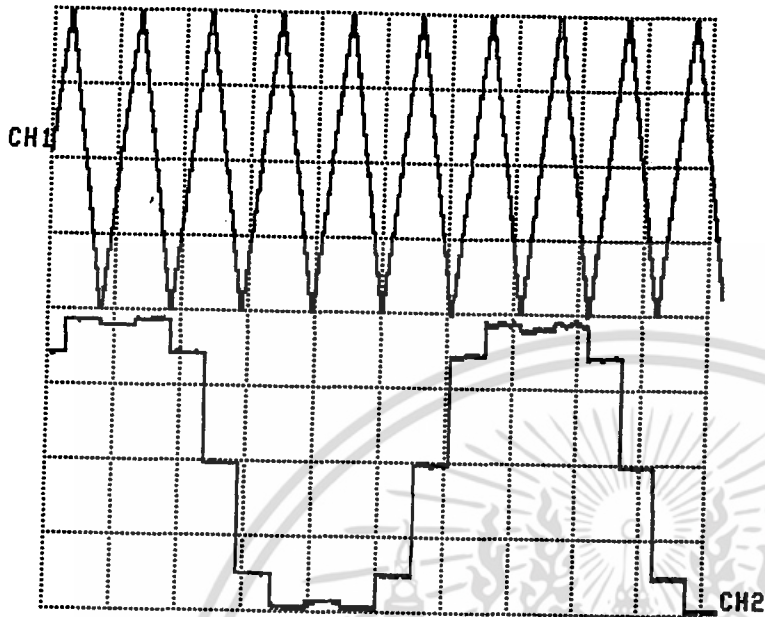
PRINTERPARAMETER:
ZOOMRANGE - CH1:0-9
ZOOMRANGE - CH2:0-9
HARDCOPY SOURCE :HM 205-3

REMARKS:

(ฉ) gear = 5 FR = 9

รูปที่ 4.26(ต่อ) รูปคลื่นสามเหลี่ยมเทียบกับรูปคลื่นที่นำมาถอดเลขที่ FR ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DATE: 06-03-1990
TIME: 16:34:28

SIGNALPARAMETER:

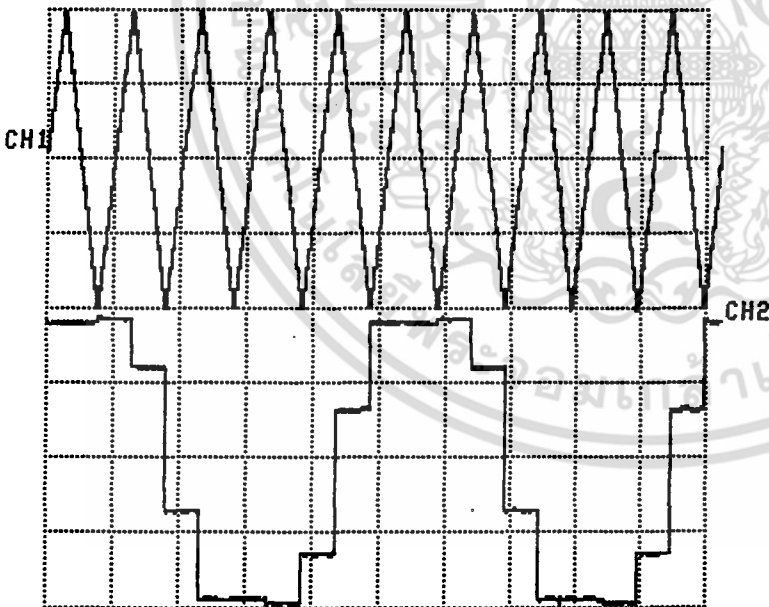
CH1 - VOLTS/DIV: 5 V
CH2 - VOLTS/DIV: 5 V
TIMEBASE-SEC/DIV: 2ms

PRINTERPARAMETER:

ZOOMRANGE - CH1:0-9
ZOOMRANGE - CH2:0-9
HARDCOPY SOURCE :HM 205-3

REMARKS:

(ข) gear = 6 FR = 6



DATE: 06-03-1990
TIME: 16:36:59

SIGNALPARAMETER:

CH1 - VOLTS/DIV: 5 V
CH2 - VOLTS/DIV: 5 V
TIMEBASE-SEC/DIV: 2ms

PRINTERPARAMETER:

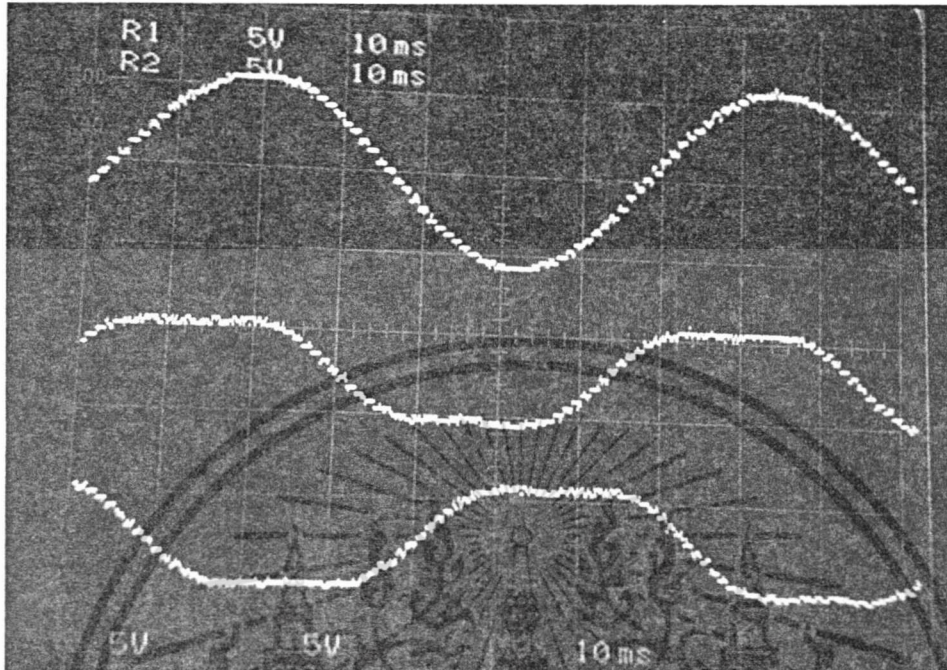
ZOOMRANGE - CH1:0-9
ZOOMRANGE - CH2:0-9
HARDCOPY SOURCE :HM 205-3

REMARKS:

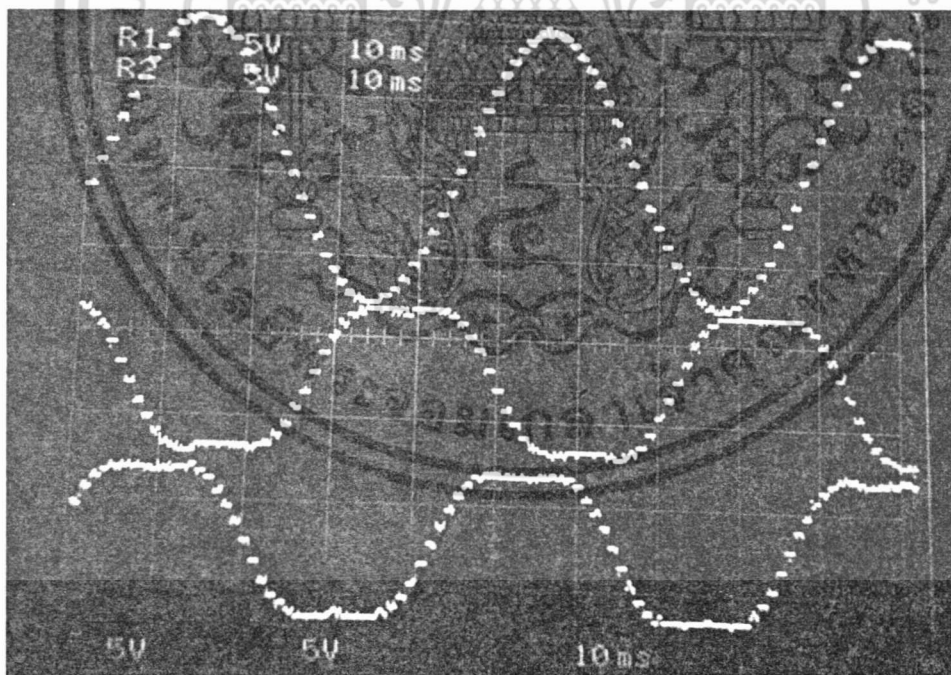
(ข) gear = 7 FR = 5

รูปที่ 4.26(ต่อ) รูปคลื่นสามเหลี่ยมเทียบกับรูปคลื่นที่นำมาถอดเลขที่ FR ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



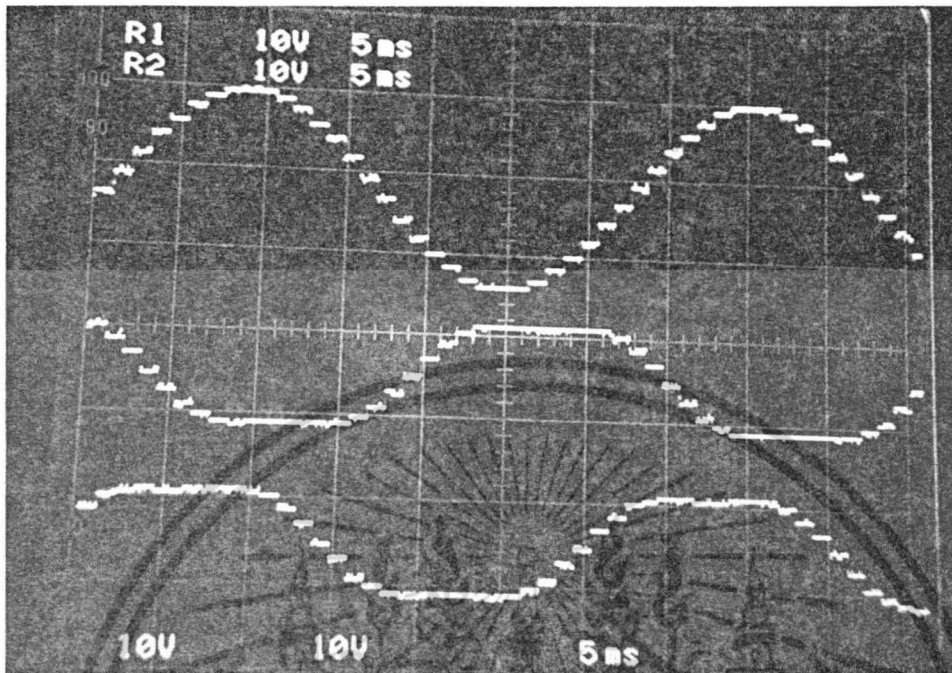
(ก) gear = 1 FR = 30



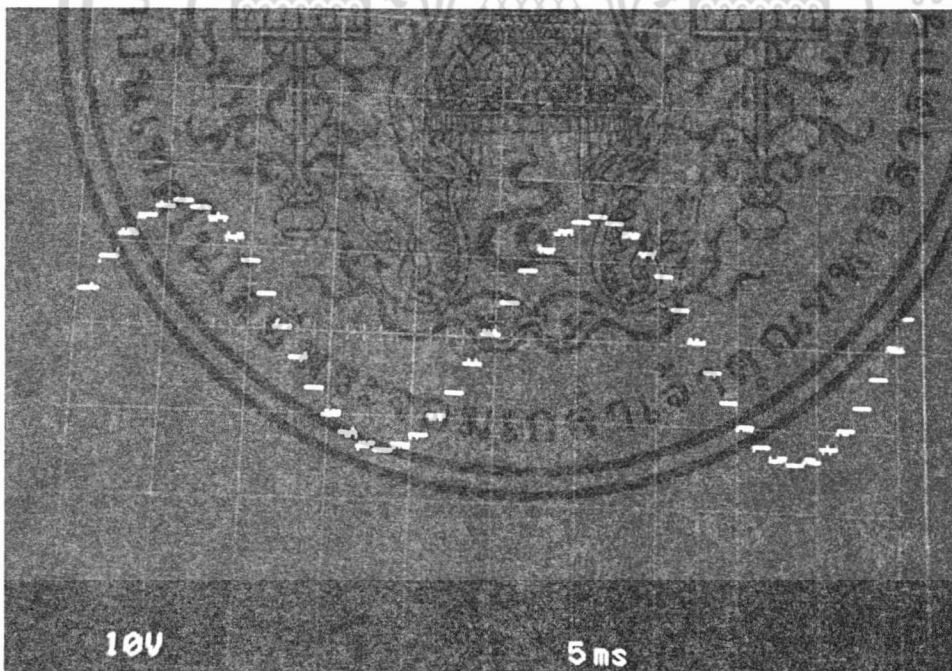
(ข) gear = 2 FR = 20

รูปที่ 4.27 รูปคลื่นโวลต์เตจระหว่างเฟสที่ FR ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



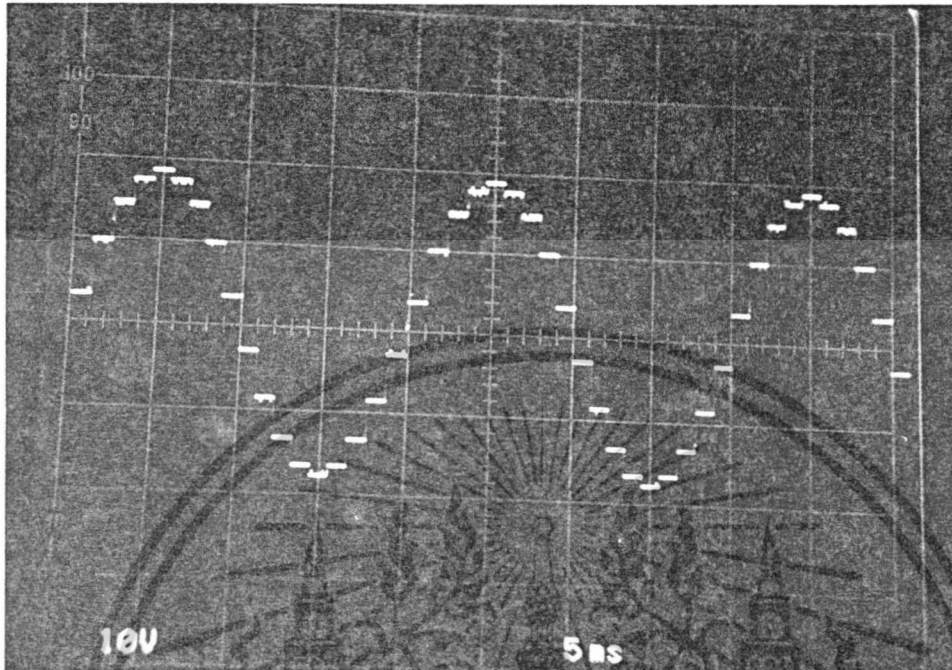
(ค) gear = 3 FR = 15



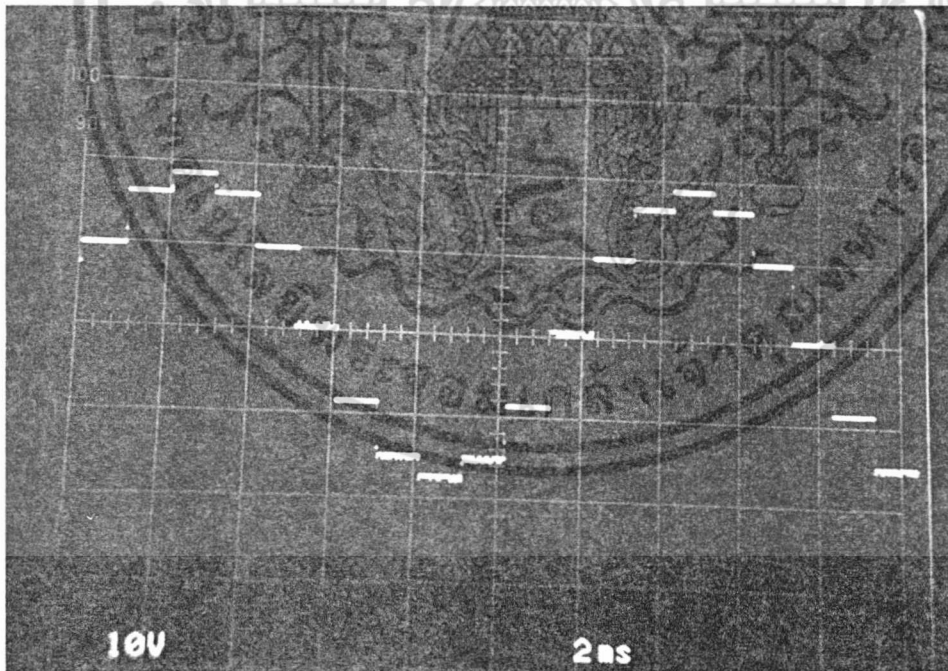
(ง) gear = 4 FR = 12

รูปที่ 4.27 (ต่อ) รูปคลื่นโวลต์เตจระหว่างเฟสที่ FR ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



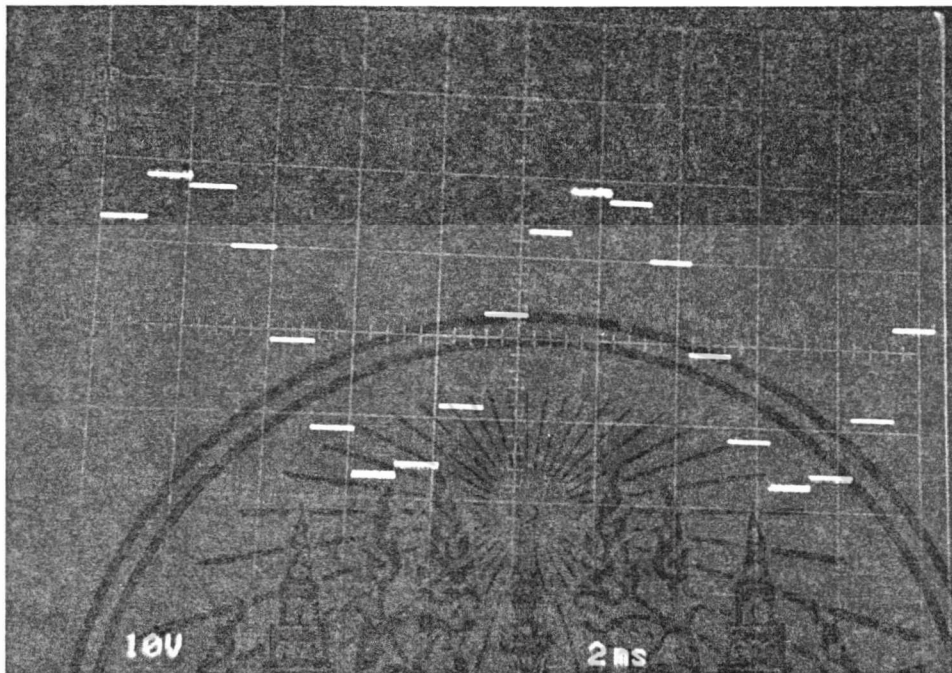
(จ) gear = 5 FR = 9



(ฉ) gear = 6 FR = 6

รูปที่ 4.27 (ต่อ) รูปคลื่นโวลต์เตจระหว่างเฟสที่ FR ต่างๆ

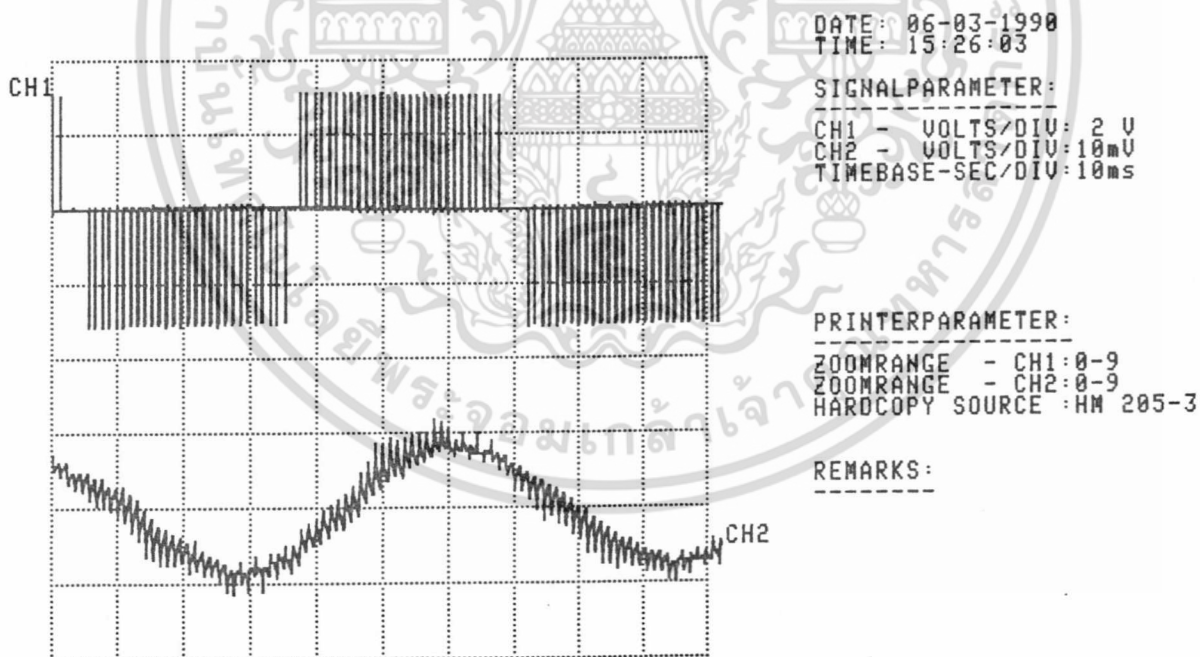
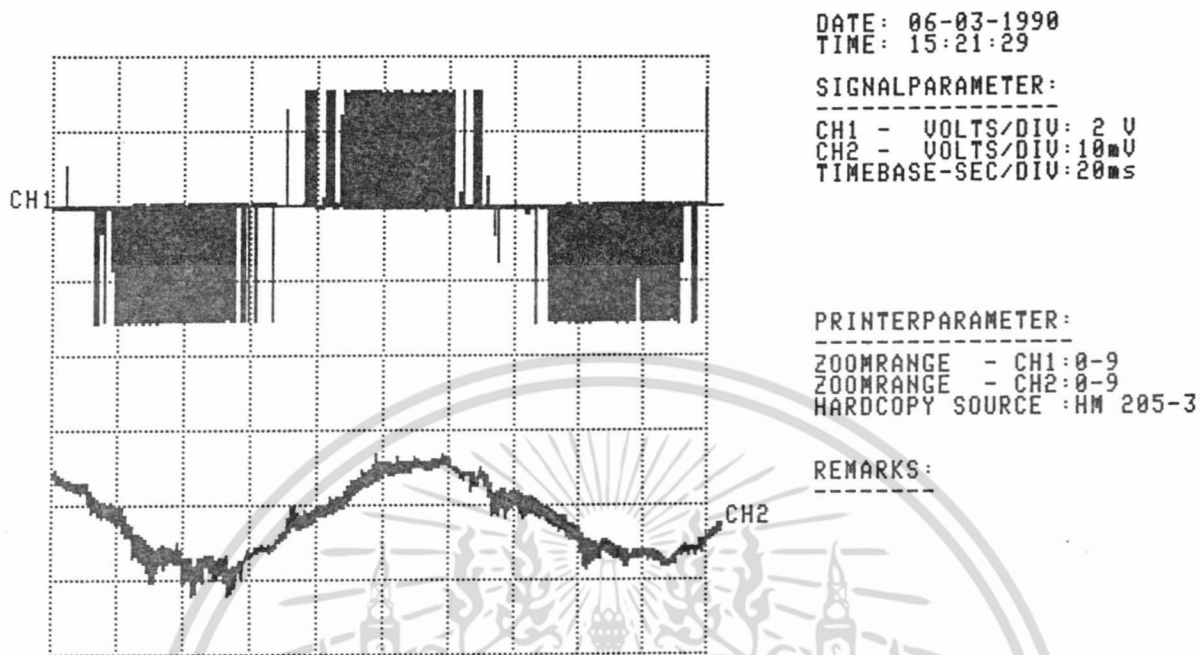
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) gear = 7 FR = 5

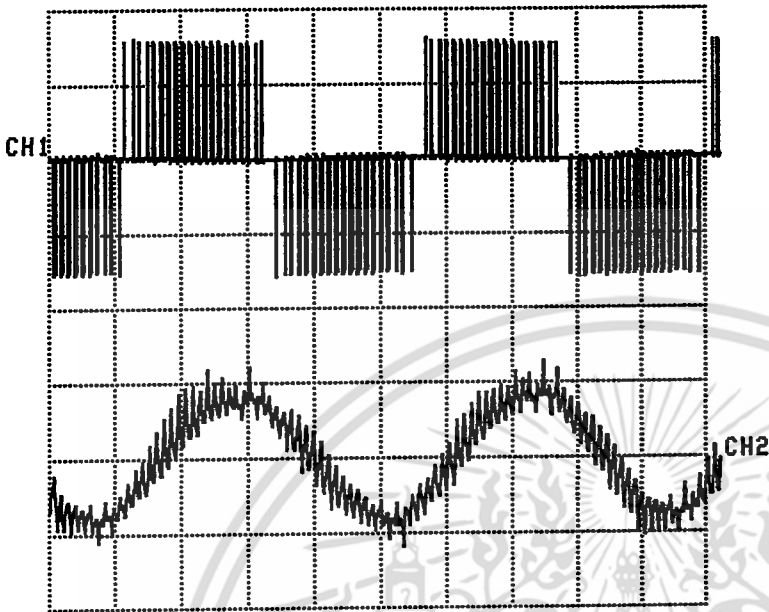
รูปที่ 4.27(ต่อ) รูปคลื่นโวลต์เตจระหว่างเฟสที่ FR ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 รูปคลื่น ไลน์โวลต์เตจที่มอเตอร์เทียบกับรูปคลื่นกระแสที่ FR ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DATE: 06-03-1990
TIME: 15:28:06

SIGNALPARAMETER:

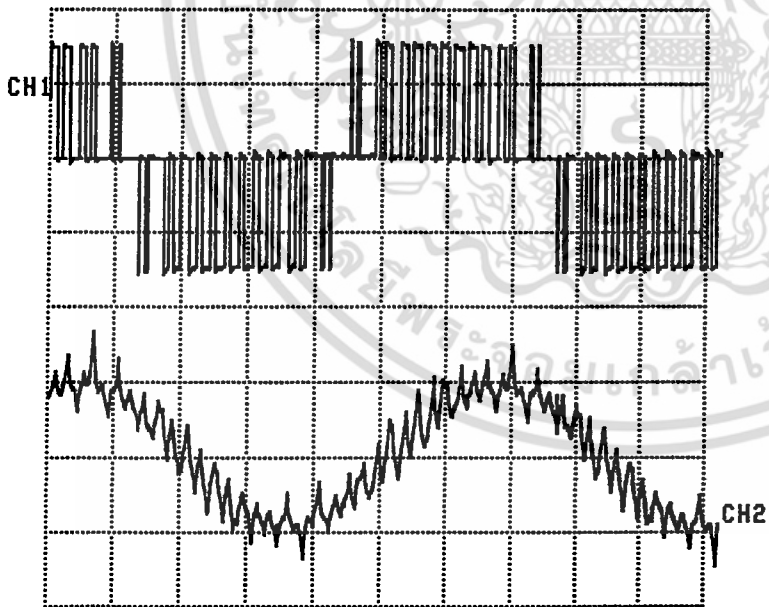
CH1 - VOLTS/DIV: 2 V
CH2 - VOLTS/DIV: 10mV
TIMEBASE-SEC/DIV: 10ms

PRINTERPARAMETER:

ZOOMRANGE - CH1:0-9
ZOOMRANGE - CH2:0-9
HARDCOPY SOURCE : HM 205

REMARKS:

(ค) gear = 2 FR = 20



DATE: 06-03-1990
TIME: 15:30:50

SIGNALPARAMETER:

CH1 - VOLTS/DIV: 2 V
CH2 - VOLTS/DIV: 10mV
TIMEBASE-SEC/DIV: 5ms

PRINTERPARAMETER:

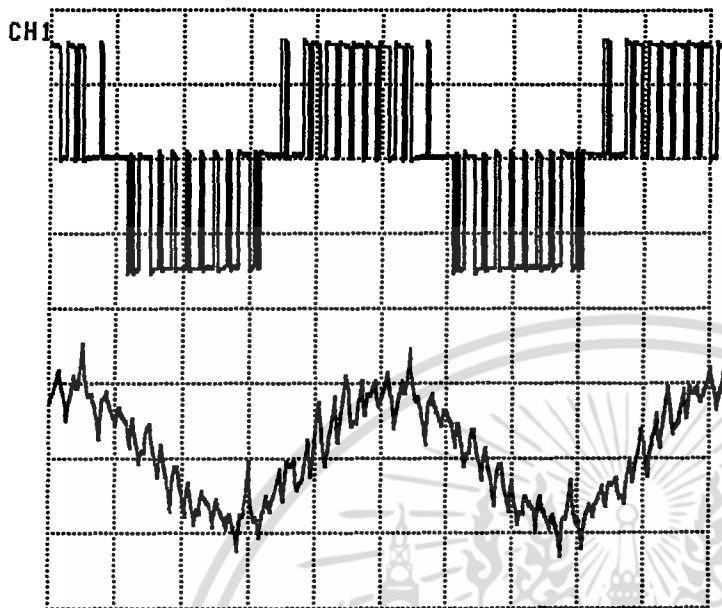
ZOOMRANGE - CH1:0-9
ZOOMRANGE - CH2:0-9
HARDCOPY SOURCE : HM 205-3

REMARKS:

(ง) gear = 3 FR = 15

รูปที่ 4.28(ต่อ) รูปคลื่น ไลน์โวลต์ เตจที่มอเตอร์ เทียบกับรูปคลื่นกระแสที่ FR ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) gear = 4 FR = 12

DATE: 06-03-1990
TIME: 15:35:44

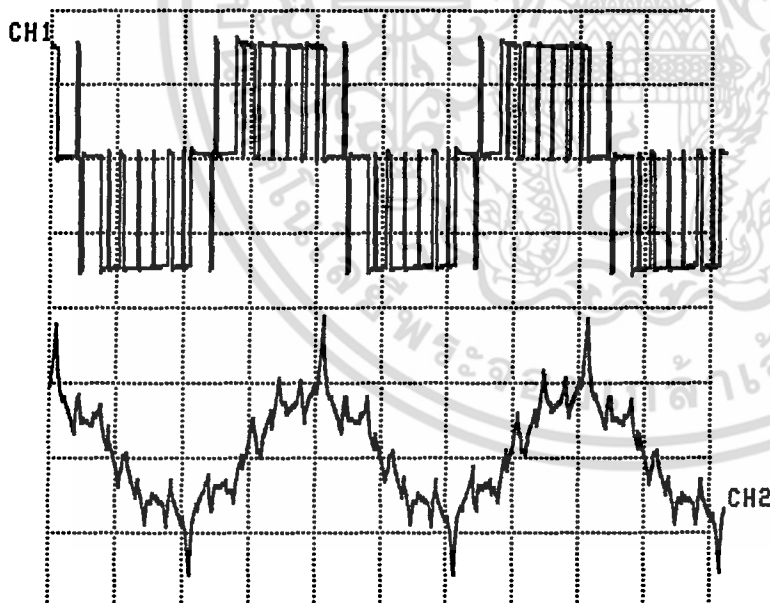
SIGNALPARAMETER:

CH1 - VOLTS/DIV: 2 V
CH2 - VOLTS/DIV: 10mV
TIMEBASE-SEC/DIV: 5ms

PRINTERPARAMETER:

ZOOMRANGE - CH1:0-9
ZOOMRANGE - CH2:0-9
HARDCOPY SOURCE :HM 205-3

REMARKS:



(ฉ) gear = 5 FR = 9

DATE: 06-03-1990
TIME: 15:37:46

SIGNALPARAMETER:

CH1 - VOLTS/DIV: 2 V
CH2 - VOLTS/DIV: 10mV
TIMEBASE-SEC/DIV: 5ms

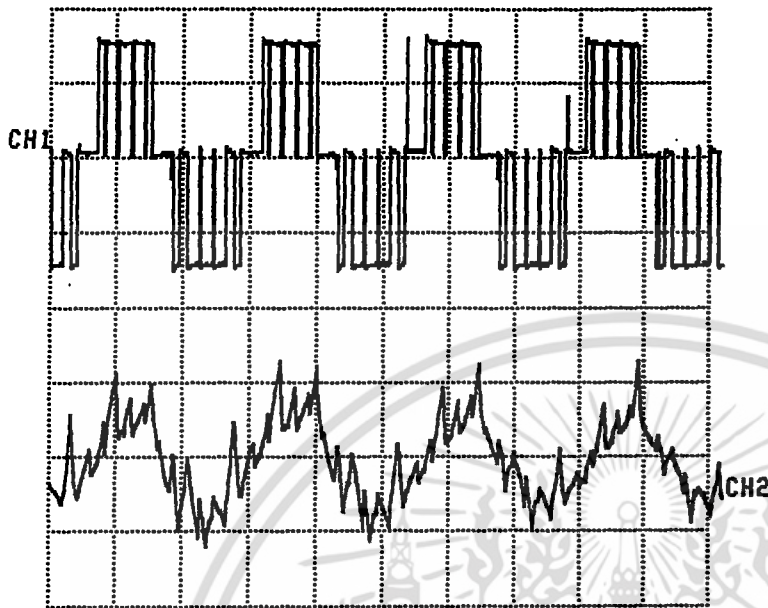
PRINTERPARAMETER:

ZOOMRANGE - CH1:0-9
ZOOMRANGE - CH2:0-9
HARDCOPY SOURCE :HM 205-3

REMARKS:

รูปที่ 4.28(ต่อ) รูปคลื่นไลน์โวลต์เตจที่มอเตอร์เทียบกับรูปคลื่นกระแสที่ FR ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



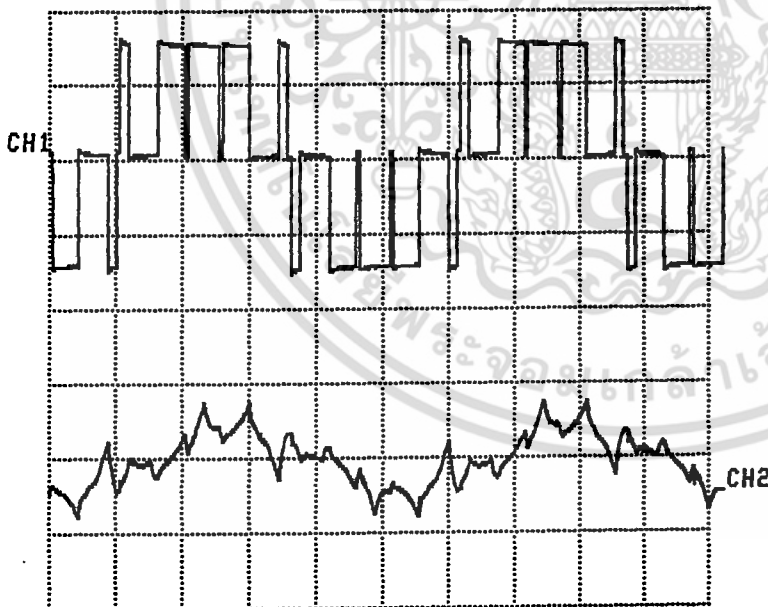
DATE: 06-03-1990
TIME: 15:49:40

SIGNALPARAMETER:
CH1 - VOLTS/DIV: 2 V
CH2 - VOLTS/DIV: 10mV
TIMEBASE-SEC/DIV: 5ms

PRINTERPARAMETER:
ZOOMRANGE - CH1:0-9
ZOOMRANGE - CH2:0-9
HARDCOPY SOURCE : HM 205-3

REMARKS:

(๗) gear = 6 FR = 6



DATE: 06-03-1990
TIME: 15:52:43

SIGNALPARAMETER:
CH1 - VOLTS/DIV: 2 V
CH2 - VOLTS/DIV: 10mV
TIMEBASE-SEC/DIV: 2ms

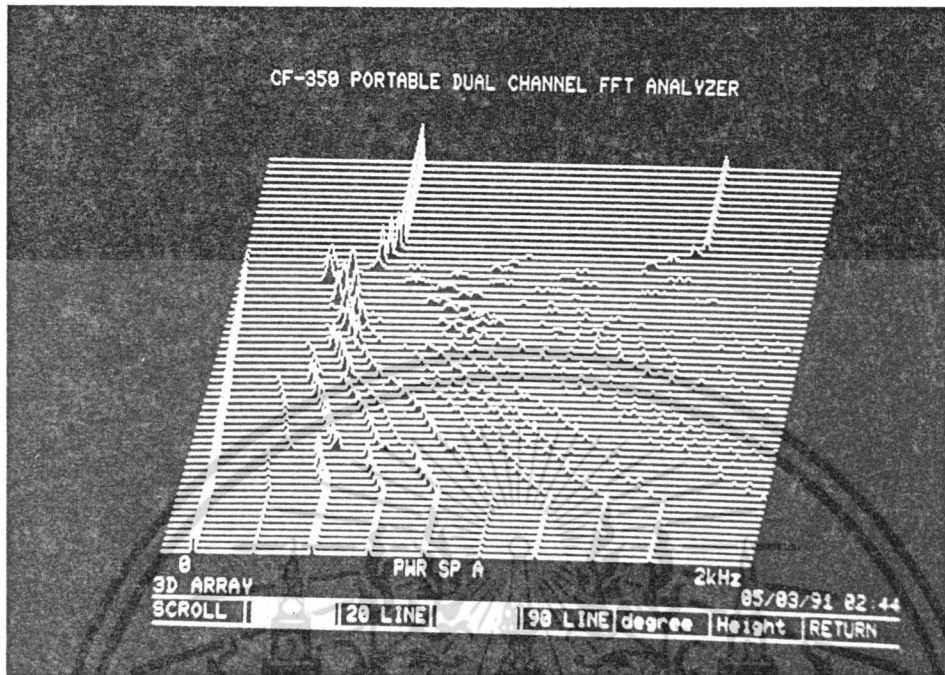
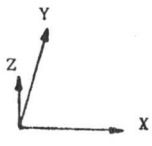
PRINTERPARAMETER:
ZOOMRANGE - CH1:0-9
ZOOMRANGE - CH2:0-9
HARDCOPY SOURCE : HM 205-3

REMARKS:

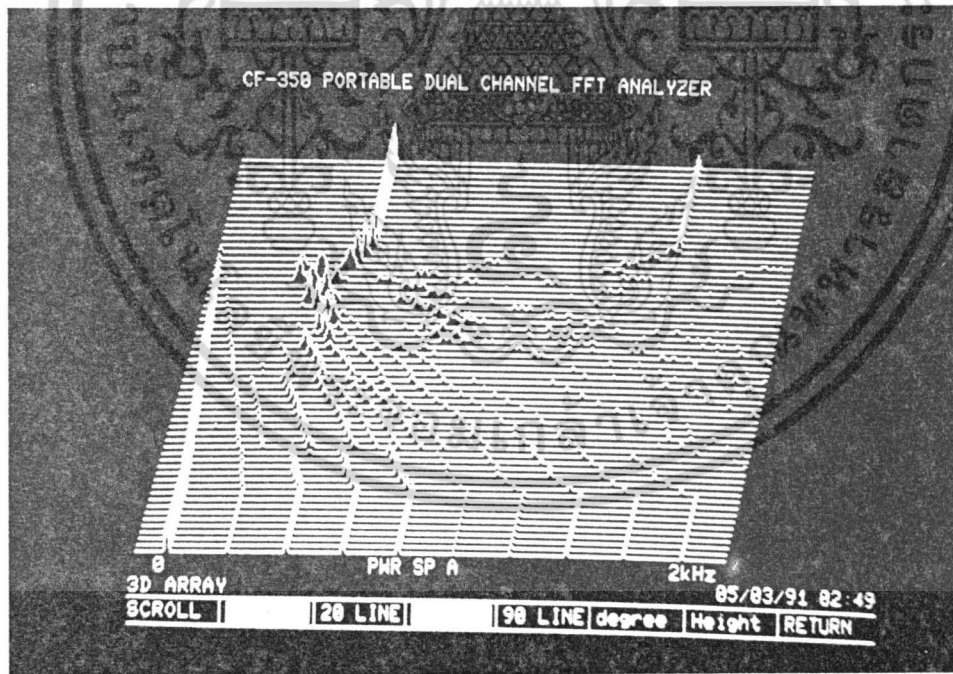
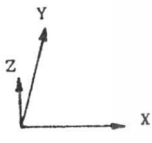
(๗) gear = 7 FR = 5

รูปที่ 4.28(ต่อ) รูปคลื่นไลน์โวลต์เตจที่มอเตอร์เทียบกับรูปคลื่นกระแสที่ FR ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) มอดเลตด้วยรูปคลื่นซายน์

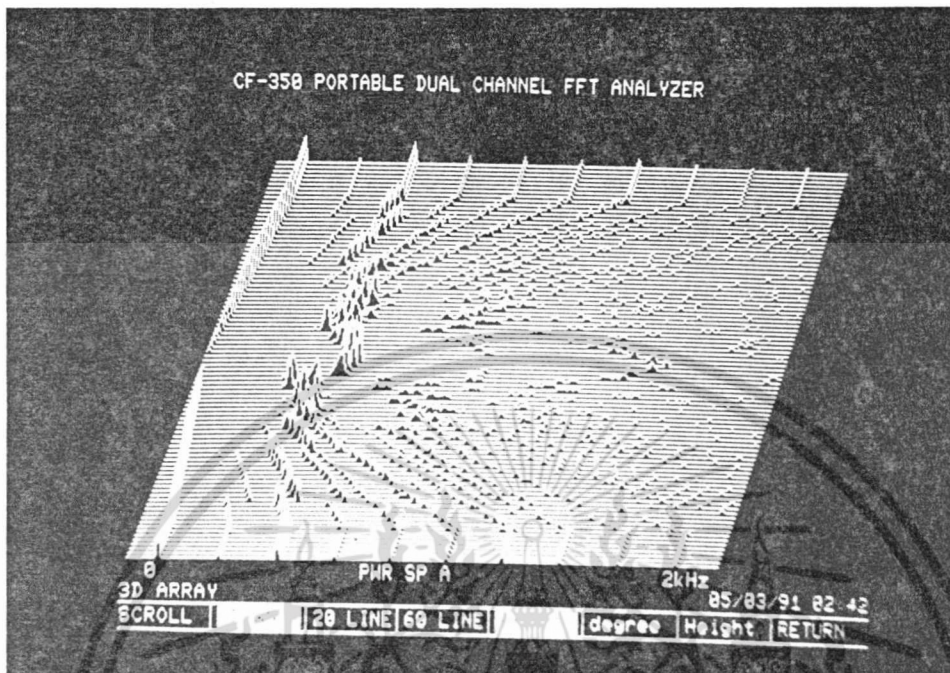
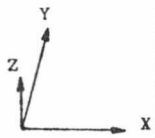


(ข) มอดเลตด้วยรูปคลื่นซายน์บวกฮาร์โมนิคที่ 3

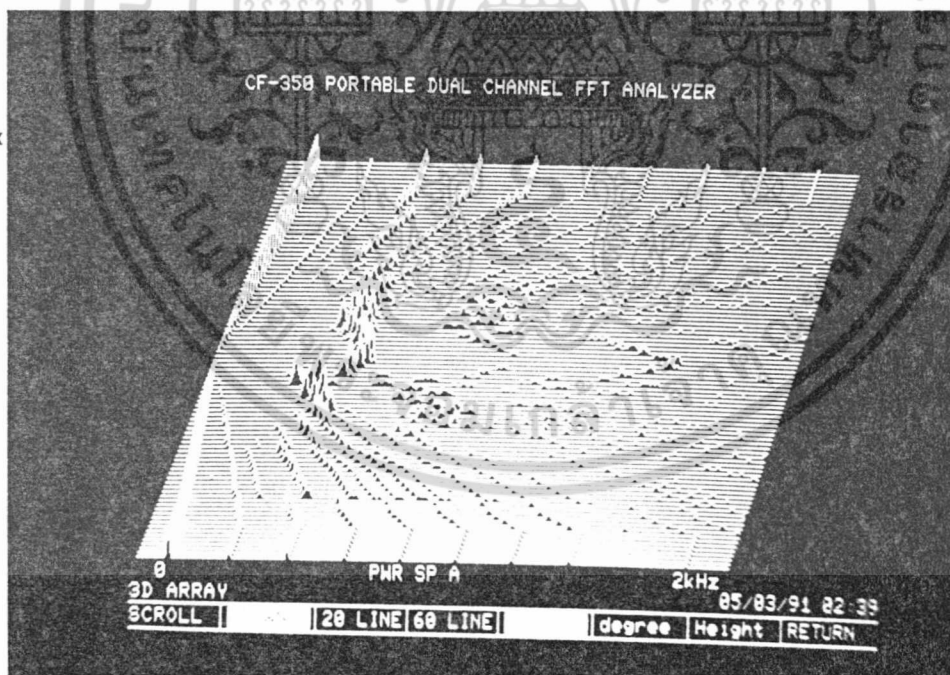
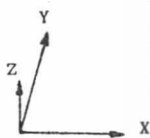
รูปที่ 4.29 ภาพ 3 มิติแสดงแถบความถี่ของเฟสโวลต์เตจของรูปคลื่น PWM เมื่อลดความถี่ลงจาก 100 Hz

โดย X = ความถี่ Y = เวลา Z = แอมพลิจูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) มอดเลตด้วยรูปคลื่นซายน์

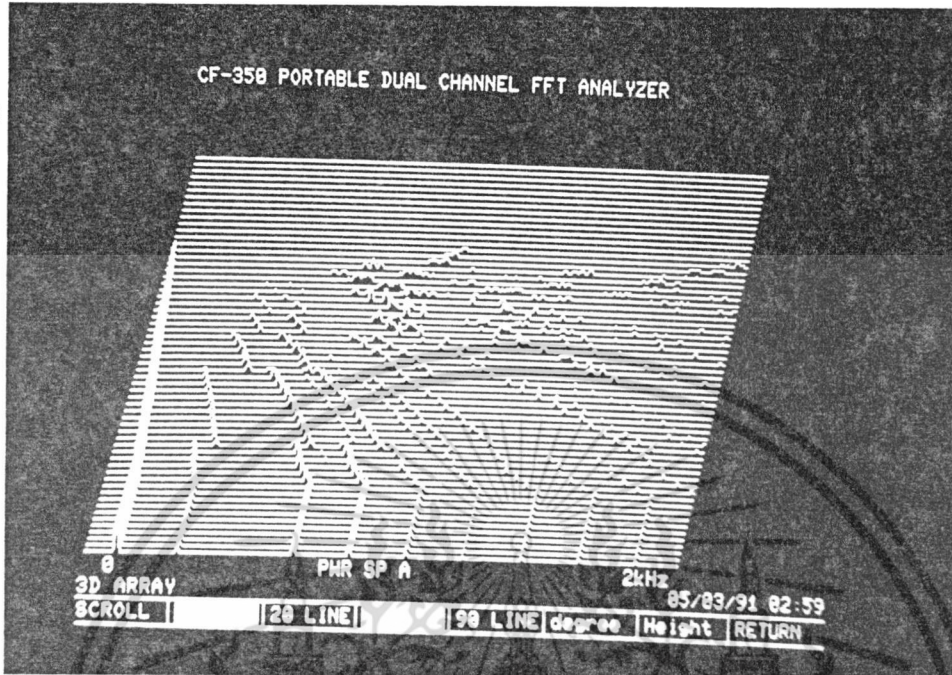
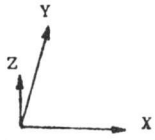


(ข) มอดดูเลตด้วยรูปคลื่นซายน์บวกฮาร์โมนิคที่ 3

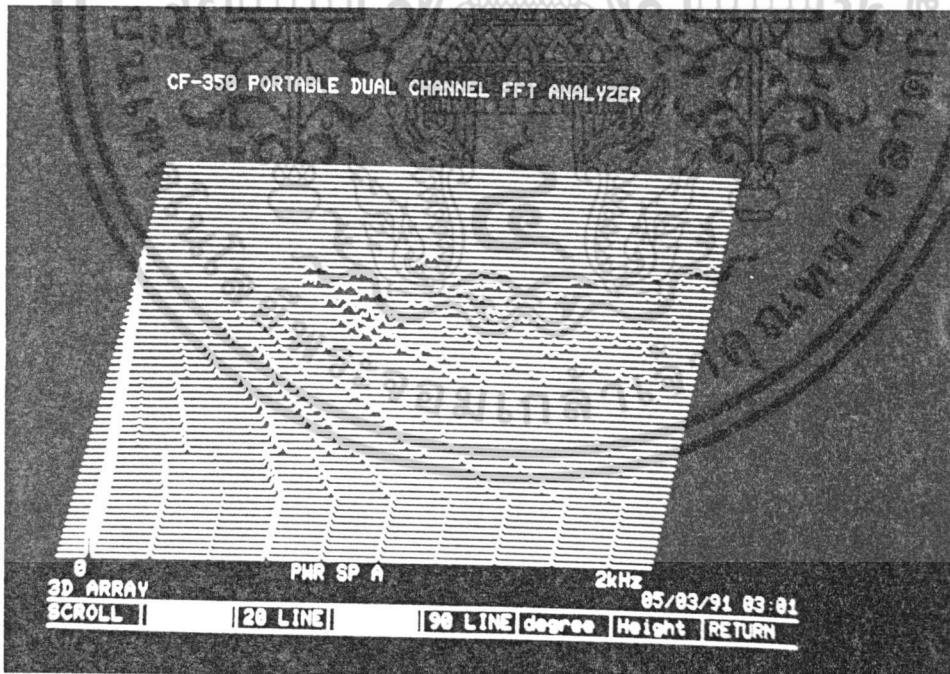
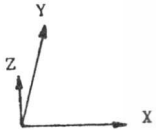
รูปที่ 4.30 ภาพ 3 มิติแสดงแถบความถี่ของเฟสโวลต์เตจจของรูปคลื่น PWM

เมื่อกลับทิศทางการหมุนมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดย X ว่า ความถี่ ซึ่ง Y เป็นที่ เวลา ซึ่ง Z เป็นแอมพลิจูด ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) มอดเลทด้วยรูปคลื่นชานัน

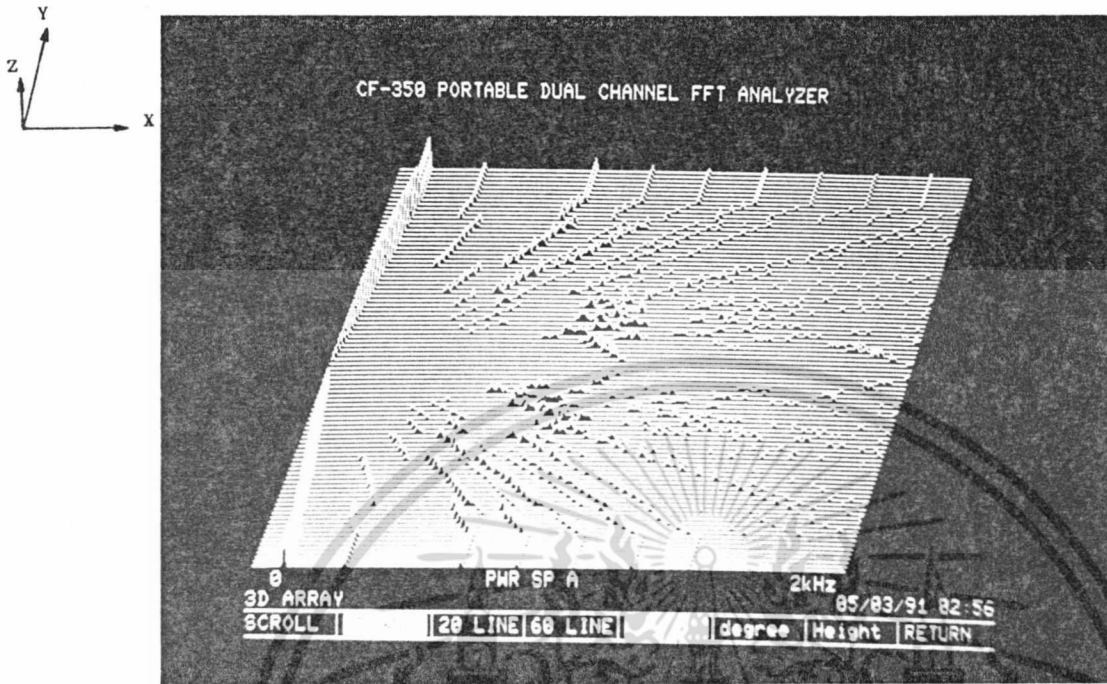


(ข) มอดเลทด้วยรูปคลื่นชานันบวกฮาร์โมนิคที่ 3

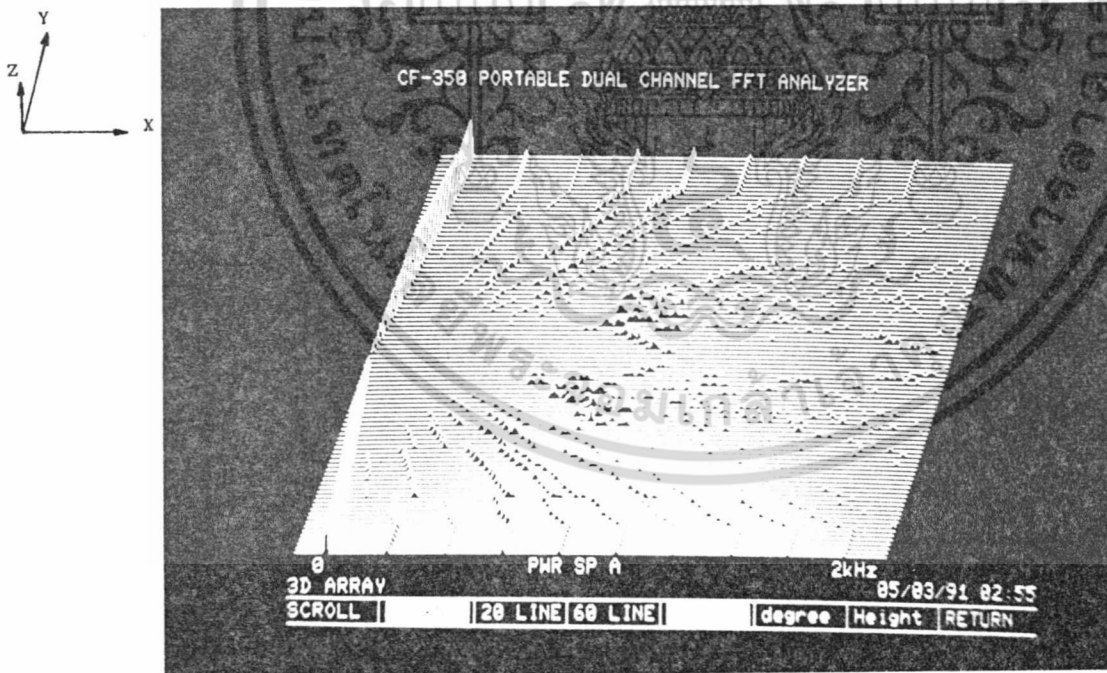
รูปที่ 4.31 ภาพ 3 มิติแสดงแถบความถี่ของไลน์โวลต์เตจของรูปคลื่น PWM

เมื่อลดความถี่ลงจาก 100 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารโดย X = ความถี่ ใช้ Y = เวลา Z = แอมพลิจูด ไม่สามารถนำออกจากรายงานเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยโดยไม่ขออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) มอดเลทด้วยรูปคลื่นซายน์

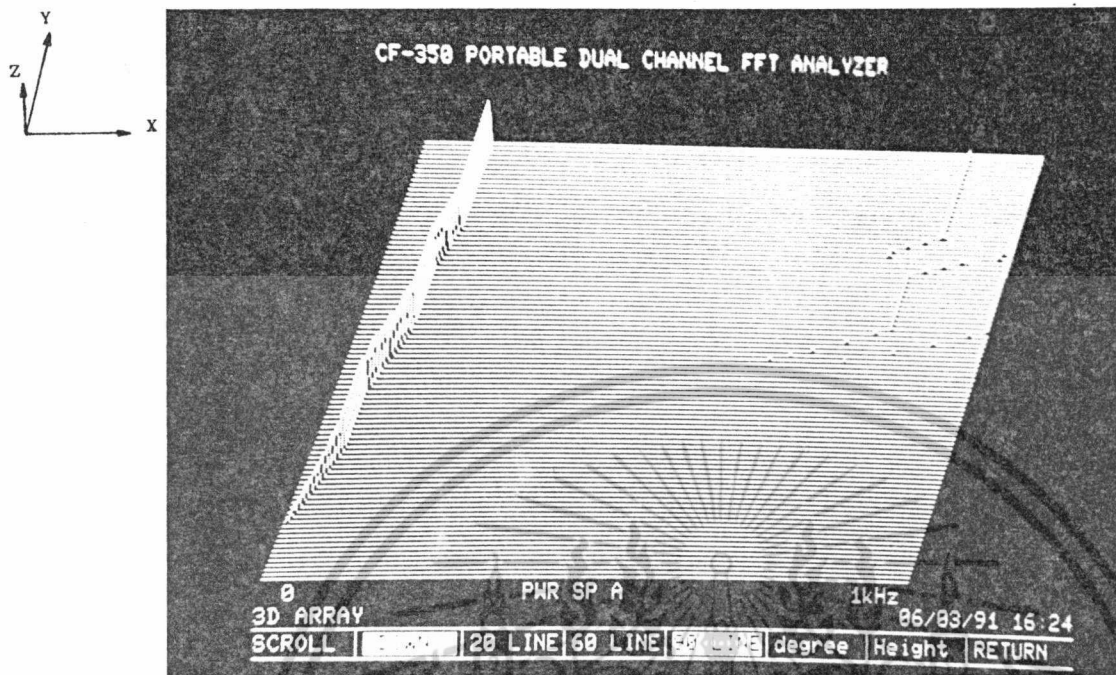


(ข) มอดเลทด้วยรูปคลื่นซายน์บวกฮาร์โมนิคที่ 3

รูปที่ 4.32 ภาพ 3 มิติแสดงแถบความถี่ของไลน์โวลต์เตจของรูปคลื่น PWM

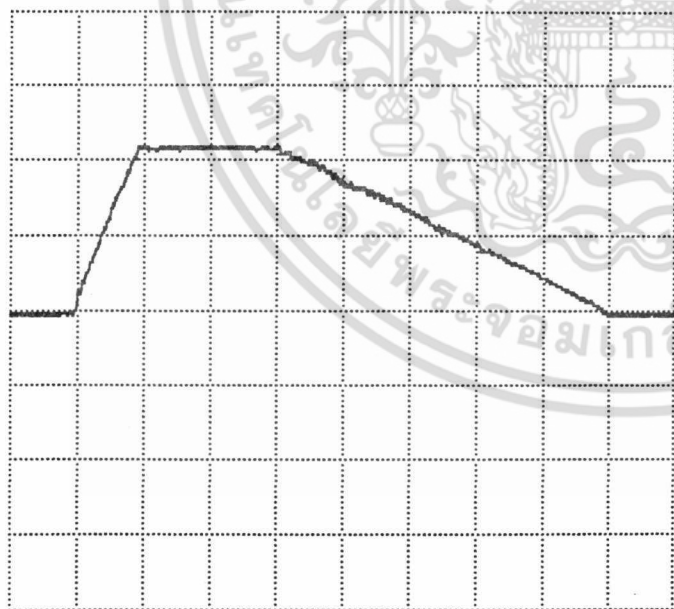
เมื่อกลับทิศทางการหมุนมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดย X รั้วความถี่ ซึ่งใช้ในเวลาที่ศึกษา Z ภาแนมปลิวดู ภาตให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 ภาพ 3 มิติแสดงผลของ stall protection เมื่อเร่งความเร็ว

โดย X = ความถี่ Y = เวลา Z = แอมพลิจูด



DATE: 11-05-1990
TIME: 12:17:45

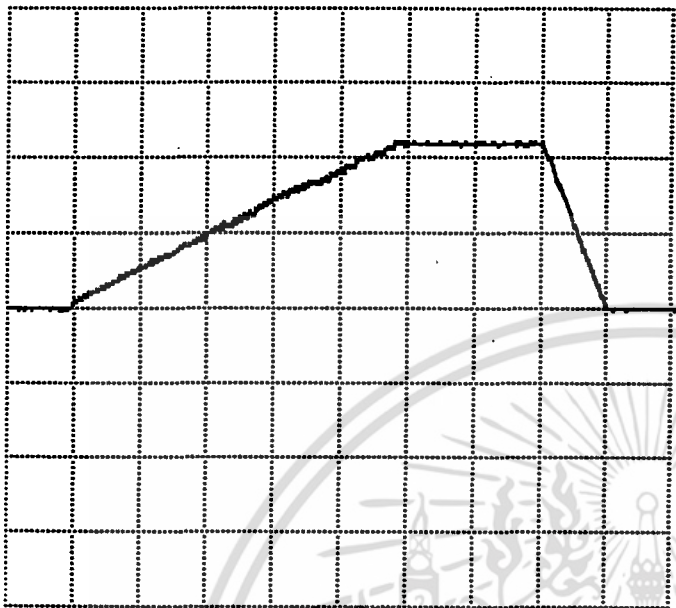
SIGNALPARAMETER:
CH1 - VOLTS/DIV: 5 V
TIMEBASE-SEC/DIV: 2 s

PRINTERPARAMETER:
ZOOMRANGE - CH1:0-9
HARDCOPY SOURCE :HM 205-3

REMARKS:

รูปที่ 4.34 ผลของการปรับอัตราเร่งและอัตราหน่วง โดยเร่งเร็วกว่าหน่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DATE: 11-05-1990
TIME: 12:22:41

SIGNALPARAMETER:

CH1 - VOLTS/DIV: 5 V

TIMEBASE-SEC/DIV: 2 s

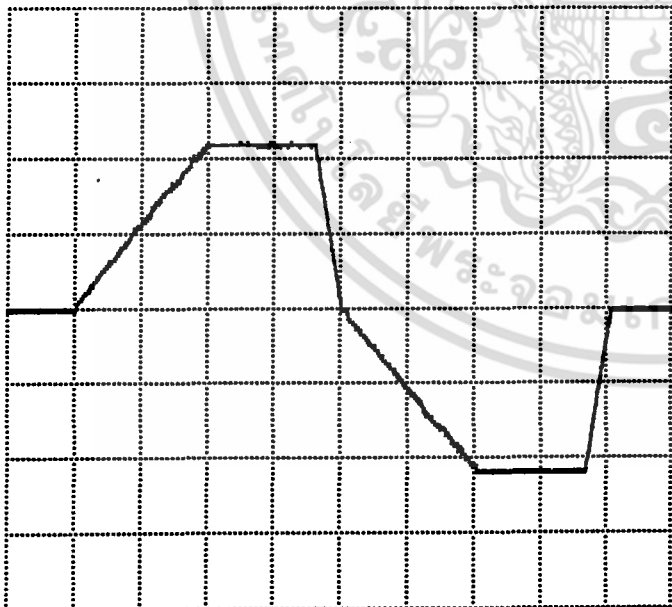
PRINTERPARAMETER:

ZOOMRANGE - CH1:0-9

HARDCOPY SOURCE :HM 205-3

REMARKS:

รูปที่ 4.35 ผลของการปรับอัตราเร่งและอัตราหน่วง โดยหน่วงเร็วกว่าเร่ง



DATE: 11-05-1990
TIME: 12:35:33

SIGNALPARAMETER:

CH1 - VOLTS/DIV: 5 V

TIMEBASE-SEC/DIV: 5 s

PRINTERPARAMETER:

ZOOMRANGE - CH1:0-9

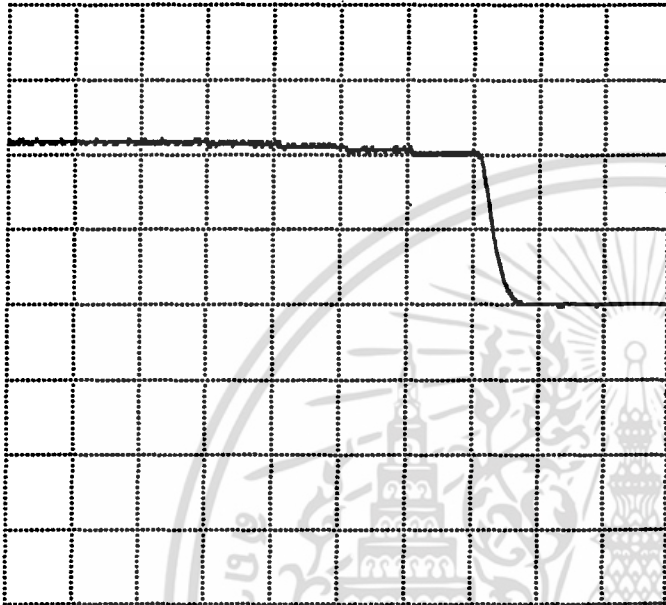
HARDCOPY SOURCE :HM 205-3

REMARKS:

รูปที่ 4.36 ผลของความเร็วเมื่อกลับทิศของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนหลอดไฟ 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5



DATE: 11-05-1990
TIME: 14:55:00

SIGNALPARAMETER:

CH1 - VOLTS/DIV: 5 V

TIMEBASE-SEC/DIV: 2 s

PRINTERPARAMETER:

ZOOMRANGE - CH1:0-9

HARDCOPY SOURCE :HM 205-3

REMARKS:

รูปที่ 4.37 ผลของความเร็วเมื่อเพิ่ม โหลด ไลน์แกมมาเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองจะเห็นว่า การใช้รูปคลื่น PWM ที่มีคุณลักษณะด้วยวิธีมอดูเลชันแอมพลิจูดแบบไม่สมมาตรขั้วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะได้รับคลื่นกระแสที่มอเตอร์ใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ แม้จะเพิ่มฮาร์โมนิกที่ 3 ในรูปคลื่นไซน์ที่นำมามอดูเลตด้วยก็ตาม และการเปลี่ยน FR ในแต่ละช่วงความถี่จะเป็นผลให้ความถี่ฮาร์โมนิกต่ำถูกเลื่อนไปเกิดที่ความถี่สูงขึ้น ขณะลดความถี่ของรูปคลื่นลง เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนอัตราเร่ง อัตราหน่วง และกลับทิศทางการทำงานของมอเตอร์ พบว่าได้ผลตามที่กำหนดไว้ เมื่อพิจารณาผลที่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่ม โหลด ให้แก่มอเตอร์ ความเร็วของมอเตอร์จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่หากแรงบิดที่ โหลดมากจนเกินระดับแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ ความเร็วมอเตอร์จะลดลงจนเป็นศูนย์ตามคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

4.8 สรุป

ในบทนี้อธิบายถึง การออกแบบสร้างชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยมีองค์ประกอบของวงจรในส่วนต่างๆ รวมทั้ง ไฟล์ซอร์สของโปรแกรมที่ใช้ และทำการทดลองควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขนาด 0.75 kW จากนั้นทำการวัดรูปคลื่นที่ FR ต่างๆ แยกความถี่ การเปลี่ยนแปลงความเร็ว ตลอดจนผลที่เกิดขึ้นเมื่อมีโหลด

บทที่ 5

บทสรุป

ในวิทยานิพนธ์นี้อธิบายการออกแบบ และสร้างวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยวิธี PWM โดยไมโครโปรเซสเซอร์ และทำการทดลองกับมอเตอร์ขนาด 0.75 kW ซึ่งมีกำลัง โวลต์เตจ 220/380 โวลต์ พิกัดกระแส 3.45/2.0 แอมป์ โดยสามารถปรับความถี่ได้ตั้งแต่ 0.5 Hz ถึง 100 Hz เปลี่ยนความถี่ครั้งละ 0.5 Hz สามารถกลับทิศทางการหมุนได้และปรับอัตราเร่งหรืออัตรา หน่วงระหว่าง 0 Hz ถึง 100 Hz ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0.2-75 วินาที วงจรควบคุมที่สร้างขึ้นแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนควบคุม โวลต์เตจ-ความถี่ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นไมโครโปรเซสเซอร์เบอร์ 8031 มีหน้าที่ควบคุมระดับโวลต์เตจของรูปคลื่นที่ความถี่ต่างๆ รวมทั้งการชดเชยผลของโวลต์เตจที่ตกคร่อมความต้านทานที่สเตเตอร์ในช่วงความถี่ต่ำที่สามารถปรับได้ 16 ระดับ และปรับอัตราเร่งหรืออัตรา หน่วงได้ นอกจากนี้ยังควบคุมการเริ่ม-หยุดหมุน การกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ และป้องกันกระแสเกินระดับที่กำหนดด้วย คุณสมบัติต่างๆดังกล่าวถูกกำหนดด้วยโปรแกรม ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติให้แตกต่างจากที่กำหนด สามารถกระทำได้โดยเปลี่ยนค่าตัวแปรภายในโปรแกรมเท่านั้น อีกส่วนหนึ่งคือส่วน สร้างรูปคลื่น PWM ประกอบด้วย 8031 เป็นหลักเช่นเดียวกัน โดยจะรับค่าโวลต์เตจและความถี่ที่กำหนด จากส่วนแรก นำมาสร้างรูปคลื่น PWM ซึ่งได้จากการมอดูเลทของรูปคลื่นสามเหลี่ยม กับรูปคลื่นซายน์ที่ ประกอบด้วยฮาร์โมนิกที่ 3 โดยมีสัดส่วนความถี่ของรูปคลื่นทั้งสองเปลี่ยนแปลงตามช่วงความถี่ที่กำหนดไว้ การสร้างรูปคลื่น และสัดส่วนของความถี่สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยแก้ไขข้อมูลภายในโปรแกรม ดังนั้น จึงสามารถมอดูเลทรูปคลื่นสามเหลี่ยมกับรูปคลื่นไดค้ได้ที่ต้องการ ด้วยความสัมพันธ์ของโวลต์เตจและ ความถี่อย่างไรก็ได้

จากรูปคลื่น PWM ที่ได้ นำมาป้อนให้แก่ชุดวงจรขับอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะแยกส่วนที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับส่วนที่เป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ออกจากกัน โดยการคัปปลิงทางแม่เหล็กผ่านสลิปชัทรานซ์ ฟอรั่มเมอร์ แล้วนำไปขับเบสของทรานซิสเตอร์ในชุดทรานซิสเตอร์อินเวอร์เตอร์เพื่อขับมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อไป

จากผลการทดลองได้ทำการวัดรูปคลื่นโวลต์เตจที่สัดส่วนความถี่ค่าต่างๆ เปรียบกับรูปคลื่น

สามเหลี่ยม เพื่อให้เห็นลักษณะของรูปคลื่น โวลต์ เตจเมื่อมอดูเลตด้วยวิทยุเฟิร์มแชนบลิ้งแบบไม่สมมาตร แล้วนำรูปคลื่นในแต่ละเฟสมาผ่านวงจรขยายผลต่าง (difference amplifier) เพื่อดูลักษณะของไลน์ โวลต์ เตจที่สัดส่วนความถี่ต่างๆ จะเห็นว่ารูปคลื่น โวลต์ เตจที่วัดได้ใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ เมื่อวัดไลน์ โวลต์ เตจที่มอเตอร์เทียบกับกระแส จะได้รูปคลื่นกระแสใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความถี่ฮาร์โมนิกต่ำน่าจะถูกรัดไป จากนั้นทำการวัดแถบความถี่ของรูปคลื่น โวลต์ เตจ เพื่อพิจารณาการ เปลี่ยนแปลงของแถบความถี่ พบว่าความถี่ของฮาร์โมนิกถูกเลื่อนออกไปขณะลดความถี่ของรูปคลื่น โวลต์ เตจ ลง อันเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนสัดส่วนความถี่ให้สูงขึ้น เมื่อทำการพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วจากการเปลี่ยนแปลงอัตราเร่ง อัตราหน่วง หรือการกลับทิศการหมุนของมอเตอร์ พบว่า ได้ผลตามที่กำหนดไว้ จากนั้นทำการทดลองเพิ่มโหลดขึ้น จะเห็นว่าความเร็วไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำเองและหากเพิ่มโหลดมากเกินไปจะเป็นผลให้มอเตอร์หยุดหมุน เนื่องจากแรงบิดของมอเตอร์น้อยกว่าแรงบิดที่โหลด

ชุดควบคุมที่สร้างขึ้นมีข้อดีหลายประการ ได้แก่

- การเพิ่มฮาร์โมนิกที่ 3 ในรูปคลื่นไซน์ปกติด้วยขนาดที่เหมาะสมทำให้ได้ไลน์ โวลต์ เตจเพิ่มขึ้น
- การเพิ่มสัดส่วนความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยม และรูปคลื่น โวลต์ เตจที่นำมามอดูเลต ขณะลดความถี่ของรูปคลื่น โวลต์ เตจลง ทำให้ความถี่ฮาร์โมนิกถูกเลื่อนขึ้นไป จึงไม่มีฮาร์โมนิกที่ความถี่ต่ำเกิดขึ้นขณะที่ความถี่ของรูปคลื่น โวลต์ เตจต่ำลง และผลที่ได้ตามมาคือ การควบคุมความเร็วการสวิตช์ ไม่ให้เกินระดับที่กำหนดขณะเพิ่มความถี่ รูปคลื่น โวลต์ เตจขึ้น ทำให้สามารถควบคุมความสูญเสียจากการสวิตช์ (switching loss) ได้
- เนื่องจากการสร้างรูปคลื่น โวลต์ เตจหรือการควบคุมการทำงานต่างๆ กระทำโดย โปรแกรมจึงทำให้ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่สร้างขึ้น มีความยืดหยุ่นได้ โดยสามารถแก้ไขลักษณะรูปคลื่น โวลต์ เตจ ความสัมพันธ์ระหว่าง โวลต์ เตจกับความถี่ อัตราเร่ง อัตราหน่วงและอื่นๆได้ง่าย

สำหรับข้อจำกัดของชุดควบคุมที่สร้างขึ้น เนื่องจากความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่ควบคุม

ด้วยสัญญาเช่าจาก 8031 ซึ่งถูกจำกัดไว้ที่ระดับหนึ่งทำให้รูปคลื่นสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้น ได้ความถี่สูงไม่มาก และจำกัดให้ความละเอียดของวงจรมับได้เพียง 4 บิท ทำให้รูปคลื่นสามเหลี่ยมที่ได้เป็นขั้นที่ไม่ละเอียด จากเหตุผลดังกล่าวนี้สามารถทำการพัฒนาชุดควบคุมให้ดีขึ้นได้ ด้วยการเพิ่มวงจรวัดความถี่ของสัญญาเช่าจาก 8031 ขึ้น ซึ่งจะช่วยให้สามารถสร้างรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่มีความถี่สูงและความละเอียดของวงจรมับเพิ่มขึ้นได้ แต่การสร้างวงจรวัดความถี่ใหม่ช่วงการทำงานกว้างและมีความเชื่อถือได้สูงน่าจะเป็นผลงานวิจัยได้อีกหัวข้อหนึ่ง ในการเพิ่มความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่ให้มีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือความสูญเสียจากการสวิตช์ ดังนั้นการเพิ่มความถี่การสวิตช์เป็นเท่าไรควรต้องคำนึงถึงจุดนี้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร. โยธิน เปรมปราณีรัชต์ เป็นอย่างสูง ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และให้คำปรึกษา แนะนำ เกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด ขอขอบคุณอาจารย์วรศักดิ์ จิตรภักดี ที่คอยว่ากล่าวตักเตือน เอื้อเฟื้อเอกสารอ้างอิง ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในส่วนวงจรถอเลกทรอนิกส์กำลัง ขอขอบคุณอาจารย์อิจิมา ผู้เชี่ยวชาญจากญี่ปุ่น ประจำภาควิชาเครื่องกล ที่ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือที่จำเป็นต้องใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณภาควิชาระบบควบคุม ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ ลาดกระบัง ที่เป็นแหล่งสนับสนุนด้านตำราและเอกสารอ้างอิง ขอขอบคุณรุ่นน้องรุ่นที่ 26 ที่ให้กำลังใจและเป็นแรงบันดาลใจให้เร่งทำวิทยานิพนธ์ ประการสำคัญที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ที่ให้กำเนิด และสนับสนุนด้านการศึกษาตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Shepherd, L.N. Hulley, Power electronics and motor control. pp 103-122, pp 225-281, Cambridge University Press, 1987
- [2] J.M.D. Murphy, F.G. Turnbull, Power Electronic Control of AC Motors. pp 1-19, pp 101-150, pp 217-261, Pergamon Press, 1988
- [3] B.K. Bose, Power electronics and AC drive. pp 28-52, pp 140-154, pp 251-254, Prentice-Hall, 1986
- [4] Bimal K. Bose, Adjustable speed AC Drive Systems. pp 1-6, pp 101-109, pp 134-139, IEEE Press, 1981
- [5] A.E. Fitzgerald, C. Kingsley, Alexander Kusko, Electric Machinery. pp 336-381, McGraw-Hill, 1971
- [6] J.A. Houldsworth and D.A. Grant, "The use of harmonic distortion to increase the output of a three-phase PWM inverter," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-20, pp. 1224-1228, Sept/Oct. 1984
- [7] David Finney, Variable frequency AC motor drive systems. pp 166-201, Peter Peregrinus Ltd., 1988
- [8] Micheal A. Boost and Phoivos D. Ziogas, "State-of-the-Art Carrier PWM Techniques: A Critical Evaluation," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 24, pp. 271-280, Mar/Apr. 1988
- [9] Y.Y. Tzou and Y.C. Wu, "Harmonic Analysis of PWM inverter modulation strategies," INT. J. Electronics., vol. 64, No.3, pp. 461-480, 1988
- [10] William McMurray, "Efficient Snubbers for Voltage-Source GTO Inverters," IEEE Trans. on Power Electronics., vol. PE-2, No.3, July. 1987

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

พิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้ในการทดลอง

ขนาดกำลัง	0.75 kW
ความเร็วรอบ	1380 rpm
ความถี่	50 Hz
โวลต์เตจ	220/380 V
กระแส	3.45/2.0 A

พิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ขนาดกำลัง	0.37 kW
ความเร็วรอบ	2000 rpm
โวลต์เตจที่อามาเจอร์	180 V
โวลต์เตจที่สนามกระตุ้น	210 V
กระแสที่ไหลเข้าอามาเจอร์	2.4 A

พิกัดของอุปกรณ์วัดกระแส

โวลต์เตจที่เอาท์พุท	10 V
กระแสที่ไหลผ่าน	5 A

พิกัดของทาโคเจนมอเตอร์

โวลต์เตจที่ขั้ว	7 V
ความเร็วรอบ	1000 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

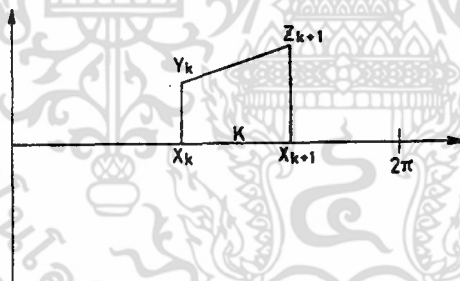
การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกของรูปคลื่น

การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกของรูปคลื่น PWM ที่กล่าวถึงในบทที่ 3 ใช้วิธี Piecewise linear interpolation ซึ่งจะแบ่งรูปคลื่นใดๆ เป็นช่วงแล้วแทนความสัมพันธ์ในแต่ละช่วงด้วยสมการเส้นตรง ดังรูปที่ ข.1 แสดงให้เห็นช่วงที่ k เมื่อแบ่งรูปคลื่นใน 1 คาบ ออกเป็น M ช่วง จะ ได้ความสัมพันธ์ของรูปคลื่นเป็น

$$S(\omega t) = \sum_{k=1}^M [Y_k + (\omega t - X_k)(Z_{k+1} - Y_k)/(X_{k+1} - X_k)] W_k(\omega t) \quad (\text{ข.1})$$

โดยที่ $W_k(\omega t) = 1$ เมื่อ $X_k < \omega t < X_{k+1}$
 $= 0$ เมื่อ $\omega t < X_k$ หรือ $\omega t > X_{k+1}$

และ $0 < \omega t < 2\pi$, $X_1 = 0$, $X_{M+1} = 2\pi$



รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ในช่วงที่ k ของรูปคลื่น

ในการวิเคราะห์ฟูรีเยร์ สามารถเขียนสมการ (ข.1) ใหม่ได้เป็น

$$S(\omega t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)] \quad (\text{ข.2})$$

และหาค่าสัมประสิทธิ์ได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_0 = (1/2\pi) \int_0^{2\pi} S(\omega t) d(\omega t) \quad (1.3)$$

$$A_n = (1/\pi) \int_0^{2\pi} S(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (1.4)$$

$$B_n = (1/\pi) \int_0^{2\pi} S(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (1.5)$$

เมื่อ $n = 1, 2, 3, \dots$

ซึ่งสามารถหา $S(\omega t)$ ในช่วงที่ k ได้จาก

$$S_k(\omega t) = Y_k + (\omega t - X_k)(Z_{k+1} - Y_k)/(X_{k+1} - X_k) \quad (1.6)$$

โดยที่ $X_k \leq \omega t \leq X_{k+1}$

เพื่อให้รูปสมการสั้นลงกำหนดให้

$$\rho_k = (Z_{k+1} - Y_k)/(X_{k+1} - X_k) \quad (1.7)$$

ดังนั้น
$$S(\omega t) = \sum_{k=1}^n S_k(\omega t) = \sum_{k=1}^n [Y_k + \rho_k(\omega t - X_k)] \quad (1.8)$$

และหาค่าสัมประสิทธิ์ในสมการที่ (1.3)-(1.5) ได้เป็น

$$A_0 = (1/2\pi) \sum_{k=1}^n (1/2) [(X_{k+1} - X_k)(Y_k + Z_{k+1})] \quad (1.9)$$

$$A_n = (1/n\pi) \sum_{k=1}^n [Z_{k+1} \sin(nX_{k+1}) - Y_k \sin(nX_k) + (\rho_k/n)(\cos(nX_{k+1}) - \cos(nX_k))] \quad (1.10)$$

$$B_n = (1/n\pi) \sum_{k=1}^n [-Z_{k+1} \cos(nX_{k+1}) + Y_k \cos(nX_k) + (\rho_k/n)(\sin(nX_{k+1}) - \sin(nX_k))] \quad (1.11)$$

โดยที่ X_k และ X_{k+1} ขึ้นอยู่กับวิธีการมอดูเลต ส่วน Y_k และ Z_k นั้นเมื่อรูปคลื่นเป็น PWM จะมีค่าเท่ากัน ทำให้ k เป็นศูนย์ สมการที่ (1.10) และ (1.11) จึงสามารถลดรูปลงได้และค่าที่คำนวณได้เหล่านี้จะบ่งบอกถึงขนาดของฮาร์โมนิกต่างๆ ในบทที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PRELIMINARY

MCS[®]-51 8-BIT CONTROL-ORIENTED MICROCOMPUTERS

8031/8051
8031AH/8051AH
8032AH/8052AH
8751H/8751H-12

- High Performance HMOS Process
- Internal Timers/Event Counters
- 2-Level Interrupt Priority Structure
- 32 I/O Lines (Four 8-Bit Ports)
- 64K Program Memory Space
- Boolean Processor
- Bit-Addressable RAM
- Programmable Full Duplex Serial Channel
- 111 Instructions (64 Single-Cycle)
- 64K Data Memory Space

■ Security Feature Protects EPROM Parts Against Software Piracy

The MCS[®]-51 products are optimized for control applications. Byte-processing and numerical operations on small data structures are facilitated by a variety of fast addressing modes for accessing the internal RAM. The instruction set provides a convenient menu of 8-bit arithmetic instructions, including multiply and divide instructions. Extensive on-chip support is provided for one-bit variables as a separate data type, allowing direct bit manipulation and testing in control and logic systems that require Boolean processing.

Device	Internal Memory		Timers/ Event Counters	Interrupts
	Program	Data		
8052AH	8K × 8 ROM	256 × 8 RAM	3 × 16-Bit	6
8051AH	4K × 8 ROM	128 × 8 RAM	2 × 16-Bit	5
8051	4K × 8 ROM	128 × 8 RAM	2 × 16-Bit	5
8032AH	none	256 × 8 RAM	3 × 16-Bit	6
8031AH	none	128 × 8 RAM	2 × 16-Bit	5
8031	none	128 × 8 RAM	2 × 16-Bit	5
8751H	4K × 8 EPROM	128 × 8 RAM	2 × 16-Bit	5
8751H-12	4K × 8 EPROM	128 × 8 RAM	2 × 16-Bit	5

The 8751H is an EPROM version of the 8051AH: that is, the on-chip Program Memory can be electrically programmed, and can be erased by exposure to ultraviolet light. It is fully compatible with its predecessor, the 8751-8, but incorporates two new features: a Program Memory Security bit that can be used to protect the EPROM against unauthorized read-out, and a programmable baud rate modification bit (SMOD). SMOD is not present in the 8751H-12.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

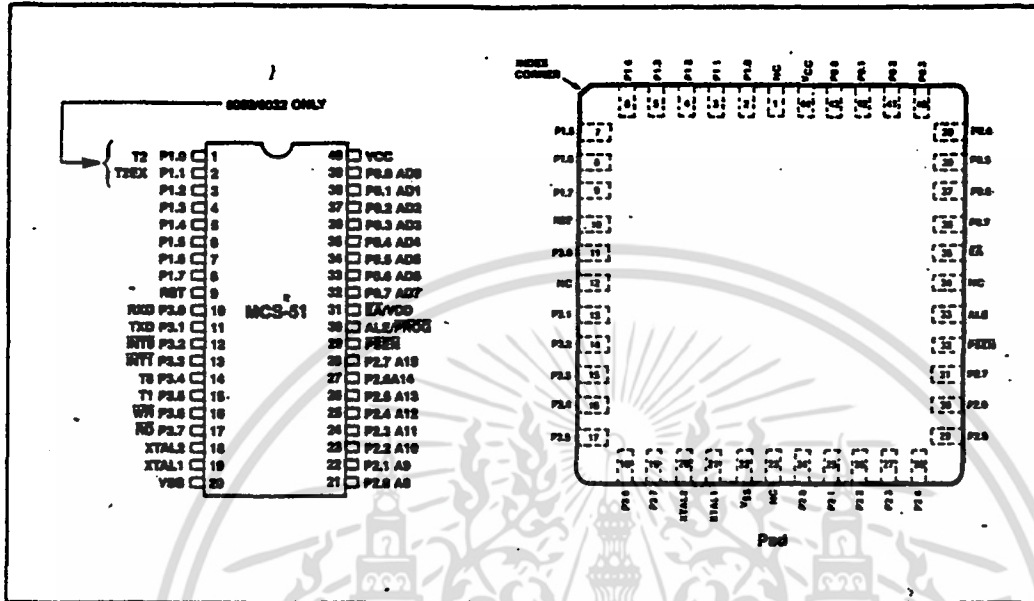


Figure 2. MCS-51 Pin Connections

In the 8032AH and 8052AH, Port 1 pins P1.0 and P1.1 also serve the T2 and T2EX functions, respectively.

Port 2

Port 2 is an 8-bit bidirectional I/O port with internal pullups. The Port 2 output buffers can sink/source 4 LS TTL inputs. Port 2 pins that have 1s written to them are pulled high by the internal pullups, and in that state can be used as inputs. As inputs, Port 2 pins that are externally being pulled low will source current (IIL, on the data sheet) because of the internal pullups.

Port 2 emits the high-order address byte during fetches from external Program Memory and during accesses to external Data Memory that use 16-bit addresses (MOVX @DPTR). In this application it uses strong internal pullups when emitting 1s. During accesses to external Data Memory that use 8-bit addresses (MOVX @RI), Port 2 emits the contents of the P2 Special Function Register.

Port 2 also receives the high-order address bits during programming of the EPROM parts and during program verification of the ROM and EPROM parts.

Port 3

Port 3 is an 8-bit bidirectional I/O port with internal pullups. The Port 3 output buffers can sink/source 4 LS TTL inputs. Port 3 pins that have 1s written to them are pulled high by the internal pullups, and in that state can be used as inputs. As inputs, Port 3 pins that are externally being pulled low will source current (IIL, on the data sheet) because of the pullups.

Port 3 also serves the functions of various special features of the MCS-51 Family, as listed below:

Port Pin	Alternative Function
P3.0	RXD (serial input port)
P3.1	TXD (serial output port)
P3.2	INT0 (external interrupt 0)
P3.3	INT1 (external interrupt 1)
P3.4	T0 (Timer 0 external input)
P3.5	T1 (Timer 1 external input)
P3.6	WR (external data memory write strobe)
P3.7	RD (external data memory read strobe)



RST

Reset input. A high on this pin for two machine cycles while the oscillator is running resets the device.

ALE/PROG

Address Latch Enable output pulse for latching the low byte of the address during accesses to external memory. ALE can drive 8 LS TTL inputs. This pin is also the program pulse input (PROG) during programming of the EPROM parts.

In normal operation ALE is emitted at a constant rate of 1/6 the oscillator frequency, and may be used for external timing or clocking purposes. Note, however, that one ALE pulse is skipped during each access to external Data Memory.

PSEN

Program Store Enable is the read strobe to external Program Memory. PSEN can drive 8 LS TTL inputs.

When the device is executing code from external Program Memory, PSEN is activated twice each machine cycle, except that two PSEN activations are skipped during each access to external Data Memory.

EA/VPP

External Access enable EA must be externally held low in order to enable any MCS-51 device to fetch code from external Program Memory locations 0 to 0FFFH (0 to 1FFFH, in the 8032AH and 8052AH).

Note, however, that if the Security Bit in the EPROM devices is programmed, the device will not fetch code from any location in external Program Memory.

This pin also receives the 21V programming supply voltage (VPP) during programming of the EPROM parts.

XTAL1

Input to the inverting oscillator amplifier.

XTAL2

Output from the inverting oscillator amplifier.

OSCILLATOR CHARACTERISTICS

XTAL1 and XTAL2 are the input and output, respectively, of an inverting amplifier which can be configured for use as an on-chip oscillator, as shown in Figure 3. Either a quartz crystal or ceramic resonator may be used. More detailed information concerning the use of the on-chip oscillator is available in Application Note AP-155, "Oscillators for Microcontrollers."

To drive the device from an external clock source, XTAL1 should be grounded, while XTAL2 is driven, as shown in Figure 4. There are no requirements on the duty cycle of the external clock signal, since the input to the internal clocking circuitry is through a divide-by-two flip-flop, but minimum and maximum high and low times specified on the Data Sheet must be observed.

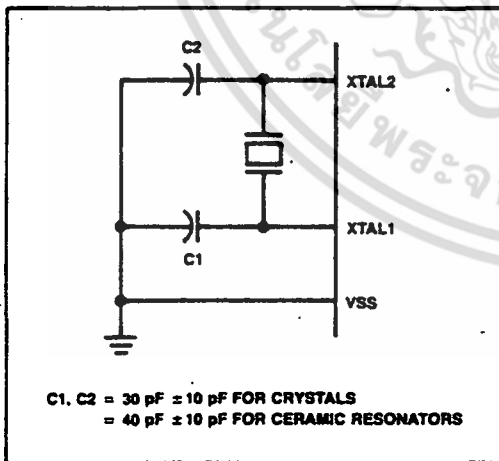


Figure 3. Oscillator Connections

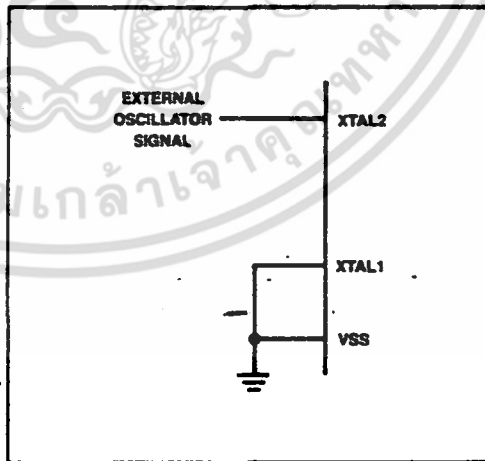


Figure 4. External Drive Configuration

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



8031/8051 • 8031AH/8051AH
8032AH/8052AH • 8751H/8751H-12

PRELIMINARY

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS*

Ambient Temperature Under Bias . . . 0 °C to 70 °C
Storage Temperature -65 °C to +150 °C
Voltage on \overline{EA}/VPP Pin to VSS . -0.5V to +21.5V
Voltage on Any Other Pin to VSS . -0.5V to +7V
Power Dissipation 1.5W

*NOTICE: Stresses above those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

D.C. CHARACTERISTICS: (T_A = 0 °C to 70 °C; VCC = 5V ±10%; VSS = 0V)

Symbol	Parameter	Min	Max	Unit	Test Conditions
VIL	Input Low Voltage (Except \overline{EA} Pin of 8751H, 8751H-12)	-0.5	0.8	V	
VIL1	Input Low Voltage to \overline{EA} Pin of 8751H, 8751H-12	0	0.7	V	
VIH	Input High Voltage (Except XTAL2, RST)	2.0	VCC+0.5	V	
VIH1	Input High Voltage to XTAL2, RST	2.5	VCC+0.5	V	XTAL1 = VSS
VOL	Output Low Voltage (Ports 1, 2, 3)*		0.45	V	IOL = 1.6 mA
VOL1	Output Low Voltage (Port 0, ALE, PSEN)*				
	8751H, 8751H-12		0.60 0.45	V V	IOL = 3.2 mA IOL = 2.4 mA
	All Others		0.45	V	IOL = 3.2 mA
VOH	Output High Voltage (Ports 1, 2, 3)	2.4		V	IOH = -80 μ A
VOH1	Output High Voltage (Port 0 in External Bus Mode, ALE, PSEN)	2.4		V	IOH = -400 μ A
IIL	Logical 0 Input Current (Ports 1, 2, 3) 8032AH, 8052AH All Others		-800 -500	μ A μ A	Vin = 0.45 V Vin = 0.45 V
IIL1	Logical 0 Input Current to \overline{EA} Pin of 8751H, 8751H-12 Only		-15	mA	
IIL2	Logical 0 Input Current (XTAL2)		-3.2	mA	Vin = 0.45 V
ILI	Input Leakage Current (Port 0) 8751H, 8751H-12 All Others		\pm 100 \pm 10	μ A μ A	0.45 < Vin < VCC 0.45 < Vin < VCC
IIH	Logical 1 Input Current to \overline{EA} Pin of 8751H, 8751H-12		500	μ A	
IIH1	Input Current to RST to Activate Reset		500	μ A	Vin < (VCC - 1.5V)
ICC	Power Supply Current: 8031/8051 8031AH/8051AH 8032AH/8052AH 8751H/8751H-12		160 125 175 250	mA mA mA mA	All Outputs Disconnected; \overline{EA} = VCC
CIO	Pin Capacitance		10	pF	test freq = 1MHz

*Note: Capacitive loading on Ports 0 and 2 may cause spurious noise pulses to be superimposed on the VOLs of ALE and Ports 1 and 3. The noise is due to external bus capacitance discharging into the Port 0 and Port 2 pins when these pins make 1-to-0 transitions during bus operations. In the worst cases (capacitive loading > 100 pF), the noise pulse on the ALE line may exceed 0.8V. In such cases it may be desirable to qualify ALE with a Schmitt Trigger, or use an address latch with a Schmitt Trigger STROBE input.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



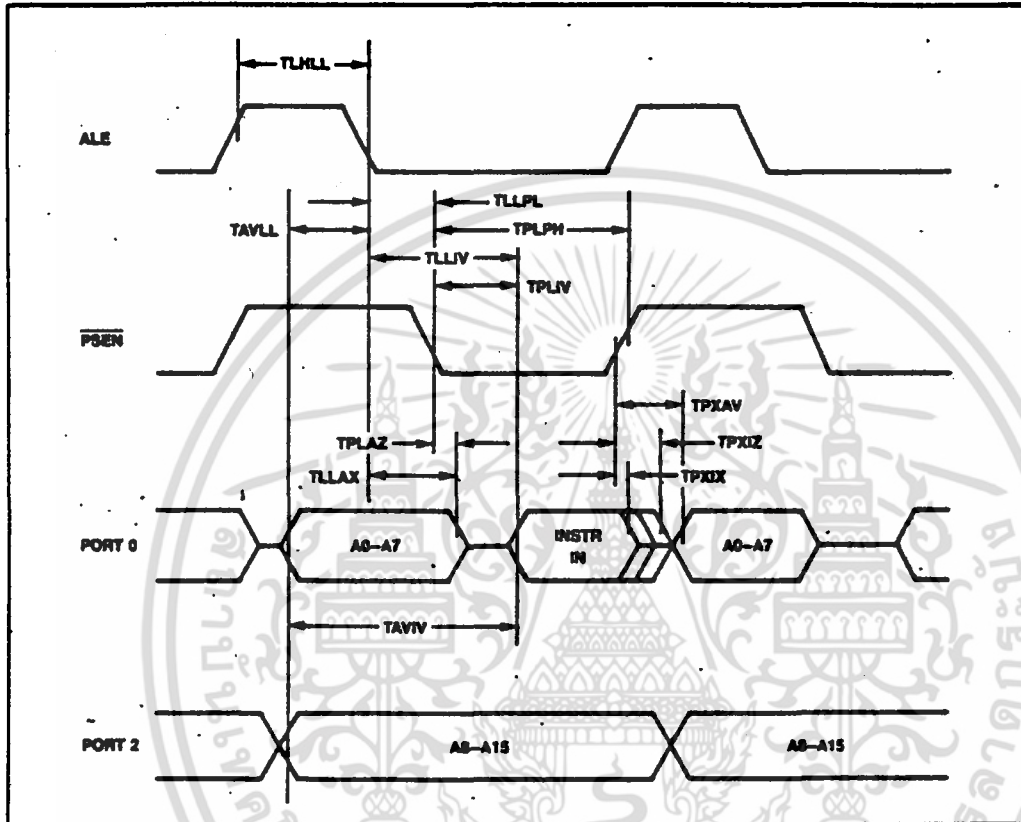
A.C. CHARACTERISTICS: ($T_A = 0\text{ }^\circ\text{C}$ to $+70\text{ }^\circ\text{C}$, $V_{CC} = 5V \pm 10\%$, $V_{SS} = 0V$,
 Load Capacitance for Port 0, ALE, and PSEN = 100 pF,
 Load Capacitance for All Other Outputs = 80 pF)

Symbol	Parameter	12MHz Osc		Variable Oscillator		Units
		Min	Max	Min	Max	
1/TCLCL	Oscillator Frequency			3.5	12.	MHz
TLHLL	ALE Pulse Width	127		2TCLCL-40		ns
TAVLL	Address Valid to ALE Low	43		TCLCL-40		ns
TLLAX	Address Hold After ALE Low	48		TCLCL-35		ns
TLLIV	ALE Low to Valid Instr In 8751H, 8751H-12 All Others		183 233		4TCLCL-150 4TCLCL-100	ns
TLLPL	ALE Low to PSEN Low	58		TCLCL-25		ns
TPLPH	PSEN Pulse Width 8751H, 8751H-12 All Others	190 215		3TCLCL-60 3TCLCL-35		ns ns
TPLIV	PSEN Low to Valid Instr In 8751H, 8751H-12 All Others		100 125		3TCLCL-150 3TCLCL-125	ns ns
TPXIX	Input Instr Hold After PSEN	0		0		ns
TPXIZ	Input Instr Float After PSEN		63		TCLCL-20	ns
TPXAV	PSEN to Address Valid	75		TCLCL-8		ns
TAVIV	Address to Valid Instr In 8751H, 8751H-12 All Others		267 302		5TCLCL-150 5TCLCL-115	ns ns
TPLAZ	PSEN Low to Address Float		TBD		TBD	ns
TRLRH	RD Pulse Width	400		6TCLCL-100		ns
TWLWH	WR Pulse Width	400		6TCLCL-100		ns
TRLDV	RD Low to Valid Data In		252		5TCLCL-165	ns
TRHDX	Data Hold After RD	0		0		ns
TRHDZ	Data Float After RD		97		2TCLCL-70	ns
TLLDV	ALE Low to Valid Data In		517		8TCLCL-150	ns
TAVDV	Address to Valid Data In		585		9TCLCL-165	ns
TLLWL	ALE Low to RD or WR Low	200	300	3TCLCL-50	3TCLCL + 50	ns
TAVWL	Address to RD or WR Low	203		4TCLCL-130		ns
TQVWX	Data Valid to WR Transition 8751H, 8751H-12 All Others	13 23		TCLCL-70 TCLCL-60		ns ns
TQVWH	Data Valid to WR High	433		7TCLCL-150		ns
TWHQX	Data Held After WR	33		TCLCL-50		ns
TRLAZ	RD Low to Address Float		TBD		TBD	ns
TWHLH	RD or WR High to ALE High 8751H, 8751H-12 All Others	33 43	133 123	TCLCL-50 TCLCL-40	TCLCL + 50 TCLCL + 40	ns ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



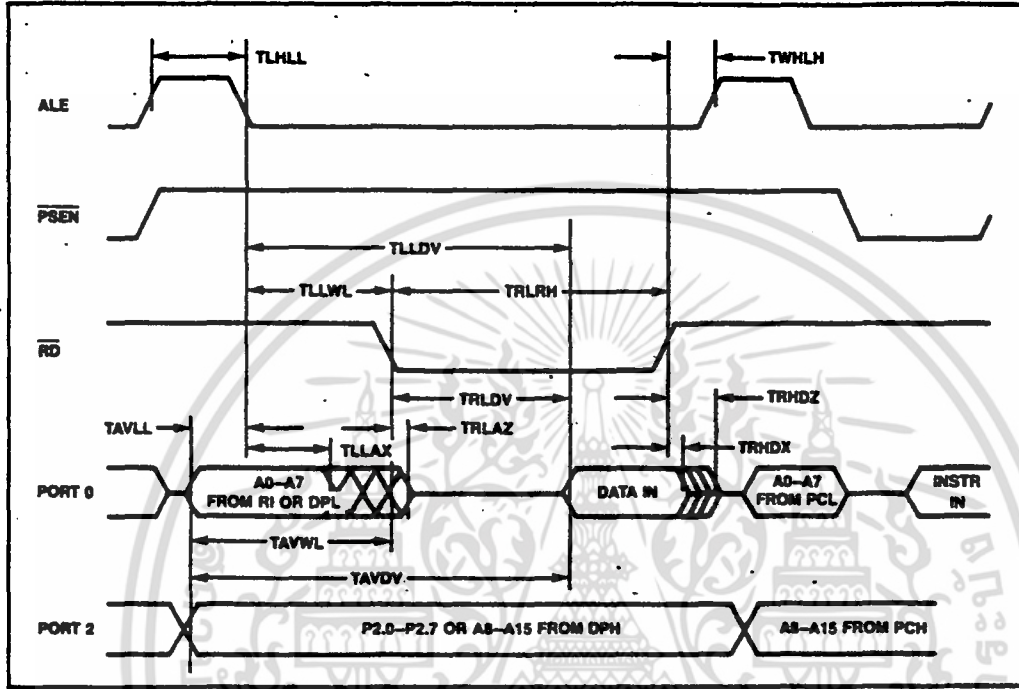
EXTERNAL PROGRAM MEMORY READ CYCLE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



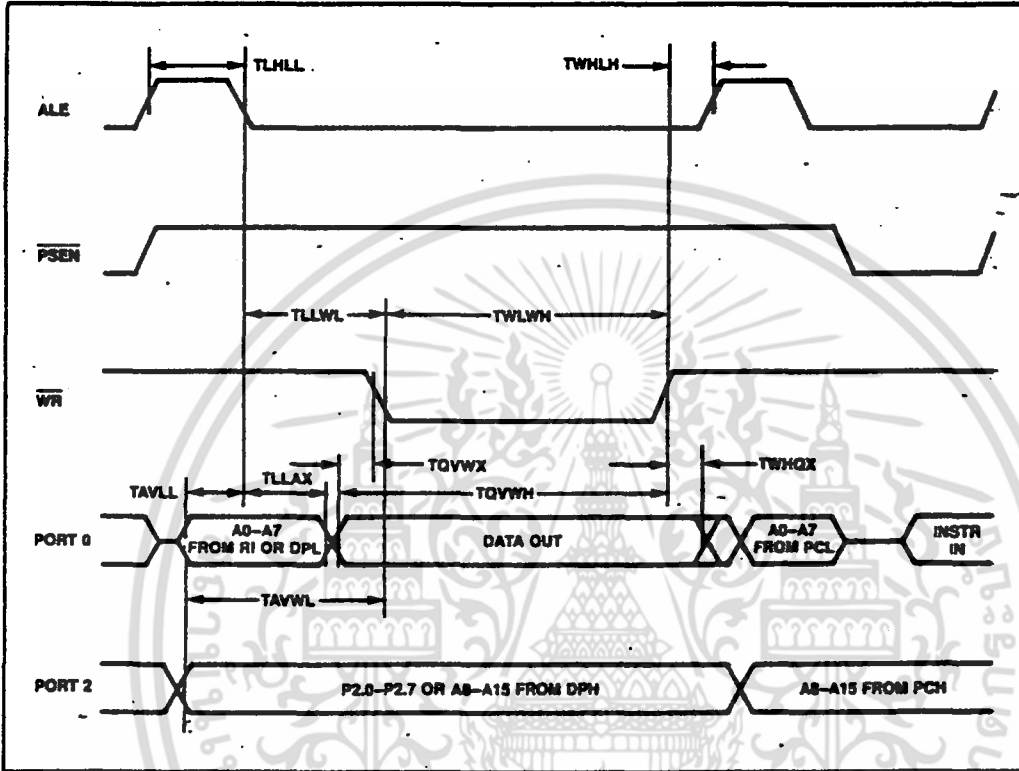
EXTERNAL DATA MEMORY READ CYCLE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



EXTERNAL DATA MEMORY WRITE CYCLE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

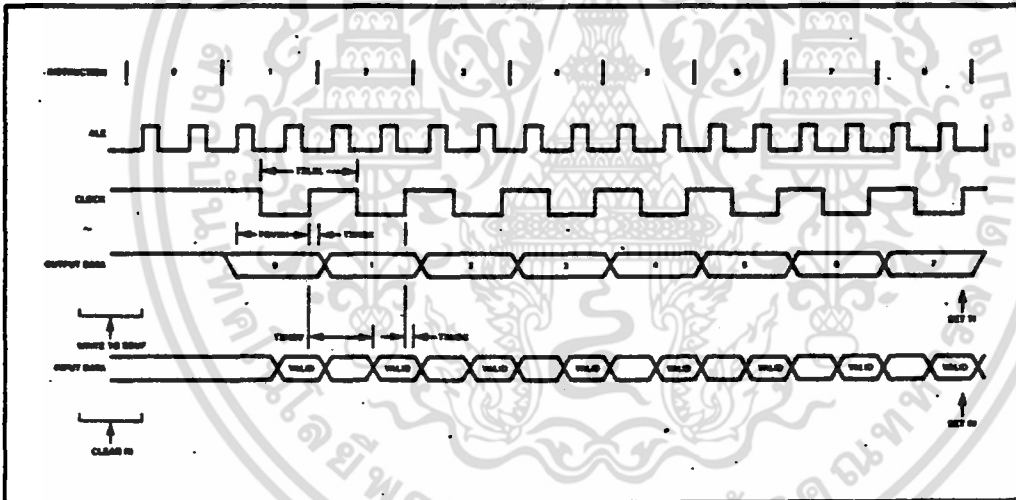


SERIAL PORT TIMING — SHIFT REGISTER MODE

Test Conditions: $T_A = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $70\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V_{CC} = 5\text{V} \pm 10\%$; $V_{SS} = 0\text{V}$; Load Capacitance = 80 pF

Symbol	Parameter	12MHz Osc		Variable Oscillator		Units
		Min	Max	Min	Max	
TXLXL	Serial Port Clock Cycle Time	1.0		12TCLCL		μs
TQVXH	Output Data Setup to Clock Rising Edge	700		10TCLCL-133		ns
TXHQX	Output Data Hold After Clock Rising Edge	50		2TCLCL-117		ns
TXHDX	Input Data Hold After Clock Rising Edge	0		0		ns
TXHDV	Clock Rising Edge to Input Data Valid		700		10TCLCL-133	ns

SHIFT REGISTER TIMING WAVEFORMS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



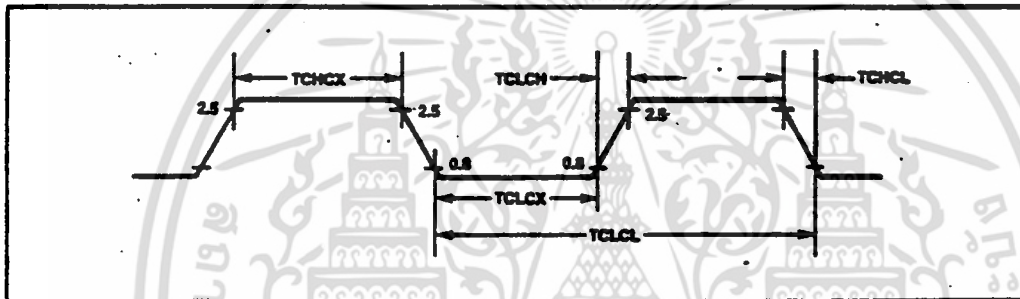
8031/8051 • 8031AH/8051AH
8032AH/8052AH • 8751H/8751H-12

PRELIMINARY

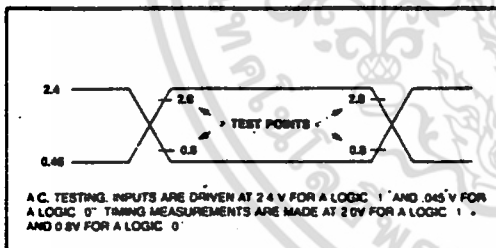
EXTERNAL CLOCK DRIVE

Symbol	Parameter	Min	Max	Units
1/TCLCL	Oscillator Frequency	3.5	12	MHz
TCHCX	High Time	20		ns
TCLCX	Low Time	20		ns
TCLCH	Rise Time		20	ns
TCHCL	Fall Time		20	ns

EXTERNAL CLOCK DRIVE WAVEFORMS



A.C. TESTING INPUT, OUTPUT WAVEFORM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดโปรแกรมส่วนควบคุม โวลต์เตจ-ความถี่

```

0000          .ORG 0000H
0000 02 00 60      LJMP INIT
0003          ;*****
0003          ;* INTO routine for inhibit *
0003          ;*****
0003          .ORG 0003H
0003 7B 20      INTO  MOV R3,#20H      ;Check for over current
0005 DB FE          DJNZ R3,$          ;more than about 16 uSEC
0007 20 B2 04          JB P3.2,PAS
000A D2 91          SETB P1.1      ;Inhibit
000C 80 FE          SJMP $
000E 32          PAS  RETI
000F          ;*****
000F          ;* Timer0 interrupt routine to delay ACC & DEC *
000F          ;*****
000B          .ORG 000BH
000B C2 8C      TIMERO CLR TRO
000D 75 8C FC      MOV TH0,#0FCH
0010 80 1E          SJMP TIMO
0012          ;*****
0012          ;* INT1 routine to read A/D *
0012          ;*****
0013          .ORG 0013H
0013 78 00      INT1  MOV RO,#00H
0015 E2          MOVX A,@RO      ;Read data from A/D
0016 F5 70      MOV F_SET,A      ;and move to F_SET
0018 D2 D5      SETB FO
001A 32          RETI
001B          ;*****
0030          .ORG 0030H
0030 75 8A 18      TIMO  MOV TLO,#18H
0033 30 B2 22      INT_0 JNB P3.2,PASS
0036 30 90 FA      JNB P1.0,INT_0 ;stall protection
0039 D2 8C          SETB TRO
003B D5 78 1A      DJNZ LP_IN,PASS
003E D5 77 17      DJNZ LP_EX,PASS
0041 85 76 78      SEND  MOV LP_IN,TI_IN
0044 85 75 77      MOV LP_EX,TI_EX
0047 C0 E0          PUSH A
0049 79 01          MOV R1,#01H
004B E5 7A          MOV A,V_OUT
004D F3          MOVX @R1,A      ;send voltage command
004E 09          INC R1
004F E5 79          MOV A,F_OUT
0051 F3          MOVX @R1,A      ;send frequency command
0052 C2 91          CLR P1.1
0054 C2 7F          CLR TEST
0056 D0 E0          POP A
0058 32          PASS  RETI
0059          ;*****
0060          .ORG 0060H
0060 74 00      INIT  MOV A,#00H
0062 78 01      MOV R0,#01H

```

```

0064 F2          MOVX @R0,A          ;send 00H to voltage and
0065 08          INC R0          ;frequency command
0066 F2          MOVX @R0,A
0067 75 7B FF    MOV DIR,#0FFH
006A D2 92          SETB P1.2          ;set direction bit
006C 75 8C FC    MOV TH0,#0FCH
006F 75 8A 18    MOV TLO,#18H
0072 75 89 01    MOV TMOD,#00000001B
0075 C2 88          CLR IT0
0077 D2 8A          SETB IT1
0079 43 A8 87    ORL IE,#10000111B
007C 75 79 00    MOV F_OUT,#00H
007F 30 93 FD    JNB P1.3,$
0082 D2 91          INH          SETB P1.1          ;inhibit
0084 20 93 FB    SET          JB P1.3,INH          ;check for switch on
0087 78 04          MOV R0,#04H
0089 E2          MOVX A,@R0          ;input acceleration and
008A FC          MOV R4,A          ;deceleration set
008B 18          DEC R0
008C E2          MOVX A,@R0          ;input boost factor set
008D FD          MOV R5,A          ;and multiply of
008E C4          SWAP A          ;acc. & dec.
008F 54 0F          ANL A,#00001111B
0091 23          RL A
0092 FF          MOV R7,A
0093 90 05 00    MOV DPTR,#0500H
0096 93          MOVC A,@A+DPTR          ;look up table for
0097 FE          MOV R6,A          ;boost voltage
0098 EF          MOV A,R7
0099 04          INC A
009A 93          MOVC A,@A+DPTR
009B F5 82          MOV DPL,A
009D 8E 83          MOV DPH,R6
009F 7F 00          MOV R7,#00H
00A1 78 50          MOV R0,#50H
00A3 EF          LOAD          MOV A,R7          ;load boost voltage to
00A4 93          MOVC A,@A+DPTR          ;internal RAM 20 byte
00A5 F6          MOV @R0,A
00A6 08          INC R0
00A7 0F          INC R7
00A8 BF 15 F8    CJNE R7,#15H,LOAD
00AB ED          MOV A,R5
00AC 54 03          ANL A,#00000011B
00AE 14          DEC A
00AF C4          SWAP A
00B0 FE          MOV R6,A
00B1 EC          MOV A,R4
00B2 54 0F          ANL A,#00001111B
00B4 4E          ORL A,R6
00B5 23          RL A
00B6 FF          MOV R7,A
00B7 90 04 A0    MOV DPTR,#04A0H          ;look up table for
00BA 93          MOVC A,@A+DPTR          ;acceleration data

```

```

00BB F5 71      MOV ACC_EX,A
00BD EF        MOV A,R7
00BE 04        INC A
00BF 93        MOVC A,@A+DPTR
00C0 F5 72      MOV ACC_IN,A
00C2 ED        MOV A,R5
00C3 54 0C      ANL A,#00001100B
00C5 03        RR A
00C6 03        RR A
00C7 14        DEC A
00C8 FE        MOV R6,A
00C9 EC        MOV A,R4
00CA 54 F0      ANL A,#11110000B
00CC 4E        ORL A,R6
00CD C4        SWAP A
00CE 23        RL A
00CF FF        MOV R7,A
00D0 90 04 A0   MOV DPTR,#04A0H ;look up table for
00D3 93        MOVC A,@A+DPTR ;deceleration data
00D4 F5 73      MOV DEC_EX,A
00D6 EF        MOV A,R7
00D7 04        INC A
00D8 93        MOVC A,@A+DPTR
00D9 F5 74      MOV DEC_IN,A
00DB 20 94 0E   JB P1.4,FWD1 ;check direction command
00DE 74 00      MOV A,#00H
00E0 B5 7B 02   CJNE A,DIR,CHG1_1
00E3 80 13      SJMP READ
00E5 75 7B 00   CHG1_1 MOV DIR,#00H
00E8 C2 92      CLR P1.2
00EA 80 0C      SJMP READ
00EC 74 FF      FWD1  MOV A,#0FFH
00EE B5 7B 02   CJNE A,DIR,CHG1_2
00F1 80 05      SJMP READ
00F3 75 7B FF   CHG1_2 MOV DIR,#0FFH
00F6 D2 92      SETB P1.2
00F8 78 00      READ  MOV R0,#00H
00FA F2        MOVX @R0,A ;input frequency command
00FB C2 D5      CLR F0
00FD 30 D5 FD   JNB F0,$
0100 D2 7F      COMP SETB TEST
0102 E5 70      MOV A,F_SET
0104 B5 79 27   CJNE A,F_OUT,N_EQ ;compare frequency to
0107 C2 8C      CLR TR0 ;output frequency
0109 B4 00 03   CJNE A,#00H,CHCK ;output frequency = 0 ?
010C 02 00 84   LJMP SET
010F 75 8C FC   CHCK  MOV TH0,#0FCH
0112 75 8A 18   MOV TL0,#18H
0115 20 93 11   JB P1.3,STP ;check command
0118 20 94 07   JB P1.4,FWD2
011B 74 00      MOV A,#00H
011D B5 7B 09   CJNE A,DIR,STP
0120 80 D6      SJMP READ

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

0122 74 FF      FWD2   MOV A,#0FFH
0124 B5 7B 02      CJNE A,DIR,STP
0127 80 CF          SJMP READ
0129 75 70 00      STP     MOV F_SET,#00H
012C 80 D2          SJMP COMP
012E 40 18          N_EQ    JC LESS
0130 85 71 75      MOV TI_EX,ACC_EX ;setting frequency more
0133 85 72 76      MOV TI_IN,ACC_IN ;than output frequency
0136 85 71 77      MOV LP_EX,ACC_EX
0139 85 72 78      MOV LP_IN,ACC_IN
013C 05 79          INC F_OUT
013E 74 C9          MOV A,#0C9H
0140 B5 79 03      CJNE A,F_OUT,N_OVER
0143 75 79 C8      MOV F_OUT,#0C8H
0146 80 0E          N_OVER SJMP COUNT
0148 85 73 75      LESS   MOV TI_EX,DEC_EX ;setting frequency less
014B 85 74 76      MOV TI_IN,DEC_IN ;than out put frequency
014E 85 73 77      MOV LP_EX,DEC_EX
0151 85 74 78      MOV LP_IN,DEC_IN
0154 15 79          DEC F_OUT
0156 D2 8C          COUNT  SETB TRO ;enable TIMERO
0158 74 14          MOV A,#14H
015A B5 79 00      CJNE A,F_OUT,CHK
015D 50 0A          CHK     JNC RAM
015F 90 03 A0      MOV DPTR,#03A0H ;look up table for
0162 E5 79          MOV A,F_OUT ;voltage
0164 93            MOVC A,@A+DPTR
0165 F5 7A          MOV V_OUT,A
0167 80 09          SJMP CHECK
0169 78 50          RAM     MOV R0,#50H ;look up table for
016B E5 79          MOV A,F_OUT ;boost voltage
016D 28            ADD A,R0
016E F8            MOV R0,A
016F E6            MOV A,@R0
0170 F5 7A          MOV V_OUT,A
0172 20 93 15      CHECK  JB P1.3,STOP ;check command
0175 20 94 07      JB P1.4,FWD3
0178 74 00          MOV A,#00H
017A B5 7B 0D      CJNE A,DIR,STOP
017D 80 05          SJMP LP_CK
017F 74 FF          FWD3   MOV A,#0FFH
0181 B5 7B 06      CJNE A,DIR,STOP
0184 20 7F EB      LP_CK  JB TEST,CHECK ;check loop
0187 02 00 F8      LJMP READ
018A 75 70 00      STOP   MOV F_SET,#00H
018D 20 7F E2      JB TEST,CHECK
0190 02 01 00      LJMP COMP
07A0                .END

```

```

ADDR  00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C 0D 0E 0F
-----
0000  02 00 60 7B 20 DB FE 20 B2 04 D2 C2 8C 75 8C F8
0010  80 1E 00 78 00 E2 F5 70 D2 D5 32 00 00 00 00 00

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

0020 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
0030 75 8A 30 30 B2 22 30 90 FA D2 8C D5 78 1A D5 77
0040 17 85 76 78 85 75 77 C0 E0 79 01 E5 7A F3 09 E5
0050 79 F3 C2 91 C2 7F D0 E0 32 00 00 00 00 00 00
0060 74 00 78 01 F2 08 F2 75 7B FF D2 92 75 8C F8 75
0070 8A 30 75 89 01 C2 88 D2 8A 43 A8 87 75 79 00 30
0080 93 FD D2 91 20 93 FB 78 04 E2 FC 18 E2 FD C4 54
0090 0F 23 FF 90 05 00 93 FE EF 04 93 F5 82 8E 83 7F
00A0 00 78 50 EF 93 F6 08 0F BF 15 F8 ED 54 03 14 C4
00B0 FE EC 54 0F 4E 23 FF 90 04 A0 93 F5 71 EF 04 93
00C0 F5 72 ED 54 0C 03 03 14 FE EC 54 F0 4E C4 23 FF
00D0 90 04 A0 93 F5 73 EF 04 93 F5 74 20 94 0E 74 00
00E0 B5 7B 02 80 13 75 7B 00 C2 92 80 0C 74 FF B5 7B
00F0 02 80 05 75 7B FF D2 92 78 00 F2 C2 D5 30 D5 FD
0100 D2 7F E5 70 B5 79 27 C2 8C B4 00 03 02 00 84 75
0110 8C F8 75 8A 30 20 93 11 20 94 07 74 00 B5 7B 09
0120 80 D6 74 FF B5 7B 02 80 CF 75 70 00 80 D2 40 18
0130 85 71 75 85 72 76 85 71 77 85 72 78 05 79 74 C9
0140 B5 79 03 75 79 C8 80 0E 85 73 75 85 74 76 85 73
0150 77 85 74 78 15 79 D2 8C 74 14 B5 79 00 50 0A 90
0160 03 A0 E5 79 93 F5 7A 80 09 78 50 E5 79 28 F8 E6
0170 F5 7A 20 93 15 20 94 07 74 00 B5 7B 0D 80 05 74
0180 FF B5 7B 06 20 7F EB 02 00 F8 75 70 00 20 7F E2
0190 02 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
    
```

.ORG 03B5H

***** Data for voltage command *****

```

03B0 00 00 00 00 00 36 38 3B 3D 40 42 45 47 4A 4D 4F
03C0 52 54 57 59 5C 5E 61 63 66 69 6B 6E 70 73 75 78
03D0 7A 7D 80 82 85 87 8A 8C 8F 91 94 96 99 9C 9E A1
03E0 A3 A6 A8 AB AD B0 B3 B5 B8 BA BD BF C2 C4 C7 C9
03F0 CC CF D1 D4 D6 D9 DB DE E0 E3 E6 E8 EB ED F0 F2
0400 F5 F7 FA FC FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
0410 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
0420 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
0430 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
0440 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
0450 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
0460 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF 00 00 00 00 00 00
    
```

.ORG 04A0H

***** Data for counter *****

```

04A0 01 01 01 01 01 02 01 03 01 04 01 05 01 06 01 07
04B0 01 08 01 09 01 0A 01 0B 01 0C 01 0D 01 0E 01 0F
04C0 01 19 01 19 01 32 01 4B 01 64 01 7D 01 96 01 AF
04D0 01 C8 01 E1 01 FA 02 13 02 2C 02 45 02 5E 02 77
04E0 01 05 01 05 01 0A 01 0F 01 14 01 19 01 1E 01 23
04F0 01 28 01 2D 01 32 01 37 01 3C 01 41 01 46 01 4B
    
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

;*****
.ORG 0500H
;*****      Data for address of boost      *****
;*****
0500 06 20 06 3B 06 50 06 6B 06 80 06 9B 06 B0 06 CB
0510 06 E0 06 FB 07 10 07 2B 07 40 07 5B 07 70 07 8B

;*****
.ORG 0620H
;*****      Data for boost voltage      *****
;*****
0620 00 03 05 08 0A 0D 0F 12 14 17 1A 1C 1F 21 24 26
0630 29 2B 2E 30 33 00 00 00 00 00 00 03 05 07 0A 0C
0640 0E 11 13 16 18 1A 1D 1F 21 24 26 29 2B 2E 30 33
0650 05 07 0A 0C 0E 10 12 15 17 19 1B 1D 20 22 24 26
0660 29 2B 2E 30 33 00 00 00 00 00 00 08 0A 0C 0E 10
0670 12 14 16 18 1A 1C 1E 20 22 24 26 29 2B 2E 30 33
0680 0A 0C 0E 10 12 14 15 17 19 1B 1D 1F 21 23 24 26
0690 29 2B 2E 30 33 00 00 00 00 00 00 0D 0E 10 12 14
06A0 15 17 19 1A 1C 1E 1F 21 23 25 26 29 2B 2E 30 33
06B0 0F 11 12 14 15 17 18 1A 1C 1D 1F 20 22 23 25 26
06C0 29 2B 2E 30 33 00 00 00 00 00 00 12 13 15 16 17
06D0 19 1A 1B 1D 1E 1F 21 22 24 25 26 29 2B 2E 30 33
06E0 14 16 17 18 19 1A 1C 1D 1E 1F 20 21 23 24 25 26
06F0 29 2B 2E 30 33 00 00 00 00 00 00 17 18 19 1A 1B
0700 1C 1D 1E 1F 20 21 22 23 24 25 26 29 2B 2E 30 33
0710 1A 1A 1B 1C 1D 1E 1F 1F 20 21 22 23 24 25 25 26
0720 29 2B 2E 30 33 00 00 00 00 00 00 1C 1D 1D 1E 1F
0730 1F 20 21 21 22 23 24 24 25 26 26 29 2B 2E 30 33
0740 1F 1F 20 20 21 21 22 22 23 23 24 24 25 25 26 26
0750 29 2B 2E 30 33 00 00 00 00 00 00 21 21 22 22 23
0760 23 23 24 24 24 25 25 25 26 26 26 29 2B 2E 30 33
0770 24 24 24 24 24 25 25 25 25 25 25 26 26 26 26 26
0780 29 2B 2E 30 33 00 00 00 00 00 00 26 26 26 26 26
0790 26 26 26 26 26 26 26 26 26 26 26 29 2B 2E 30 33

tasm: Number of errors = 0

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดโปรแกรมส่วนสร้างสัญญาณ PWM

```

P0000          .ORG 0000H
0000 02 00 30      LJMP INIT
;*****
;* Timer0 Interrupt Routine (For clock of triangular wave) *
;*****
000B          .ORG 000BH
000B B2 90        TIME0  CPL P1.0
000D 32          RETI
;*****
;* Ex1 Interrupt Routine (For sending data to D/A port) *
;*****
0013          .ORG 0013H
0013 C2 92        EXT1   CLR P1.2
0015 D2 92        SETB P1.2
0017 02 02 77      LJMP XTER1
;*****
;* Timer1 Interrupt Routine (Delay for sending data to D/A port) *
;*****
001B          .ORG 001BH
001B C2 8E        TIME1  CLR TR1
001D 85 75 8D      MOV TH1,TH1_BUF
0020 85 76 8B      MOV TL1,TL1_BUF
0023 D2 8E        SETB TR1
0025 02 02 77      LJMP XTER1
0028          ;*****
0028          ;* Start Program *
0028          ;*****
0030          .ORG 0030H
0030 78 05        INIT   MOV R0,#05H
0032 E4          CLR A
0033 F2          MOVX @R0,A          ;Vref = 0
0034 75 8C E1     MOV TH0,#0E1H
0037 75 8A E1     MOV TLO,#0E1H      ;clock freq.
003A 75 8D EA     MOV TH1,#0EAH
003D 75 8B 4C     MOV TL1,#04CH
0040 75 75 EA     MOV TH1_BUF,#0EAH
0043 75 76 4C     MOV TL1_BUF,#04CH  ;sine data delay
0046 75 74 00     MOV GEA,#00H
0049 7B 00        MOV R3,#00H
004B 20 93 08     JB P1.3,HAR_3      ;Check for data from
004E 75 78 08     MOV HDAT_BUF,#08H ;sine or sine add the
0051 75 79 00     MOV LDAT_BUF,#00H ;third harmonic table
0054 80 08        SJMP CROSS
0056 75 78 0B     HAR_3 MOV HDAT_BUF,#0BH
0059 75 79 00     MOV LDAT_BUF,#00H
005C 7B 99        MOV R3,#99H
005E 75 77 01     CROSS MOV STEP,#01H
0061 75 70 00     MOV FI,#00H
0064 75 71 00     MOV VI,#00H
0067 75 89 12     MOV TMOD,#00010010B
006A 43 A8 8A     ORL IE,#10001010B
006D 43 88 50     ORL TCON,#01010000B
0070 D2 91        SETB P1.1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

0072 79 00      START  MOV R1,#00H
0074 E3                MOVX A,@R1
0075 F5 72                MOV FR,A           ;Input frequency command
0077 B5 70 1C          CJNE A,FI,NOT_F    ;and compare with FI
007A 79 01      CHG_V  MOV R1,#01H
007C E3                MOVX A,@R1
007D F5 73                MOV VR,A           ;Input voltage command
007F B5 71 02          CJNE A,VI,NOT_V    ;and compare with VI
0082 80 EE                SJMP START
0084 50 04      NOT_V  JNC MORE
0086 15 71                DEC VI             ;VR < VI
0088 80 02                SJMP SEND_V
008A 05 71      MORE   INC VI             ;VR > VI
008C E5 71      SEND_V MOV A,VI
008E 79 05                MOV R1,#05H
0090 F3                MOVX @R1,A        ;Send VI
0091 80 DF                SJMP START
0093 02 01 7C          J_LESS LJMP LESS
0096 40 FB      NOT_F  JC J_LESS
0098 05 70                INC FI             ;FR > FI
009A 74 C9                MOV A,#0C9H
009C B5 70 03          CJNE A,FI,N_OVER
009F 75 70 C8          N_OVER CLR A
00A2 E4                CJNE A,GEA,UP_CHK1 ;Gear = 0 ?
00A3 B5 74 28          MOV A,#28
00A6 74 1C                CJNE A,FI,GEA_UO  ;If FI > 27 change
00A8 B5 70 0D          MOV STEP,#06     ;gear up to 1
00AB 75 77 06          MOV GEA,#01
00AE 75 74 01          CLR TR1
00B1 C2 8E                SETB EX1
00B3 D2 AA                LJMP UP_TAB      ;Look up table for
00B5 02 02 61          ;changing gear up
00B8 E5 70      GEA_UO MOV A,FI      ;FI less or equal 27
00BA C3                CLR C             ;look up table for
00BB 33                RLC A            ;TIMER1 delay
00BC FF                MOV R7,A
00BD 90 0D 80          MOV DPTR,#0D80H
00C0 93                MOVC A,@A+DPTR
00C1 F5 75                MOV TH1_BUF,A
00C3 0F                INC R7
00C4 EF                MOV A,R7
00C5 93                MOVC A,@A+DPTR
00C6 F5 76                MOV TL1_BUF,A
00C8 75 8C E1          MOV TH0,#0E1H
00CB 02 00 7A          LJMP CHG_V
00CE 74 01      UP_CHK1 MOV A,#01
00D0 B5 74 18          CJNE A,GEA,UP_CHK2 ;Gear = 1 ?
00D3 74 1B                MOV A,#27
00D5 B5 70 00          CJNE A,FI,CHK1
00D8 40 03      CHK1  JC NORM1      ;If FI less or equal 27
00DA 02 02 6C          LJMP DN_TAB     ;look up table for
                                ;changing gear down

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

00DD 74 24      NORM1  MOV A,#36
00DF B5 70 06      CJNE A,FI,GEA_U1      ;If FI > 35 change
00E2 75 77 09      MOV STEP,#09          ;gear up to 2
00E5 75 74 02      MOV GEA,#02
00E8 02 02 61      GEA_U1 LJMP UP_TAB      ;Look up table for
                                ;changing gear up

00EB 74 02      UP_CHK2 MOV A,#02
00ED B5 74 18      CJNE A,GEA,UP_CHK3   ;Gear = 2 ?
00F0 74 23      MOV A,#35
00F2 B5 70 00      CJNE A,FI,CHK2
00F5 40 03      CHK2   JC NORM2        ;If FI less or equal 35
00F7 02 02 6C      LJMP DN_TAB          ;look up table for
                                ;changing gear down

00FA 74 36      NORM2  MOV A,#54
00FC B5 70 06      CJNE A,FI,GEA_U2     ;If FI > 53 change
00FF 75 77 0C      MOV STEP,#12         ;gear up to 3
0102 75 74 03      MOV GEA,#03
0105 02 02 61      GEA_U2 LJMP UP_TAB     ;Look up table for
                                ;changing gear up

0108 74 03      UP_CHK3 MOV A,#03
010A B5 74 18      CJNE A,GEA,UP_CHK4   ;Gear = 3 ?
010D 74 35      MOV A,#53
010F B5 70 00      CJNE A,FI,CHK3
0112 40 03      CHK3   JC NORM3        ;If FI less or equal 53
0114 02 02 6C      LJMP DN_TAB          ;look up table for
                                ;changing gear down

0117 74 48      NORM3  MOV A,#72
0119 B5 70 06      CJNE A,FI,GEA_U3     ;If FI > 71 change
011C 75 77 0F      MOV STEP,#15         ;gear up to 4
011F 75 74 04      MOV GEA,#04
0122 02 02 61      GEA_U3 LJMP UP_TAB     ;Look up table for
                                ;changing gear up

0125 74 04      UP_CHK4 MOV A,#04
0127 B5 74 18      CJNE A,GEA,UP_CHK5   ;Gear = 4 ?
012A 74 47      MOV A,#71
012C B5 70 00      CJNE A,FI,CHK4
012F 40 03      CHK4   JC NORM4        ;If FI less or equal 71
0131 02 02 6C      LJMP DN_TAB          ;look up table for
                                ;changing gear down

0134 74 59      NORM4  MOV A,#89
0136 B5 70 06      CJNE A,FI,GEA_U4     ;If FI > 88 change
0139 75 77 14      MOV STEP,#20         ;gear up to 5
013C 75 74 05      MOV GEA,#05
013F 02 02 61      GEA_U4 LJMP UP_TAB     ;Look up table for
                                ;changing gear up

0142 74 05      UP_CHK5 MOV A,#05
0144 B5 74 18      CJNE A,GEA,UP_CHK6   ;Gear = 5 ?
0147 74 58      MOV A,#88
0149 B5 70 00      CJNE A,FI,CHK5
014C 40 03      CHK5   JC NORM5        ;If FI less or equal 88
014E 02 02 6C      LJMP DN_TAB          ;look up table for
                                ;changing gear down

0151 74 77      NORM5  MOV A,#119

```

```

0153 B5 70 06          CJNE A,FI,GEA_U5    ;If FI > 118 change
0156 75 77 1E          MOV STEP,#30        ;gear up to 6
0159 75 74 06          MOV GEA,#06
015C 02 02 61          GEA_U5 LJMP UP_TAB  ;Look up table for
                                ;changing gear up

015F 74 06          UP_CHK6 MOV A,#06
0161 B5 74 07          CJNE A,GEA,GEA7    ;Gear = 6 ?
0164 74 76          MOV A,#118
0166 B5 70 00          CJNE A,FI,CHK6
0169 40 03          CHK6 JC NORM6      ;If FI less or equal 118
016B 02 02 6C          GEA7 LJMP DN_TAB   ;look up table for
                                ;changing gear down

016E 74 B2          NORM6 MOV A,#178
0170 B5 70 06          CJNE A,FI,GEA_U6   ;If FI > 177 change
0173 75 77 24          MOV STEP,#36       ;gear up to 7
0176 75 74 07          MOV GEA,#07
0179 02 02 61          GEA_U6 LJMP UP_TAB ;Look up table for
017C          ;***** ;changing gear up

017C 15 70          LESS DEC FI        ;FR < FI
017E 74 07          MOV A,#07
0180 B5 74 0E          CJNE A,GEA,DN_CHK6 ;Gear = 7 ?
0183 74 A9          MOV A,#169
0185 B5 70 06          CJNE A,FI,GEA_D7   ;If FI = 169 change
0188 75 77 1E          MOV STEP,#30       ;gear down to 6
018B 75 74 06          MOV GEA,#6
018E 02 02 6C          GEA_D7 LJMP DN_TAB ;Look up table for
                                ;changing gear down

0191 74 06          DN_CHK6 MOV A,#06
0193 B5 74 18          CJNE A,GEA,DN_CHK5 ;Gear = 6 ?
0196 74 A9          MOV A,#169
0198 B5 70 00          CJNE A,FI,CHCK6
019B 40 0E          CHCK6 JC ANOM6     ;If FI less or equal 169
019D 74 6E          MOV A,#110         ;and FI = 110 change
019F B5 70 06          CJNE A,FI,GEA_D6   ;gear down to 5
01A2 75 77 14          MOV STEP,#20
01A5 75 74 05          MOV GEA,#05
01A8 02 02 6C          GEA_D6 LJMP DN_TAB
01AB 02 02 61          ANOM6 LJMP UP_TAB
01AE 74 05          DN_CHK5 MOV A,#05
01B0 B5 74 18          CJNE A,GEA,DN_CHK4 ;Gear = 5 ?
01B3 74 6E          MOV A,#110
01B5 B5 70 00          CJNE A,FI,CHCK5
01B8 40 0E          CHCK5 JC ANOM5     ;If FI less or equal 110
01BA 74 50          MOV A,#80          ;and FI = 80 change
01BC B5 70 06          CJNE A,FI,GEA_D5   ;gear down to 4
01BF 75 77 0F          MOV STEP,#15
01C2 75 74 04          MOV GEA,#04
01C5 02 02 6C          GEA_D5 LJMP DN_TAB
01C8 02 02 61          ANOM5 LJMP UP_TAB
01CB 74 04          DN_CHK4 MOV A,#04
01CD B5 74 18          CJNE A,GEA,DN_CHK3 ;Gear = 4 ?
01D0 74 50          MOV A,#80

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

01D2 B5 70 00          CJNE A,FI,CHCK4
01D5 40 0E          CHCK4 JC ANOM4          ;If FI less or equal 80
01D7 74 3F          MOV A,#63          ;and FI = 63 change
01D9 B5 70 06          CJNE A,FI,GEA_D4  ;gear down to 3
01DC 75 77 0C          MOV STEP,#12
01DF 75 74 03          MOV GEA,#03
01E2 02 02 6C          GEA_D4 LJMP DN_TAB
01E5 02 02 61          ANOM4 LJMP UP_TAB
01E8 74 03          DN_CHK3 MOV A,#03
01EA B5 74 18          CJNE A,GEA,DN_CHK2 ;Gear = 3 ?
01ED 74 3F          MOV A,#63
01EF B5 70 00          CJNE A,FI,CHCK3
01F2 40 0E          CHCK3 JC ANOM3          ;If FI less or equal 63
01F4 74 2D          MOV A,#45          ;and FI = 45 change
01F6 B5 70 06          CJNE A,FI,GEA_D3  ;gear down to 2
01F9 75 77 09          MOV STEP,#09
01FC 75 74 02          MOV GEA,#02
01FF 02 02 6C          GEA_D3 LJMP DN_TAB
0202 02 02 61          ANOM3 LJMP UP_TAB
0205 74 02          DN_CHK2 MOV A,#02
0207 B5 74 18          CJNE A,GEA,DN_CHK1 ;Gear = 2 ?
020A 74 2D          MOV A,#45
020C B5 70 00          CJNE A,FI,CHCK2
020F 40 0E          CHCK2 JC ANOM2          ;If FI less or equal 45
0211 74 1D          MOV A,#29          ;and FI = 29 change
0213 B5 70 06          CJNE A,FI,GEA_D2  ;gear down to 1
0216 75 77 06          MOV STEP,#06
0219 75 74 01          MOV GEA,#01
021C 02 02 6C          GEA_D2 LJMP DN_TAB
021F 02 02 61          ANOM2 LJMP UP_TAB
0222 74 01          DN_CHK1 MOV A,#01
0224 B5 74 27          CJNE A,GEA,GEA0   ;Gear = 1 ?
0227 74 1D          MOV A,#29
0229 B5 70 00          CJNE A,FI,CHCK1
022C 40 1D          CHCK1 JC ANOM1          ;If FI less or equal 29
022E 74 13          MOV A,#19          ;and FI = 19 change
0230 B5 70 15          CJNE A,FI,GEA_D1  ;gear down to 0
0233 75 77 01          MOV STEP,#01
0236 75 74 00          MOV GEA,#00
0239 C2 AA          CLR EX1            ;Disable EX1
023B 75 8D FE          MOV TH1,#0FEH
023E 75 8B DC          MOV TL1,#0DCH
0241 D2 8E          SETB TR1          ;Enable TIMER1
0243 75 8C E1          MOV TH0,#0E1H
0246 80 06          SJMP GEA0
0248 02 02 6C          GEA_D1 LJMP DN_TAB
024B 02 02 61          ANOM1 LJMP UP_TAB
024E E5 70          GEA0 MOV A,FI          ;Take FI to look up
0250 C3          CLR C            ;table for TIMER1
0251 33          RLC A           ;delay time
0252 FF          MOV R7,A
0253 90 0D 80          MOV DPTR,#0D80H
0256 93          MOVC A,@A+DPTR

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

0257 F5 75          MOV TH1_BUF,A
0259 0F           INC R7
025A EF           MOV A,R7
025B 93           MOVC A,@A+DPTR
025C F5 76       MOV TL1_BUF,A
025E 02 00 7A    LJMP CHG_V
0261 90 0E 00    UP_TAB MOV DPTR,#0E00H
0264 E5 70       MOV A,FI
0266 93           MOVC A,@A+DPTR
0267 F5 8C       MOV TH0,A
0269 02 00 7A    LJMP CHG_V
026C 90 0F 00    DN_TAB MOV DPTR,#0F00H
026F E5 70       MOV A,FI
0271 93           MOVC A,@A+DPTR
0272 F5 8C       MOV TH0,A
0274 02 00 7A    LJMP CHG_V
0277             ;*****
0277 BB 99 63    XTER1  CJNE R3,#99H,X_SIN ;check for jumping to
027A C0 E0             PUSH A ;output sine data?
027C C0 D0             PUSH PSW
027E C0 83             PUSH DPH
0280 C0 82             PUSH DPL
0282 78 02             MOV R0,#02H
0284 85 78 83         MOV DPH,HDAT_BUF ;load sine add the third
0287 85 79 82         MOV DPL,LDAT_BUF ;harmonic data table
028A E4               CLR A
028B 30 91 40         JNB P1.1,CCW ;Input direction command
028E 93             CW MOVC A,@A+DPTR ;Output 3 phase signal
028F F2             MOVX @R0,A ;for clockwise
0290 08             INC R0
0291 74 78             MOV A,#78H
0293 93             MOVC A,@A+DPTR
0294 F2             MOVX @R0,A
0295 74 F0             MOV A,#0F0H
0297 08             INC R0
0298 93             MOVC A,@A+DPTR
0299 F2             MOVX @R0,A
029A E5 82         BACK MOV A,DPL ;Add table with step
029C 25 77         ADD A,STEP
029E F5 82         MOV DPL,A
02A0 50 02         JNC PASS
02A2 05 83         INC DPH
02A4 74 0C         PASS MOV A,#0CH ;Check period finish?
02A6 B5 83 07     CJNE A,DPH,RTI
02A9 74 67         MOV A,#67H
02AB B5 82 00     CJNE A,DPL,N_EQ
02AE 40 0F         N_EQ JC NEW
02B0 85 83 78     RTI MOV HDAT_BUF,DPH ;Period not finished
02B3 85 82 79     MOV LDAT_BUF,DPL
02B6 D0 82         POP DPL
02B8 D0 83         POP DPH
02BA D0 D0         POP PSW
02BC D0 E0         POP A

```

```

02BE 32          RETI
02BF 75 78 0B   NEW  MOV HDAT_BUF,#0BH ;Period finished
02C2 75 79 00   MOV LDAT_BUF,#00H
02C5 D0 82      POP DPL
02C7 D0 83      POP DPH
02C9 D0 D0      POP PSW
02CB D0 E0      POP A
02CD 32          RETI
02CE 93          CCW  MOV C A,@A+DPTR ;Output 3 phase signal
02CF F2          MOVX @R0,A ;for counterclockwise
02D0 78 04      MOV R0,#04H
02D2 74 78      MOV A,#78H
02D4 93          MOV C A,@A+DPTR
02D5 F2          MOVX @R0,A
02D6 74 F0      MOV A,#0F0H
02D8 18          DEC R0
02D9 93          MOV C A,@A+DPTR
02DA F2          MOVX @R0,A
02DB 80 BD      SJMP BACK
02DD            ;*****
02DD C0 E0      X_SIN PUSH A
02DF C0 D0      PUSH PSW
02E1 C0 83      PUSH DPH
02E3 C0 82      PUSH DPL
02E5 78 02      MOV R0,#02H
02E7 85 78 83   MOV DPH,HDAT_BUF ;Load sine data table
02EA 85 79 82   MOV DPL,LDAT_BUF
02ED E4          CLR A
02EE 30 91 40   S_CW  JNB P1.1,S_CCW ;Input direction command
02F1 93          MOV C A,@A+DPTR ;Output 3 phase signal
02F2 F2          MOVX @R0,A ;for clockwise
02F3 08          INC R0
02F4 74 78      MOV A,#78H
02F6 93          MOV C A,@A+DPTR
02F7 F2          MOVX @R0,A
02F8 74 F0      MOV A,#0F0H
02FA 08          INC R0
02FB 93          MOV C A,@A+DPTR
02FC F2          MOVX @R0,A
02FD E5 82      S_BACK MOV A,DPL ;Add table with step
02FF 25 77      ADD A,STEP
0301 F5 82      MOV DPL,A
0303 50 02      JNC S_PASS
0305 05 83      INC DPH
0307 74 09      S_PASS MOV A,#09H ;Check period finished?
0309 B5 83 07   CJNE A,DPH,S_RTI
030C 74 67      MOV A,#67H
030E B5 82 00   CJNE A,DPL,S_N_EQ
0311 40 0F      S_N_EQ JC S_NEW
0313 85 83 78   S_RTI  MOV HDAT_BUF,DPH ;Period not finished
0316 85 82 79   MOV LDAT_BUF,DPL
0319 D0 82      POP DPL
031B D0 83      POP DPH

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

031D D0 D0          POP PSW
031F D0 E0          POP A
0321 32             RETI
0322 75 78 08      S_NEW MOV HDAT_BUF,#08H ;Period finished
0325 75 79 00      MOV LDAT_BUF,#00H
0328 D0 82         POP DPL
032A D0 83         POP DPH
032C D0 D0         POP PSW
032E D0 E0         POP A
0330 32             RETI
0331 93             S_CCW MOVC A,@A+DPTR ;Output 3 phase signal
0332 F2             MOVX @R0,A ;for counterclockwise
0333 78 04         MOV R0,#04H
0335 74 78         MOV A,#78H
0337 93             MOVC A,@A+DPTR
0338 F2             MOVX @R0,A
0339 74 F0         MOV A,#0F0H
033B 18             DEC R0
033C 93             MOVC A,@A+DPTR
033D F2             MOVX @R0,A
033E 80 BD         SJMP S_BACK
0340                .END

```

ADDR	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	0A	0B	0C	0D	0E	0F
0000	02	00	30	00	00	00	00	00	00	00	00	B2	90	32	00	00
0010	00	00	00	C2	92	D2	92	02	02	77	00	C2	8E	85	75	8D
0020	85	76	8B	D2	8E	02	02	77	00	00	00	00	00	00	00	00
0030	78	05	E4	F2	75	8C	E1	75	8A	E1	75	8D	EA	75	8B	4C
0040	75	75	EA	75	76	4C	75	74	00	7B	00	20	93	08	75	78
0050	08	75	79	00	80	08	75	78	0B	75	79	00	7B	99	75	77
0060	01	75	70	00	75	71	00	75	89	12	43	A8	8A	43	88	50
0070	D2	91	79	00	E3	F5	72	B5	70	1C	79	01	E3	F5	73	B5
0080	71	02	80	EE	50	04	15	71	80	02	05	71	E5	71	79	05
0090	F3	80	DF	02	01	7C	40	FB	05	70	74	C9	B5	70	03	75
00A0	70	C8	E4	B5	74	28	74	1C	B5	70	0D	75	77	06	75	74
00B0	01	C2	8E	D2	AA	02	02	61	E5	70	C3	33	FF	90	0D	80
00C0	93	F5	75	0F	EF	93	F5	76	75	8C	E1	02	00	7A	74	01
00D0	B5	74	18	74	1B	B5	70	00	40	03	02	02	6C	74	24	B5
00E0	70	06	75	77	09	75	74	02	02	61	74	02	B5	74	18	
00F0	74	23	B5	70	00	40	03	02	02	6C	74	36	B5	70	06	75
0100	77	0C	75	74	03	02	02	61	74	03	B5	74	18	74	35	B5
0110	70	00	40	03	02	02	6C	74	48	B5	70	06	75	77	0F	75
0120	74	04	02	02	61	74	04	B5	74	18	74	47	B5	70	00	40
0130	03	02	02	6C	74	59	B5	70	06	75	77	14	75	74	05	02
0140	02	61	74	05	B5	74	18	74	58	B5	70	00	40	03	02	02
0150	6C	74	77	B5	70	06	75	77	1E	75	74	06	02	02	61	74
0160	06	B5	74	07	74	76	B5	70	00	40	03	02	02	6C	74	B2
0170	B5	70	06	75	77	24	75	74	07	02	02	61	15	70	74	07
0180	B5	74	0E	74	A9	B5	70	06	75	77	1E	75	74	06	02	02
0190	6C	74	06	B5	74	18	74	A9	B5	70	00	40	0E	74	6E	B5
01A0	70	06	75	77	14	75	74	05	02	02	6C	02	02	61	74	05
01B0	B5	74	18	74	6E	B5	70	00	40	0E	74	50	B5	70	06	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

01C0 77 0F 75 74 04 02 02 6C 02 02 61 74 04 B5 74 18
01D0 74 50 B5 70 00 40 0E 74 3F B5 70 06 75 77 0C 75
01E0 74 03 02 02 6C 02 02 61 74 03 B5 74 18 74 3F B5
01F0 70 00 40 0E 74 2D B5 70 06 75 77 09 75 74 02 02
0200 02 6C 02 02 61 74 02 B5 74 18 74 2D B5 70 00 40
0210 0E 74 1D B5 70 06 75 77 06 75 74 01 02 02 6C 02
0220 02 61 74 01 B5 74 27 74 1D B5 70 00 40 1D 74 13
0230 B5 70 15 75 77 01 75 74 00 C2 AA 75 8D FE 75 8B
0240 DC D2 8E 75 8C E1 80 06 02 02 6C 02 02 61 E5 70
0250 C3 33 FF 90 0D 80 93 F5 75 0F EF 93 F5 76 02 00
0260 7A 90 0E 00 E5 70 93 F5 8C 02 00 7A 90 0F 00 E5
0270 70 93 F5 8C 02 00 7A BB 99 63 C0 E0 C0 D0 C0 83
0280 C0 82 78 02 85 78 83 85 79 82 E4 30 91 40 93 F2
0290 08 74 78 93 F2 74 F0 08 93 F2 E5 82 25 77 F5 82
02A0 50 02 05 83 74 0C B5 83 07 74 67 B5 82 00 40 0F
02B0 85 83 78 85 82 79 D0 82 D0 83 D0 D0 D0 E0 32 75
02C0 78 0B 75 79 00 D0 82 D0 83 D0 D0 D0 E0 32 93 F2
02D0 78 04 74 78 93 F2 74 F0 18 93 F2 80 BD C0 E0 C0
02E0 D0 C0 83 C0 82 78 02 85 78 83 85 79 82 E4 30 91
02F0 40 93 F2 08 74 78 93 F2 74 F0 08 93 F2 E5 82 25
0300 77 F5 82 50 02 05 83 74 09 B5 83 07 74 67 B5 82
0310 00 40 0F 85 83 78 85 82 79 D0 82 D0 83 D0 D0 D0
0320 E0 32 75 78 08 75 79 00 D0 82 D0 83 D0 D0 D0 E0
0330 32 93 F2 78 04 74 78 93 F2 74 F0 18 93 F2 80 BD

```

.ORG 0800H

***** Data for sine table *****

```

0800 80 82 84 86 88 8B 8D 8F 91 93 96 98 9A 9C 9E A0
0810 A3 A5 A7 A9 AB AD AF B1 B3 B5 B7 B9 BB BD BF C1
0820 C3 C5 C7 C9 CA CC CE D0 D1 D3 D5 D6 D8 DA DB DD
0830 DE E0 E1 E3 E4 E5 E7 E8 E9 EA EC ED EE EF F0 F1
0840 F2 F3 F4 F5 F6 F7 F7 F8 F9 F9 FA FB FB FC FC FD
0850 FD FD FE FE FE FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
0860 FE FE FE FD FD FD FC FC FB FB FA F9 F9 F8 F7 F7
0870 F6 F5 F4 F3 F2 F1 F0 EF EE ED EC EA E9 E8 E7 E5
0880 E4 E3 E1 E0 DE DD DB DA D8 D6 D5 D3 D1 D0 CE CC
0890 CA C9 C7 C5 C3 C1 BF BD BB B9 B7 B5 B3 B1 AF AD
08A0 AB A9 A7 A5 A3 A0 9E 9C 9A 98 96 93 91 8F 8D 8B
08B0 88 86 84 82 80 7D 7B 79 77 74 72 70 6E 6C 69 67
08C0 65 63 61 5F 5C 5A 58 56 54 52 50 4E 4C 4A 48 46
08D0 44 42 40 3E 3C 3A 38 36 35 33 31 2F 2E 2C 2A 29
08E0 27 25 24 22 21 1F 1E 1C 1B 1A 18 17 16 15 13 12
08F0 11 10 0F 0E 0D 0C 0B 0A 09 08 08 07 06 06 05 04
0900 04 03 03 02 02 02 01 01 01 00 00 00 00 00 00 00
0910 00 00 00 00 01 01 01 02 02 02 03 03 04 04 05 06
0920 06 07 08 08 09 0A 0B 0C 0D 0E 0F 10 11 12 13 15
0930 16 17 18 1A 1B 1C 1E 1F 21 22 24 25 27 29 2A 2C
0940 2E 2F 31 33 35 36 38 3A 3C 3E 40 42 44 46 48 4A
0950 4C 4E 50 52 54 56 58 5A 5C 5F 61 63 65 67 69 6C
0960 6E 70 72 74 77 79 7B 7D 80 82 84 86 88 8B 8D 8F
0970 91 93 96 98 9A 9C 9E A0 A3 A5 A7 A9 AB AD AF B1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

0980 B3 B5 B7 B9 BB BD BF C1 C3 C5 C7 C9 CA CC CE D0
0990 D1 D3 D5 D6 D8 DA DB DD DE E0 E1 E3 E4 E5 E7 E8
09A0 E9 EA EC ED EE EF F0 F1 F2 F3 F4 F5 F6 F7 F7 F8
09B0 F9 F9 FA FB FB FC FC FD FD FD FE FE FE FF FF FF
09C0 FF FF FF FF FF FF FF FF FE FE FE FD FD FD FC FC
09D0 FB FB FA F9 F9 F8 F7 F7 F6 F5 F4 F3 F2 F1 F0 EF
09E0 EE ED EC EA E9 E8 E7 E5 E4 E3 E1 E0 DE DD DB DA
09F0 D8 D6 D5 D3 D1 D0 CE CC CA C9 C7 C5 C3 C1 BF BD
0A00 BB B9 B7 B5 B3 B1 AF AD AB A9 A7 A5 A3 A0 9E 9C
0A10 9A 98 96 93 91 8F 8D 8B 88 86 84 82 80 7D 7B 79
0A20 77 74 72 70 6E 6C 69 67 65 63 61 5F 5C 5A 58 56
0A30 54 52 50 4E 4C 4A 48 46 44 42 40 3E 3C 3A 38 36
0A40 35 33 31 2F 2E 2C 2A 29 27 25 24 22 21 1F 1E 1C
0A50 1B 1A 18 17 16 15 13 12 11 10 0F 0E 0D 00 00 00
0A60 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
0A70 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
0A80 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
0A90 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
0AA0 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
0AB0 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
0AC0 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
0AD0 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
0AE0 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
0AF0 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00

```

.ORG 0B00H

** Data for sine add the third harmonic **

```

0B00 80 83 87 8B 8F 93 96 9A 9E A2 A5 A9 AD B0 B4 B7
0B10 BA BE C1 C4 C7 CA CD D0 D3 D5 D8 DB DD DF E2 E4
0B20 E6 E8 EA EC ED EF F1 F2 F3 F5 F6 F7 F8 F9 FA FB
0B30 FB FC FD FD FD FE FE FE FF FF FF FF FF FF FF
0B40 FF FF FE FE FE FE FD FD FD FD FC FC FC FC FB
0B50 FB FB FB FB FB FA FA FA FA FA FA FA FA FA FA
0B60 FB FB FB FB FB FB FC FC FC FC FD FD FD FD FE FE
0B70 FE FE FE FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FE FE FE
0B80 FD FD FD FC FB FB FA F9 F8 F7 F6 F5 F3 F2 F1 EF
0B90 ED EC EA E8 E6 E4 E2 DF DD DB D8 D5 D3 D0 CD CA
0BA0 C7 C4 C1 BE BA B7 B4 B0 AD A9 A5 A2 9E 9A 96 93
0BB0 8F 8B 87 83 80 7C 78 74 70 6C 69 65 61 5D 5A 56
0BC0 52 4F 4B 48 45 41 3E 3B 38 35 32 2F 2C 2A 27 24
0BD0 22 20 1D 1B 19 17 15 13 12 10 0E 0D 0C 0A 09 08
0BE0 07 06 05 04 04 03 02 02 02 01 01 01 00 00 00 00
0BF0 00 00 00 00 00 00 01 01 01 01 01 02 02 02 02 03
0C00 03 03 03 04 04 04 04 04 04 05 05 05 05 05 05 05
0C10 05 05 05 05 04 04 04 04 04 04 03 03 03 03 02 02
0C20 02 02 01 01 01 01 01 00 00 00 00 00 00 00 00
0C30 00 01 01 01 02 02 02 03 04 04 05 06 07 08 09 0A
0C40 0C 0D 0E 10 12 13 15 17 19 1B 1D 20 22 24 27 2A
0C50 2C 2F 32 35 38 3B 3E 41 45 48 4B 4F 52 56 5A 5D
0C60 61 65 69 6C 70 74 78 7C 80 83 87 8B 8F 93 96 9A
0C70 9E A2 A5 A9 AD B0 B4 B7 BA BE C1 C4 C7 CA CD D0

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

0C80 D3 D5 D8 DB DD DF E2 E4 E6 E8 EA EC ED EF F1 F2
0C90 F3 F5 F6 F7 F8 F9 FA FB FB FC FD FD FD FE FE FE
OCA0 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FE FE FE FE FE FD
0CB0 FD FD FD FC FC FC FC FB FB FB FB FB FB FA FA FA
0CC0 FA FA FA FA FA FA FA FA FB FB FB FB FB FB FC FC
0CD0 FC FC FD FD FD FD FE FE FE FE FE FF FF FF FF FF
0CE0 FF FF FF FF FF FE FE FE FD FD FD FC FB FB FA F9
0CF0 F8 F7 F6 F5 F3 F2 F1 EF ED EC EA E8 E6 E4 E2 DF
0D00 DD DB D8 D5 D3 D0 CD CA C7 C4 C1 BE BA B7 B4 B0
0D10 AD A9 A5 A2 9E 9A 96 93 8F 8B 87 83 80 7C 78 74
0D20 70 6C 69 65 61 5D 5A 56 52 4F 4B 48 45 41 3E 3B
0D30 38 35 32 2F 2C 2A 27 24 22 20 1D 1B 19 17 15 13
0D40 12 10 0E 0D 0C 0A 09 08 07 06 05 04 04 03 02 02
0D50 02 01 01 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00

```

```

;*****

```

```

.ORG 0D80H

```

```

;***** Time delay data on free running ****

```

```

;*****

```

```

0D80 EA 4C EA 4C F5 26 F8 C4 FA 93 FB A9 FC 62 FC E6
0D90 FD 4A FD 97 FD D4 FE 07 FE 31 FE 55 FE 73 FE 8E
0DA0 FE A5 FE B9 FE CB FE DC FE EA FE F7 FF 03 FF 0E
0DB0 FF 19 FF 22 FF 2A FF 32 FF 00 00 00 00 00 00 00
0DC0 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
0DD0 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
0DE0 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
0DF0 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00

```

```

;*****

```

```

.ORG 0E00H

```

```

;***** Time delay for changing gear up ****

```

```

;*****

```

```

0E00 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1
0E10 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 D8 DA DB DC
0E20 DD DE DF E0 D2 D3 D4 D5 D6 D7 D8 D9 DA DB DC DD
0E30 DD DE DF DF E0 E1 D7 D8 D8 D9 DA DA DB DC DC DD
0E40 DD DE DE DF DF E0 E0 E1 D9 DA DA DB DB DC DC DD
0E50 DD DE DE DF DF DF E0 E0 E0 D6 D7 D7 D8 D8 D9 D9
0E60 D9 DA DA DB DB DB DC DC DC DD DD DD DE DE DE DF
0E70 DF DF E0 E0 E0 E0 E1 D1 D2 D2 D2 D3 D3 D4 D4 D4
0E80 D5 D5 D5 D6 D6 D6 D7 D7 D7 D7 D8 D8 D8 D9 D9 D9
0E90 D9 DA DA DA DA DB DB DB DB DC DC DC DC DD DD DD
0EA0 DD DD DE DE DE DE DF DF DF DF DF E0 E0 E0 E0 E0
0EB0 E0 E1 DB DB DB DB DB DC DC DC DC DC DD DD DD DD
0EC0 DD DD DE DE DE DE DE DE DF 00 00 00 00 00 00 00
0ED0 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
0EE0 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
0EF0 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00

```

```

;*****

```

```

.ORG 0F00H

```

```

;***** Time delay for changing gear down ***

```

```

;*****

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

0F00 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1 E1
0F10 E1 E1 E1 E1 C8 CB CD D0 D2 D4 D5 D7 D8 DA C8 CA
0F20 CC CD CF D0 D2 D3 D4 D5 D6 D7 D8 D9 DA DB D0 D1
0F30 D2 D3 D4 D4 D5 D6 D7 D8 D8 D9 DA DA DB DC DC DD
0F40 D5 D5 D6 D7 D7 D8 D8 D9 D9 DA DA DB DB DC DC DD
0F50 DD D2 D3 D3 D4 D4 D5 D5 D6 D6 D7 D7 D8 D8 D9 D9
0F60 D9 DA DA DB DB DB DC DC DC DD DD DE DE DE CE
0F70 CE CF CF D0 D0 D1 D1 D1 D2 D2 D2 D3 D3 D4 D4 D4
0F80 D5 D5 D5 D6 D6 D6 D7 D7 D7 D7 D8 D8 D8 D9 D9 D9
0F90 D9 DA DA DA DA DB DB DB DB DC DC DC DC DD DD DD
0FA0 DD DD DE DE DE DE DF DF DF DF D9 D9 D9 D9 DA DA
0FB0 DA DA DB DB DB DB DB DC DC DC DC DC DD DD DD DD
0FC0 DD DD DE DE DE DE DE DE DF 00 00 00 00 00 00

```

tasm: Number of errors = 0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.
ผลงานวิจัยในระหว่างการศึกษาปริญญาโท ที่ได้รับการเผยแพร่ ในประชุมวิชาการทาง
วิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 13 พ.ศ. 2533 ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดความเร็วของมอเตอร์ด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ 8031

(Motor Speed Measurement Based on 8031 Microprocessor.)

อำนวยการ สุกใส *
 เกียรติวราภ ทรงสิทธิ์ *
 โยธิน เปรมปรานีรัชต์ **

บทคัดย่อ

ผลงานวิจัยนี้เสนอวิธีการวัดความเร็วของมอเตอร์ด้วยไมโครโปรเซสเซอร์เบอร์ 8031 ระบบการวัดความเร็วของมอเตอร์นี้ จะคำนวณความเร็วของมอเตอร์จากความถี่ที่ได้จากตัวสปีดเอนโคเดอร์ ด้วยวิธีการคำนวณแบบ M/T สามารถวัดความเร็วของมอเตอร์ได้ในระยะเวลาอันสั้น มีความเที่ยงตรงและความละเอียดสูง

Abstract

This research paper presents a method for motor speed measurement by using a microprocessor 8031. The proposed motor speed measurement system will provide a calculation of the motor speed from the frequencies which have been obtained by a speed encoder. The use of the calculation of M/T method, the motor speed can be measured within a short detecting time period with high accuracy and high resolution by this system.

-
- * อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 - ** รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ในระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่มีความเที่ยงตรงและความละเอียดสูง จำเป็นต้องมีระบบการวัดความเร็วของมอเตอร์ที่มีความเที่ยงตรงและความละเอียดสูงเช่นกัน นอกจากนั้นยังต้องใช้เวลาอันสั้นในการวัดความเร็ว ในปัจจุบันระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วยไมโครคอมพิวเตอร์จะใช้วิธีการวัดความเร็วของมอเตอร์ด้วยการคำนวณความเร็วจากความถี่ของพัลส์ที่ได้จากสปีดเอนโคเดอร์ [1] [2] [3] โดยที่ความถี่ของพัลส์จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วของมอเตอร์ และวิธีการคำนวณดังกล่าวกระทำโดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ ได้มีการพัฒนาเป็นระบบวัดความเร็วของมอเตอร์แล้วตามเอกสารอ้างอิง [4] [5] แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันไมโครโปรเซสเซอร์ได้รับการพัฒนาจนเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานการวัดคุมระบบต่าง ๆ ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากไมโครโปรเซสเซอร์ในปัจจุบันสามารถคำนวณได้รวดเร็วขึ้น มีขนาดเล็กลงและราคาถูกลง

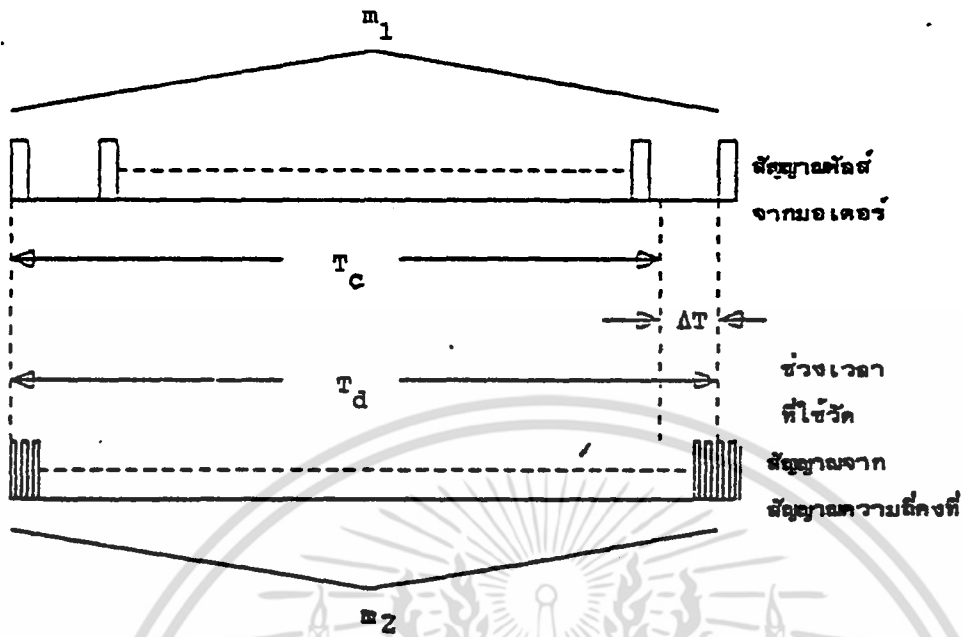
ผลงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเอาไมโครโปรเซสเซอร์ 8031 มาใช้ในการคำนวณวัดความเร็วของมอเตอร์ด้วยวิธี M/T [4] ซึ่งจะให้ความเที่ยงตรงและความละเอียดในการวัดได้ดีมาก และใช้เวลาในการวัดสั้นเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในระบบเรีคกูเลทความเร็วที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง

2. ระบบการวัดความเร็ว

2.1 ทฤษฎี

คุณสมบัติที่สำคัญของเทคนิคการวัดความเร็วของมอเตอร์โดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ คือ

1. ความละเอียดสูง (High Resolution) ระบบควบคุมมอเตอร์ที่ต้องการประสิทธิภาพควบคุมกว้าง จึงต้องมีระบบวัดความเร็วที่มีความละเอียดสูง
2. ความเที่ยงตรงสูง (High Accuracy) ระบบวัดความเร็วที่มีความเที่ยงตรงสูงจะมีผลทำให้ความเที่ยงตรงในการควบคุมที่จุดสภาวะคงตัว (Steady State) ดี
3. เวลาในการวัดสั้น (Short Detecting Time) เนื่องจากค่าความเร็วที่วัดได้ไม่ได้เป็นความเร็วชั่วขณะ แต่เป็นความเร็วเฉลี่ยในช่วงเวลาที่วัด นอกจากนี้ช่วงเวลานี้ยังเป็นตัวแปรซึ่งกำหนดคุณสมบัติความเร็วในการตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วย ดังนั้นถ้าต้องการให้ระบบควบคุมมอเตอร์มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ช่วงเวลาที่ใช้วัดควรมีค่าต่ำ



รูปที่ 1 แสดงหลักการเทคนิคการวัดความเร็วแบบวิธี M/T

หลักการของเทคนิคการวัดความเร็วแบบ M/T แสดงดังรูปที่ 1

ช่วงเวลาที่ใช้วัด T_d (วินาที) ถูกกำหนดโดยพัลส์ลูกแรกต่อจากช่วงเวลา T_c (วินาที) ที่กำหนด N_r (รอบต่อนาที) เป็นความเร็วของมอเตอร์ที่วัดได้และ X (เรเดียน) เป็นระยะทางเชิงมุมที่มอเตอร์เคลื่อนไปในช่วงเวลา T_d ดังนั้นความเร็วของมอเตอร์ที่วัดได้คือ

$$N_r = \frac{60X}{2\pi T_d} = \frac{60X}{2\pi (T_c + \Delta T)} \quad (1)$$

เมื่อ m_1 เป็นจำนวนพัลส์ที่ได้จากมอเตอร์ในช่วงเวลา T_d และเมื่อมอเตอร์หมุนหนึ่งรอบมีจำนวนพัลส์ P พัลส์ นั่นคือ

$$X = \frac{2\pi m_1}{P} \quad (2)$$

สัญญาณความถี่ความถี่ f_c (Hertz) และสัญญาณนับได้ m_2 ในช่วงเวลา T_d

$$T_d = \frac{m_2}{f_c} \quad (3)$$

แทนค่าสมการ (2), (3) ลงในสมการที่ (1)

$$N_r = \frac{60 f_c m_1}{P m_2} \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 คุณสมบัติ

พิจารณาคำนวณสมการของค่าความละเอียด (Resolution) Q_n (รอบต่ออนาที) ค่าความเที่ยงตรง (Accuracy) ϵ (เปอร์เซ็นต์) และช่วงเวลาที่ใช้วัด T_d (วินาที) ของการวัดแบบวิธี M/T

ค่าความละเอียด Q_n (รอบต่ออนาที) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) เมื่อ m_2 เปลี่ยนไปจาก m_2 เป็น $m_2 - 1$

$$Q_n = \frac{60f_c m_1}{P} \left[\frac{1}{m_2 - 1} - \frac{1}{m_2} \right] = \frac{60f_c m_1}{P m_2 (m_2 - 1)} \quad (5)$$

ถ้าความเที่ยงตรงเชิงมุมของพัลส์ทั้งสองต่อกันมีค่า ϵ_p (เปอร์เซ็นต์) ดังนั้นเมื่อนับพัลส์จากมอเตอร์ได้ m_1 พัลส์ ค่าความเที่ยงตรง ϵ จะมีค่า

$$\epsilon = \frac{\epsilon_p}{m_1} \quad (6)$$

ช่วงเวลาที่ใช้วัดแสดงได้ดังสมการ

$$T_d = T_c \quad (T = 0)$$

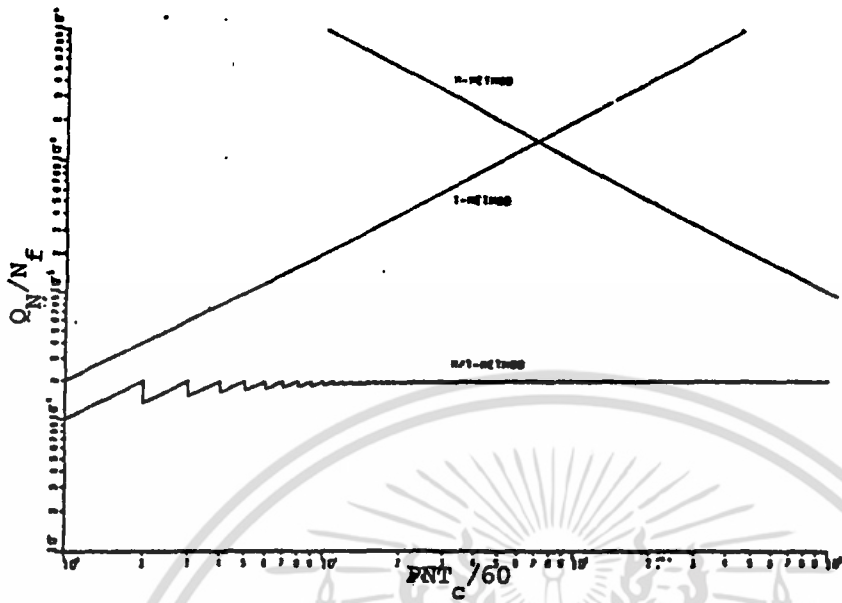
$$T_d = \left\{ \left[\frac{P \cdot N \cdot T_c}{60} + 1 \right] / \frac{60}{P \cdot N} \right\} \quad (T \neq 0) \quad (7)$$

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบหลักการ สมการความเร็วที่วัดได้, สมการค่าความละเอียด, สมการค่าความเที่ยงตรง และสมการช่วงเวลาที่ใช้วัดของวิธีการวัดแบบวิธี M, วิธี T และวิธี M/T รูปที่ 2, รูปที่ 3 และรูปที่ 4 แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างเทคนิคการวัดทั้งสามแบบ เมื่อ $P = 300$ พัลส์/รอบ, $f_c = 500$ kHz, $T_c = 10$ mSec

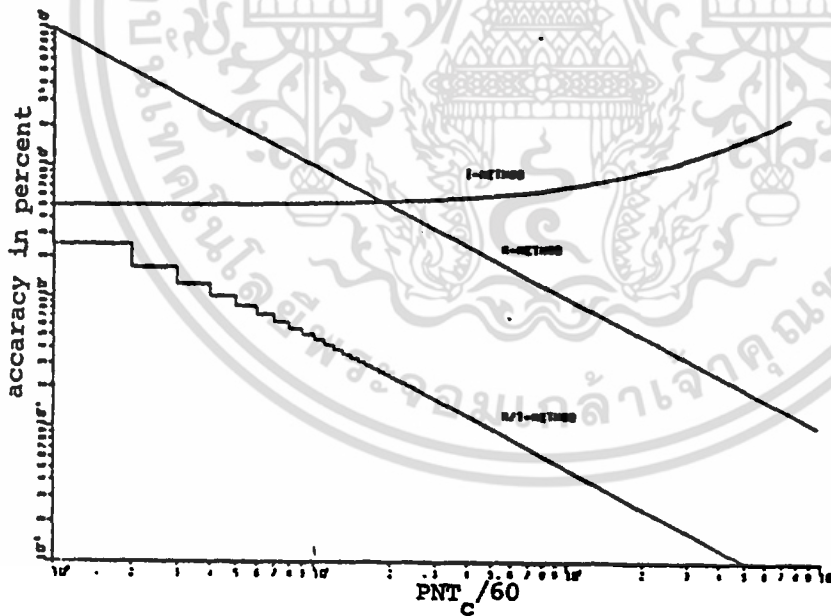
METHOD	M	T	M/T
PRINCIPLES			
MEASURED SPEED VALUE N_f (rpm)	$60m_1 / PT_c$	$60f_c / Pm_2$	$60f_c m_1 / Pm_2$
DETECTING TIME T_d / T_c	1	$60 / PNT_c$	$60 \left[\frac{PT_c}{60} + 1 \right] / PNT_c$
RESOLUTION Q_n / N_f	$1 / m_1 \quad (m_1 - 1 < NPT_c / 60 < m_1)$	$1 / \{ (60f_c / PNT_c) - 1 \}$	$1 / \{ (60f_c m_1 / PNT_c) - 1 \}$
ACCURACY ϵ (%)	$100 / m_1$	$\epsilon_p \cdot \{ 100 / (m_2 - 1) \}$	ϵ_p / m_1

ตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

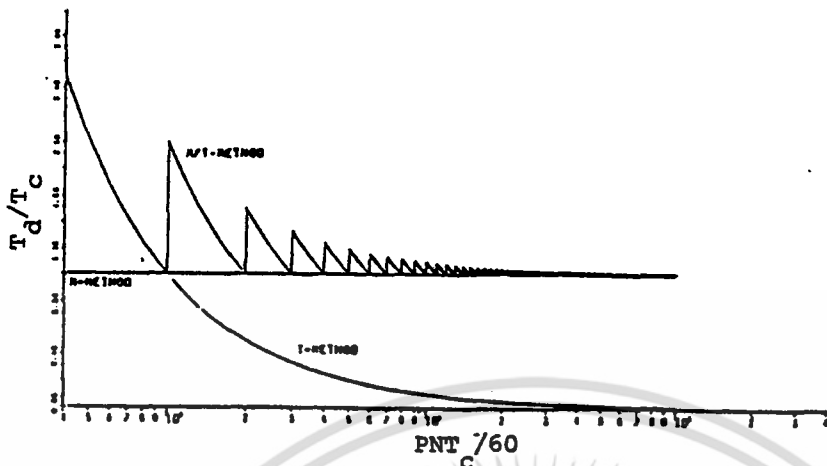


รูปที่ 2 แสดงค่าความละเอียดเปรียบเทียบระหว่างวิธีการวัดแบบ M-method, T-method และ M/T-method



รูปที่ 3 แสดงค่าความเที่ยงตรงเปรียบเทียบระหว่างวิธีการวัดแบบ M-method, T-method และ M/T-method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 แสดงค่าช่วงเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีการวัดแบบ M-method, T-method และ M/T-method

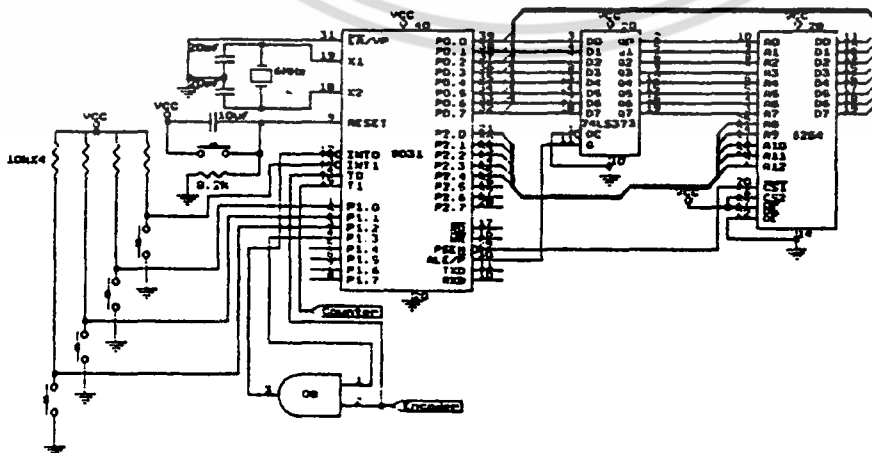
3. การออกแบบระบบการวัดความเร็วด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ 8031

จากหลักการวัดความเร็วของมอเตอร์ในการวัดแบบเอ็ม-ที ดังรูปที่ 1 จะต้องทำการนับสัญญาณ 2 สัญญาณ คือสัญญาณจากเอนโคเดอร์ และสัญญาณความถี่ที่นำมาเปรียบเทียบ โดยเริ่มนับที่พัลส์แรกของสัญญาณทั้งสองพร้อมกัน และหยุดนับที่พัลส์สุดท้ายพร้อมกัน จากนั้นนำค่าจำนวนพัลส์ของสัญญาณทั้งสองมาคำนวณเป็นค่าความเร็วมอเตอร์ต่อไป

ดังนั้นในการออกแบบและสร้างวงจร สามารถแบ่งเป็นส่วน ๆ ได้ดังนี้

ส่วนประมวลผล

ส่วนประมวลผลประกอบด้วย 8031 พร้อมทั้งส่วนเก็บความจำของโปรแกรมภายนอกเป็นหน่วยความจำชนิด EPROM ขนาด 2 Kbyte เบอร์ 2716 โดยพอร์ท 0 ของ 8031 เป็นทั้งพอร์ทส่งแอดเดรสของข้อมูล รวมทั้งเป็นพอร์ทที่รับและส่งข้อมูลด้วย จึงต้องใช้ 74LS373 เป็นตัวแลทช์แอดเดรสของข้อมูล ในขณะที่ 8031 กำลังส่งและรับข้อมูลดังรูปที่ 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 5 แสดงส่วนประกอบของส่วนประมวลผล ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพอร์ทอื่น ๆ ของ 8031 ที่กำหนดในการใช้งานนี้

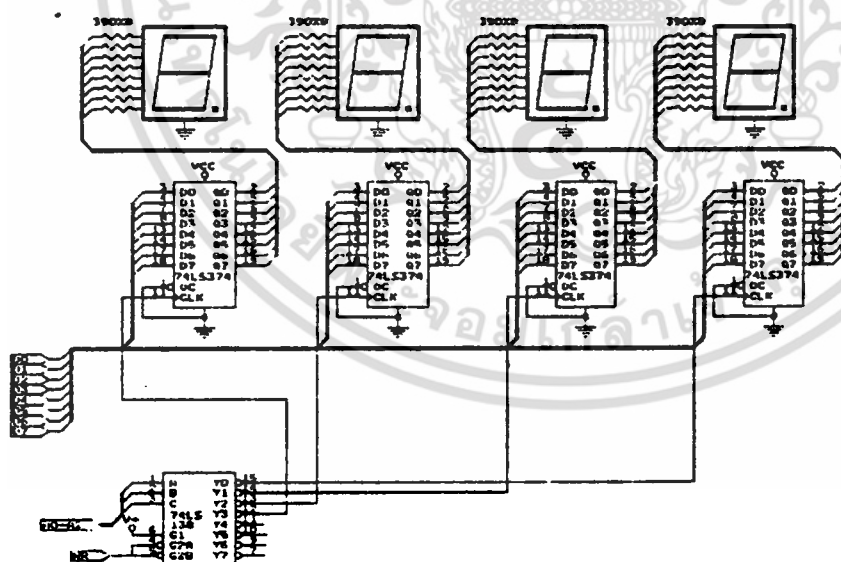
พอร์ท 1.0, 1.1, 1.2 เป็นส่วนที่ใช้ป้อนค่า P (จำนวนสัญญาณที่ได้จากการหมุนของมอเตอร์ครบหนึ่งรอบ) ซึ่งค่า P นี้ ผู้ใช้จะต้องป้อนให้กับเครื่องวัดความเร็วก่อนที่จะทำการวัด

พอร์ท 1.3 เป็นส่วนที่ 8031 จะใช้เป็นส่วนที่ส่งสัญญาณเริ่มต้นและหยุดนับเพื่อไปทำการ AND กับสัญญาณจากเอนโคเดอร์ และสัญญาณที่ได้จากการ AND แล้วจะถูกป้อนเข้าสู่ขาอินเทอร์รัพท์ 0 ของ 8031 เพื่อให้ 8031 ส่งให้ตัวนับภายในทำการเริ่มต้นและหยุดนับพร้อมกับสัญญาณจากเอนโคเดอร์ได้พอดี

ส่วนของขาอินเทอร์รัพท์ 1 เป็นส่วนที่ทำให้ผู้ใช้ทำการกดสวิตช์ที่ต่อเข้าไปเพื่อเริ่มทำการนับค่าความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งในขณะที่ทำการวัดความเร็วของมอเตอร์อยู่สามารถที่จะเปลี่ยนค่า P ใหม่ได้ โดยการกดปุ่มอินเทอร์รัพท์ 1 เสียก่อนแล้วจึงป้อนค่า P หลังจากนั้นถ้าทำการกดอินเทอร์รัพท์ 1 ก็จะเป็นการเริ่มต้นนับใหม่อีกครั้งหนึ่ง

ส่วนแสดงผล

ส่วนแสดงผลประกอบด้วย 7-segment ชนิด common anode จำนวน 4 ตัว และใช้ 74LS374 จำนวน 4 ตัว ทำหน้าที่แลนท์ข้อมูล เพื่อทำการแสดงผลของ 7-segment สามารถแสดงผลพร้อมกันทั้ง 4 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 6



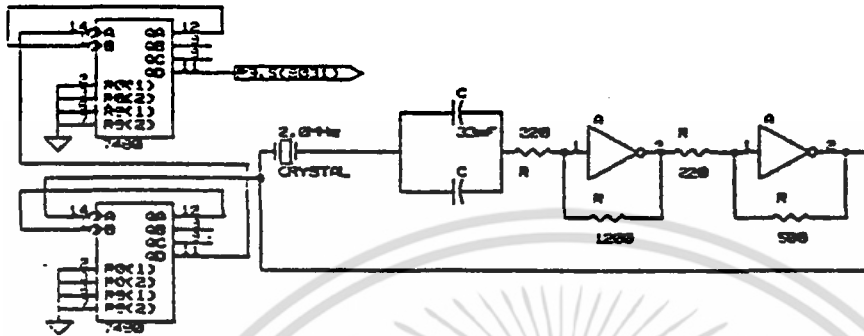
รูปที่ 6 แสดงส่วนประกอบของส่วนแสดงผล

ส่วนกำเนิดความถี่

ส่วนกำเนิดความถี่ เป็นส่วนที่กำเนิดความถี่ขนาด 20 KHz เพื่อนำมาเป็นสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

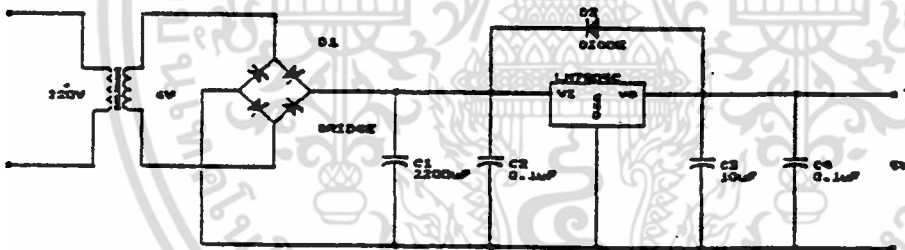
เปรียบเทียบ ประกอบด้วย 74LS00 พร้อมทั้งควิสตัลขนาด 2 MHz เป็นวงจรกำเนิดความถี่ขนาด 2 MHz ซึ่งต้องทำการหารความถี่ให้เหลือเพียง 20 KHz จึงต้องมีวงจรหารความถี่เป็นวงจรหารลิบ 2 ชุด โดยเราใช้ 74LS90 จำนวน 2 ตัว ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงส่วนประกอบของส่วนกำเนิดความถี่ขนาด 20 KHz

แหล่งจ่ายพลังงาน

ส่วนจ่ายพลังงาน เป็นส่วนที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์ เป็นไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 โวลต์ เพื่อจ่ายให้กับส่วนอื่น ๆ ของวงจร ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงส่วนประกอบของส่วนจ่ายพลังงาน

ส่วนตรวจจับสัญญาณ

ส่วนตรวจจับสัญญาณ เป็นส่วนที่ใช้ตรวจจับสัญญาณจากแกนของมอเตอร์โดยตรงเพื่อสามารถใช้วัดความเร็วของมอเตอร์ที่ไม่มีเอนโคเดอร์ในตัว ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ

1. โฟโตทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็น (NPN PHOTO-TRANSISTOR)
2. วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (VOLTAGE COMPARATOR CIRCUIT)

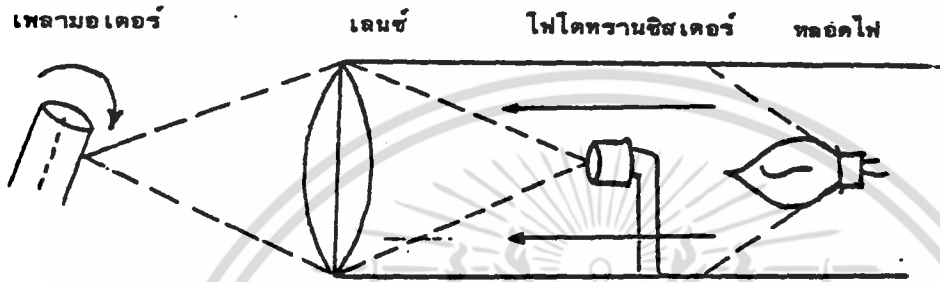
หลักการทำงาน

โฟโตทรานซิสเตอร์ทำการแปลงสัญญาณ โดยการเปลี่ยนความเข้มของแสงเป็นสัญญาณแรงดันทางไฟฟ้า แล้วนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน ซึ่ง

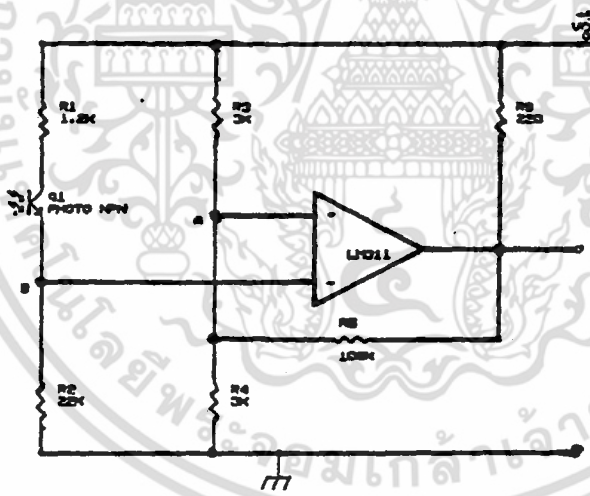
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อโฟโตทรานซิสเตอร์ยังไม่ได้รับแสง สัญญาณแรงดันจะต่ำกว่าแรงดันอ้างอิง จะได้สัญญาณเอาต์พุตเป็น 1 และเมื่อโฟโตทรานซิสเตอร์ได้รับแสง สัญญาณแรงดันจะสูงกว่าแรงดันอ้างอิงจะได้สัญญาณเอาต์พุตเป็น 0 โดยค่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้นี้จะนำไปป้อนสู่ส่วนประมวลผล เพื่อทำการนับและคำนวณเป็นค่าความเร็วของมอเตอร์อีกทีหนึ่ง

สำหรับในรูปที่ 9 แสดงการวางตำแหน่งของส่วนตรวจจับสัญญาณ



รูปที่ 9 แสดงการวางตำแหน่งของส่วนตรวจจับสัญญาณ

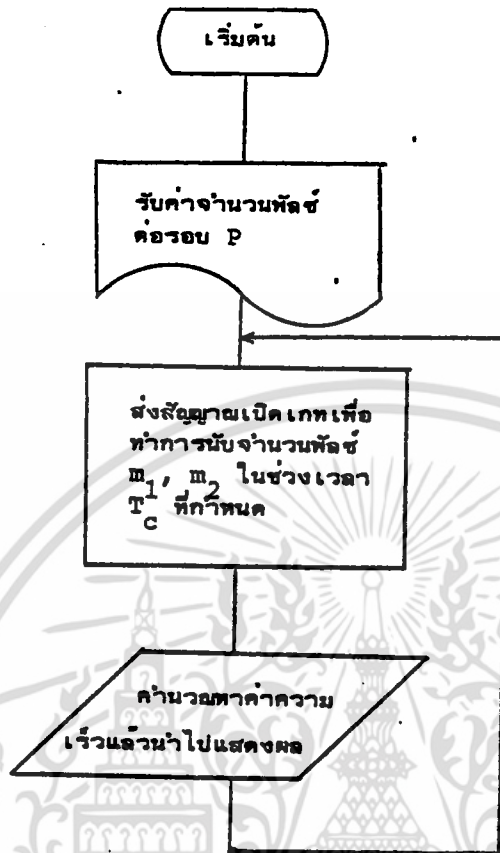


รูปที่ 10 วงจรส่วนตรวจจับสัญญาณ

4. การออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงาน

ในการใช้ 8031 วัดค่าความเร็วของมอเตอร์ จะใช้ตัวนับภายในทำหน้าที่นับจำนวนสัญญาณทั้ง 2 สัญญาณ คือสัญญาณจากเอนโคเดอร์ และสัญญาณจากส่วนกำเนิดความถี่ขนาด 20 KHz ซึ่งได้กำหนดให้ตัวนับภายในทั้ง 2 ตัวทำหน้าที่เป็นตัวนับในโหมด 2 ซึ่งสามารถนับได้ 16 บิต ทำให้สามารถนับได้สูงสุดถึง 65,535 พัลส์ ส่วนอินเทอร์รัพท์ภายนอก 1 ให้มีลำดับความสำคัญสูงกว่าอินเทอร์รัพท์ภายนอก 0 และทั้งสองอินเทอร์รัพท์ให้ทำงานที่ขอบขาลงของสัญญาณ ซึ่งขั้นตอนการทำงานทั้งหมดได้แสดงเป็น FLOWCHART ในรูปที่ 12

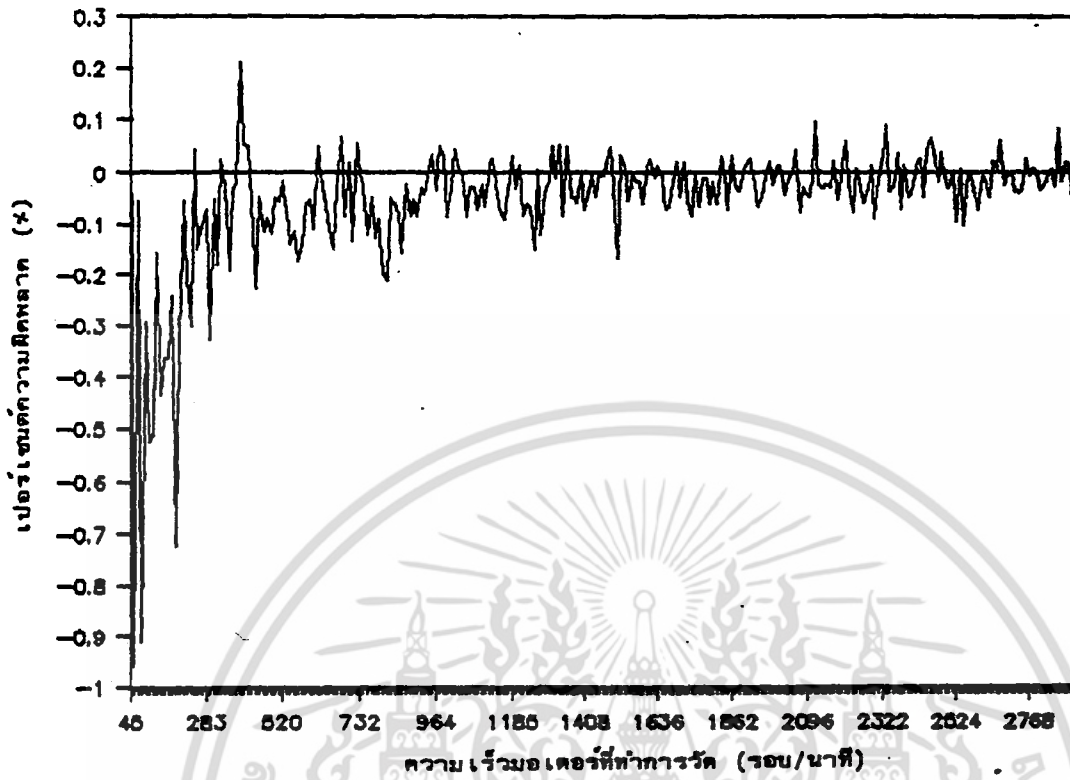
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



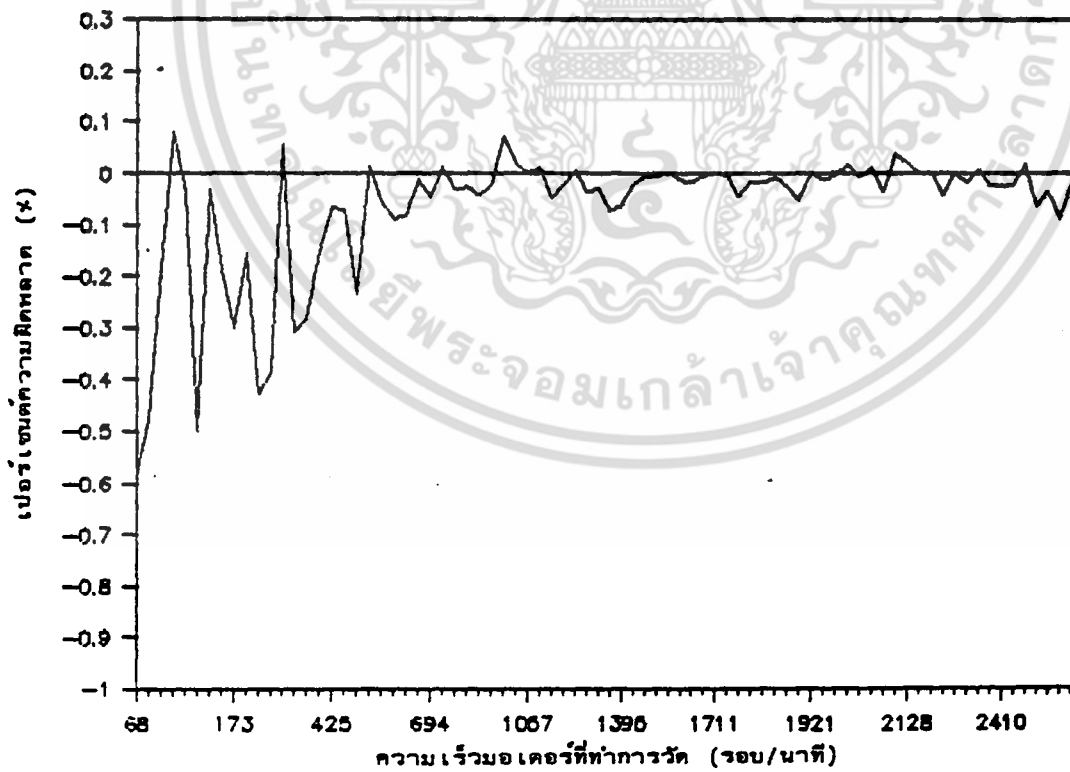
รูปที่ 12 FLOWCHART แสดงขั้นตอนการทำงานของ 8031

5. ผลการทดลอง

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบ และสร้างวงจร พร้อมทั้งส่วนของโปรแกรม ได้มีการทดสอบเครื่องวัดความเร็วของมอเตอร์ที่ทำการสร้างขึ้น เปรียบเทียบกับเครื่องวัดความเร็วมอเตอร์ที่เป็นมาตรฐาน โดยในขั้นแรกได้ทำการวัดค่าความเร็วของมอเตอร์โดยรับสัญญาณเอนโคเดอร์ที่มีอยู่ภายในตัวมอเตอร์ที่ทำการทดสอบ โดยมีค่า $P = 250$ แล้วทำการบันทึกผลการทดลอง หลังจากนั้นจึงนำส่วนตรวจจับสัญญาณที่ได้สร้างขึ้นมาทำการตรวจจับสัญญาณแทนเอนโคเดอร์ที่มีอยู่ภายในตัวของมอเตอร์ ซึ่งในกรณีนี้จะได้ค่า $P = 1$ แล้วทำการบันทึกผลการทดลอง หลังจากนั้นจึงได้คำนวณค่าความผิดพลาดและได้นำมาพล็อตเป็นเส้นกราฟดังแสดงไว้ในรูปที่ 13 และ 14 ตามลำดับ



รูปที่ 13 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดเมื่อ P = 250



รูปที่ 14 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดเมื่อ P = 1


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. บทสรุป

ในการวัดความเร็วของมอเตอร์ สามารถเลือกใช้อุปกรณ์การวัดได้หลายแบบขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบ แต่ในผลงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ 8031 ไมโครโปรเซสเซอร์เป็นส่วนประมวลผล เนื่องจากว่าทำให้การออกแบบวงจรสามารถทำได้ง่ายขึ้น ทั้งยังสามารถนำค่าความเร็วมอเตอร์ที่วัดได้ไปใช้ในการควบคุมมอเตอร์อีกทีหนึ่ง โดยเครื่องวัดความเร็วมอเตอร์ที่ได้จัดทำขึ้นนี้ใช้ระยะเวลาในการวัดสั้น, สามารถวัดความเร็วมอเตอร์ในช่วงที่กว้าง, ทั้งยังให้ค่าความผิดพลาดน้อย จากผลการทดลองได้ค่าความผิดพลาดไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือวัดความเร็วหรือในระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่มีความเที่ยงตรงและความละเอียดสูง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] P.A., Lajoie, "The incremental encoder and optoelectronic commutator" Proceeding of the 2nd annual symposium on incremental motion control and devices, University of Illinois, pp.61-63., 1973
- [2] C.G., Streatfield, "A digital tachometer using commercial counter" Int. J. Electr. Eng. Educ., pp. 101-102, 1971
- [3] Y. Prempraneerach, "New inductive speed transducer" IEE Proc. Vol 129, No.1, January, pp. 30-34, 1982
- [4] P. Ohmae, "A Microprocessor-Controlled high-accuracy wide-range for motor drives" IEEE, Trans. Indus, Electr., Vol. IE-29, No.3 August, pp. 207-211, 1982
- [5] โยธิน เปรมปราณีรัชต์ และคณะ "เทคนิคการวัดความเร็วของมอเตอร์ในระบบการควบคุมมอเตอร์ โดยไมโครคอมพิวเตอร์" สัมมนาทางวิชาการ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 6 ณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2526



ภาคผนวก ฉ.
ผลงานวิจัยในระหว่างการศึกษาปริญญาโท ที่ได้รับการเผยแพร่ ในประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ประจำปี 2534 เรื่อง " Electrotechnology '91 " ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธี PWM
โดยไมโครโปรเซสเซอร์
(Induction Motor Speed Control With
PWM Method Based on μP)

ขำรงค์ศักดิ์ สุภัส
นักศึกษาระดับปริญญาโท
พระจอมเกล้าลาดกระบัง กรุงเทพฯ

วรศักดิ์ จิตรภักดี
อาจารย์
พระจอมเกล้าลาดกระบัง กรุงเทพฯ

Thamrongsak Suksai
Graduate Student
KMITL Bangkok, Thailand

Worasak Chitphakdee
Lecturer
KMITL Bangkok, Thailand

โยธิน เปรมปราณีรัตน์
รองศาสตราจารย์
พระจอมเกล้าลาดกระบัง กรุงเทพฯ

Yothin Prempraneerach
Assoc. Professor
KMITL Bangkok, Thailand

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยวิธี PWM โดยนำสัญญาณชานซ์ซึ่งประกอบด้วยฮาร์โมนิกที่ 3 มาคูณเข้ากับสัญญาณสามเหลี่ยมแบบซิงโครนัสแบบครึ่งคลื่น โดยมีสัดส่วนความถี่ของสัญญาณทั้งสองคงที่ และสัดส่วนความถี่ของสัญญาณทั้งสองดังกล่าวจะเปลี่ยนตามช่วงของความถี่ การสร้างสัญญาณต่างๆ ดังกล่าวนี้ จะกระทำโดย ไมโครโปรเซสเซอร์ 8031 และนำ 8031 อีกชุดหนึ่งมาใช้ในการควบคุมชุดสร้างสัญญาณข้างต้น โดยสามารถ ปรับสัดส่วนของโวลต์เดจต่อความถี่ อัตราเร่ง อัตราหน่วงในการเปลี่ยนแปลงความเร็ว และเพิ่มโวลต์เดจขึ้นในช่วงความถี่ต่ำได้ด้วย

Summary

This paper presents the speed control of 3 phases induction motor with PWM method that uses the sinusoidal signal which compose of the third harmonic to modulate with the triangular signal in form of the uniform sampling with the constancy of the frequency ratio of both signals and such frequency ratio will vary according to the frequency range. Those controlling signals are achieved by the implement of microprocessor 8031. In addition we use one more microprocessor to control the first one. By this microprocessor, we can adjust the ratio of voltage to frequency, the acceleration and deceleration of the speed variation and the voltage in low frequency range also can be boosted.

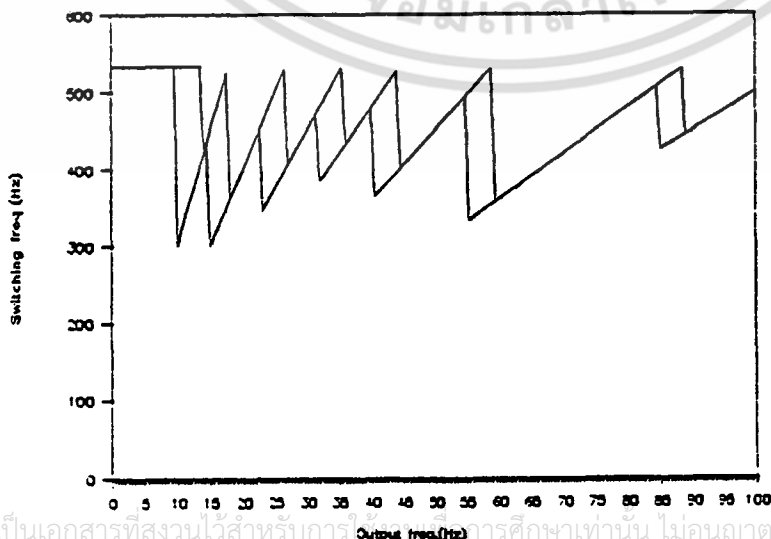
บทนำ

ในอุตสาหกรรมปัจจุบัน มอเตอร์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในส่วนต้นกำลังของเครื่องจักรทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำมีราคาไม่แพง การบำรุงรักษาน้อย และสามารถควบคุมแบบเปิด (open loop) ได้ โดยความเร็วไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง แต่การสร้างรูปคลื่นที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ค่อนข้างยุ่งยาก ปัจจุบันไมโครโปรเซสเซอร์ถูกพัฒนาให้มีขนาดเล็กลง ประสิทธิภาพสูงขึ้น ดังนั้นบทความนี้จึงมุ่งเน้นแนวทางในการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ สร้างรูปคลื่น PWM ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ เพื่อแก้ปัญหาความยุ่งยากดังกล่าว และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นด้วย

การสร้างรูปคลื่น PWM เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ในบทความนี้ ใช้วิธีมอดูเลต(modulate) แบบซิมพลิง(Uniform sampling) โดยให้สัดส่วนความถี่ของสัญญาณทั้งสองเป็นจำนวนเต็ม และเปลี่ยนสัดส่วนของความถี่ในขณะที่เปลี่ยนความเร็วดังรูปที่ 1 ส่วนรูปคลื่นที่นำมามอดูเลตกับรูปคลื่นสามเหลี่ยมนั้น ใช้สัญญาณซิงค์ที่ประกอบด้วยฮาร์โมนิกที่ 3 จากเอกสารอ้างอิง [1] ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็น

$$Y = \sin\theta + \sin(3\theta)/6$$

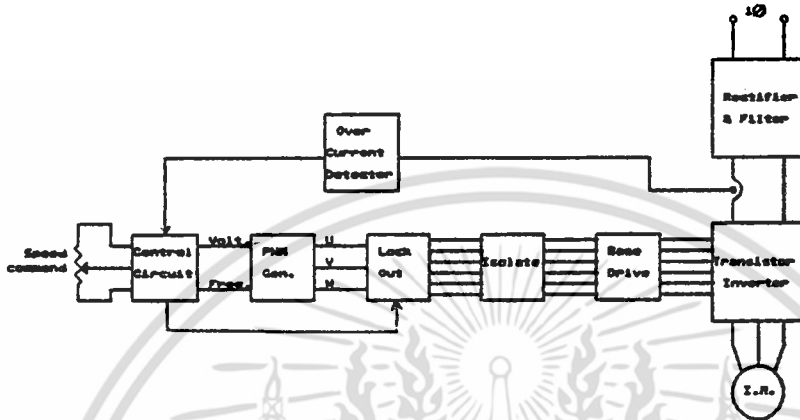
(1)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งรูปที่ 1 แสดงสัดส่วนความถี่ของสัญญาณ เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและการสร้างชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์

ส่วนประกอบทั้งหมดที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นนี้ แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยส่วนคัตติกระแสและกรองความถี่ต่ำผ่าน(Rectifier & filter)เพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้แก่ชุดทรานซิสเตอร์อินเวอร์เตอร์ใช้ขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์

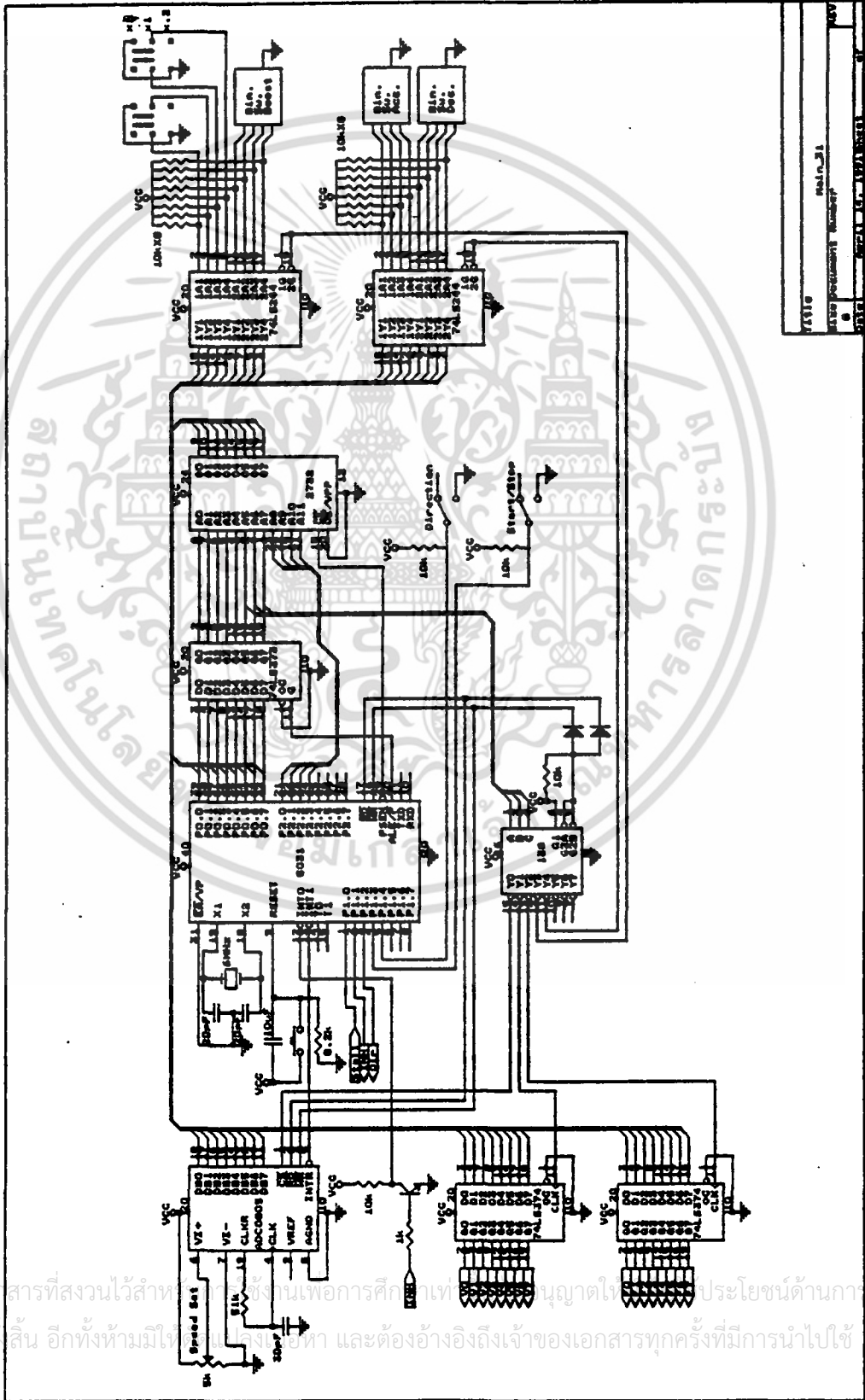
ส่วนควบคุมแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนควบคุมโวลต์-ความถี่ และส่วนสร้างสัญญาณ PWM รวมทั้งมีวงจรประกอบอื่นๆ ได้แก่ วงจรหน่วงเวลา วงจรแยกสัญญาณ วงจรรับทรานซิสเตอร์ และวงจรตรวจจับกระแส ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียด แยกเป็นส่วนๆต่อไป

ส่วนควบคุมโวลต์-ความถี่ แสดงดังรูปที่ 3 มีหน้าที่รับค่าความถี่ ซึ่งกำหนดความเร็ว ค่าอัตราเร่ง อัตราหน่วง ระดับการเพิ่มโวลต์-ความถี่ที่ค่า นำมาเปิดตารางหาสัดส่วนของโวลต์-ความถี่ ควบคุมค่าอัตราเร่ง หรืออัตราหน่วงในการเปลี่ยนความถี่จากค่าหนึ่งเป็นอีกค่าหนึ่ง ซึ่งออกแบบให้เปลี่ยนความถี่จาก 0 ถึง 100 Hz หรือกลับกัน ได้ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0.2 ถึง 75 วินาที สำหรับไฟล์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรม แสดงดังรูปที่ 4

วงจรส่วนสร้างสัญญาณ PWM แสดงดังรูปที่ 5 มีหน้าที่สร้างสัญญาณ PWM ที่ได้จากการมอดูเลตรูปคลื่นจาก สมการ 1 กับรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่ได้จากการส่งสัญญาณนาฬิกาให้กับ วงจรนับขึ้น-ลง ผ่านวงจรแปลงดิจิทัล เป็นอนาลอก โดยรับค่าโวลต์-ความถี่จากส่วนควบคุม สำหรับไฟล์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 6

วงจรหน่วงสัญญาณ ดังวงจรในรูปที่ 7 มีหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรอันเนื่องมาจากสโตเรจไทม์(storage time)ของทรานซิสเตอร์กำลัง ทำให้ไม่เกิดการลัดวงจรระหว่างไลน์กับไลน์ โดยระยะเวลาหน่วงขึ้นกับค่า ไทม์คอนสแตนท์(time constant)ของ RC และความถี่ของสัญญาณนาฬิกา(clk) ซึ่งใช้ค่า 100 kHz ทำให้ค่าเวลาหน่วงต่ำสุดเท่ากับ $10 \mu\text{s}$ สัญญาณที่ผ่านการหน่วงแล้วจะถูกป้อนเข้าสู่ส่วนแยกสัญญาณต่อไป

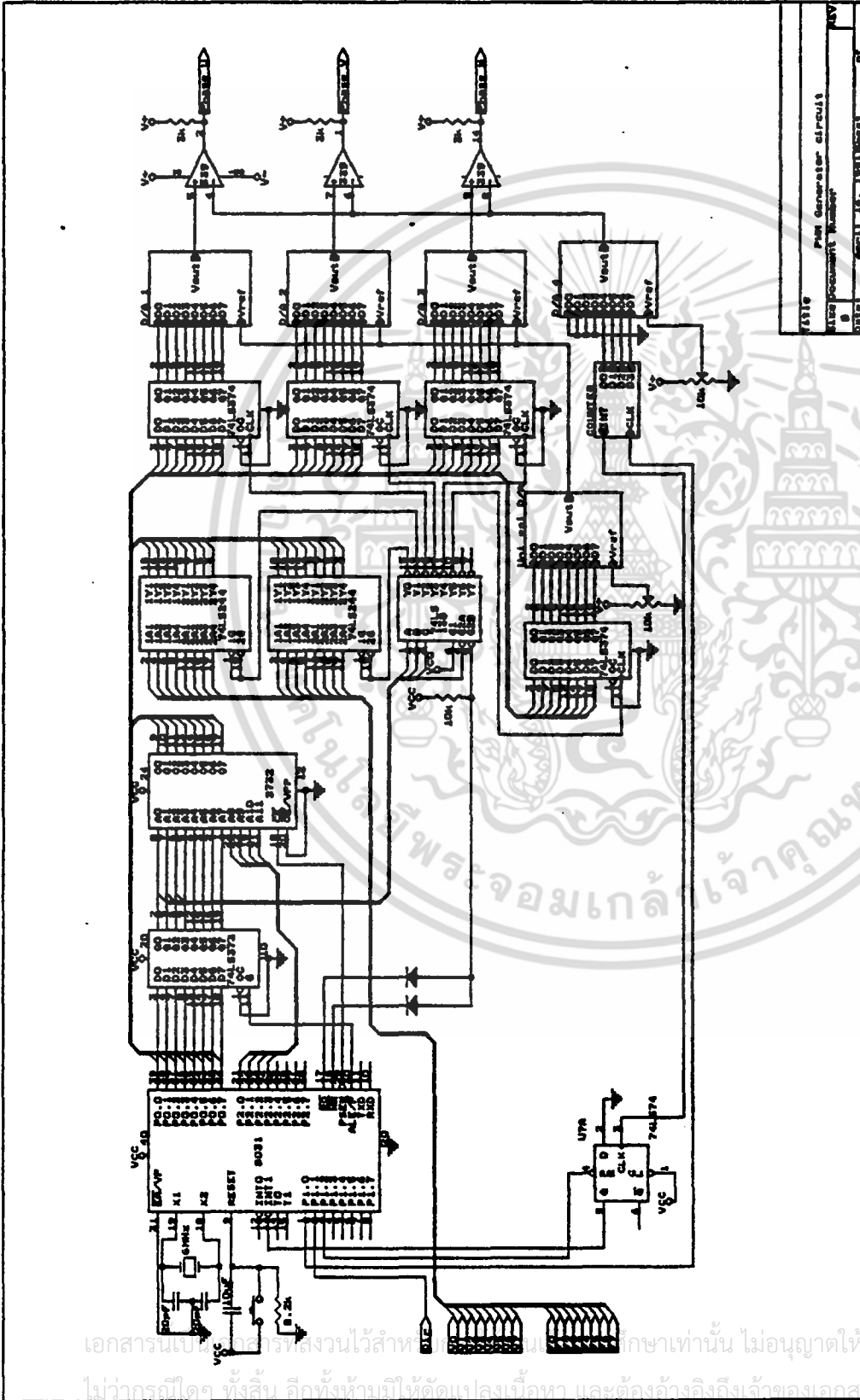
วงจรแยกสัญญาณ ดังรูปที่ 8 มีหน้าที่แยกกราวนด์และไฟเลี้ยง ของส่วนที่เป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ กับ ส่วนวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังออกจากกันโดยใช้ฟิลต์ทรานส์ฟอร์มเมอร์เป็นตัวแยกสัญญาณ โดยนำสัญญาณที่ต้อง



ชื่อเรื่อง	การออกแบบวงจรเลขคณิต
ชื่อผู้จัดทำ	...
ชื่ออาจารย์	...
ชื่อภาควิชา	...
ชื่อคณะ	...
ชื่อมหาวิทยาลัย	...

รูปที่ ๑ รางจรส่วนควบคุมเลขคณิต

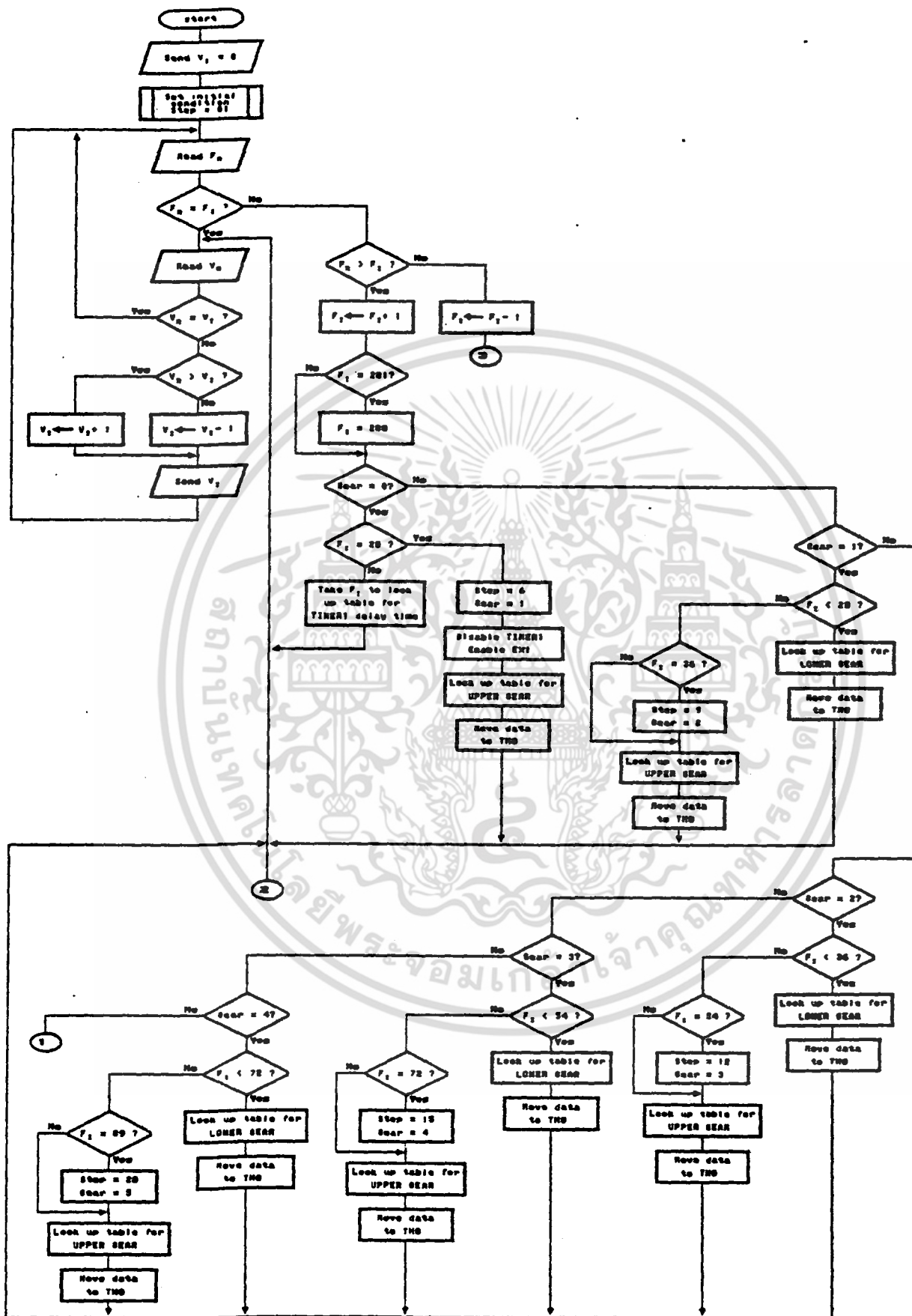
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ทำซ้ำ แจกจ่าย หรือดัดแปลงในทางใดๆ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



FILE	Pwm Generator circuit
DATE	08/11/2013
TIME	15:22:33
USER	847

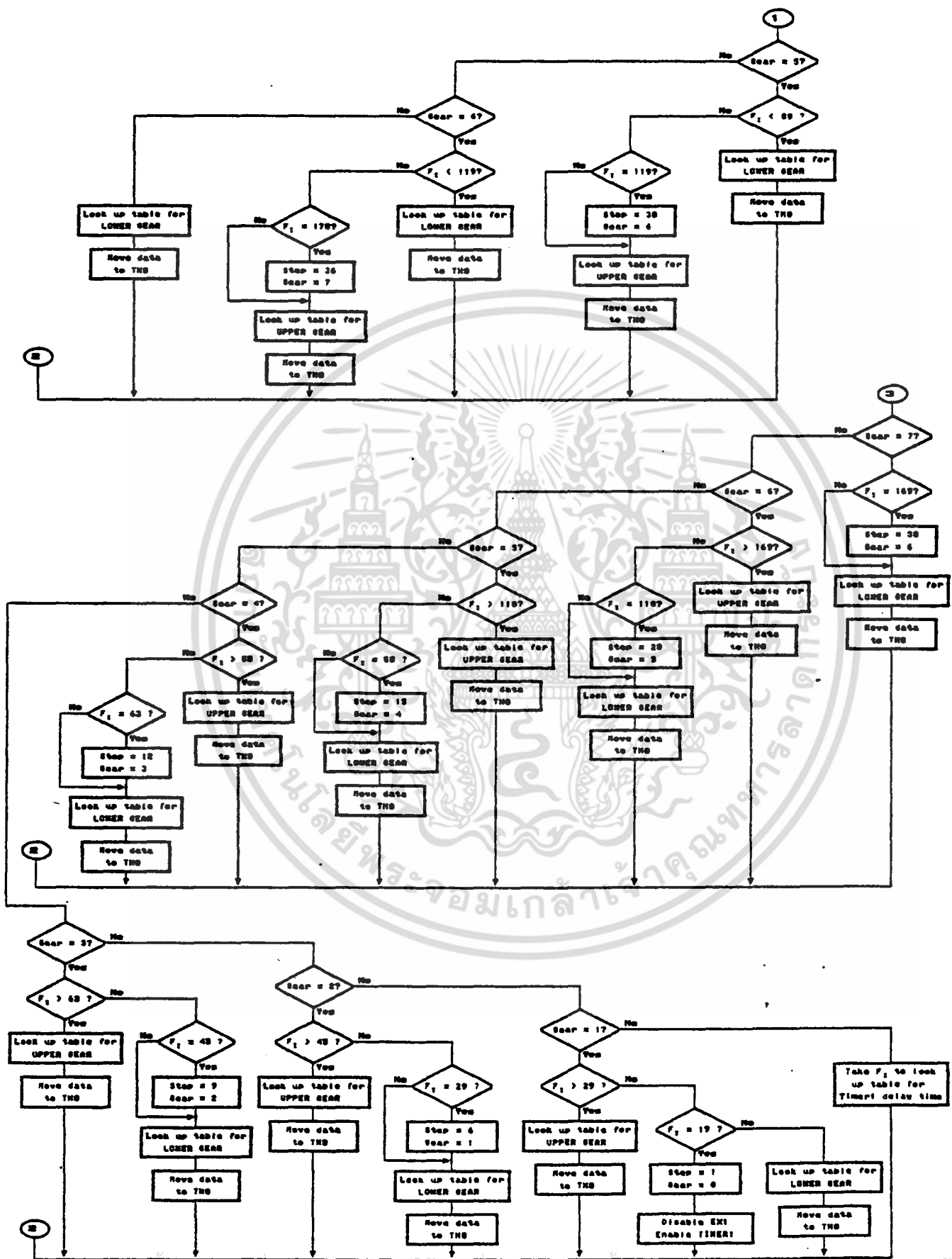
รูปที่ ๕ วงจรสร้างสัญญาณ PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่สามารถทำได้ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

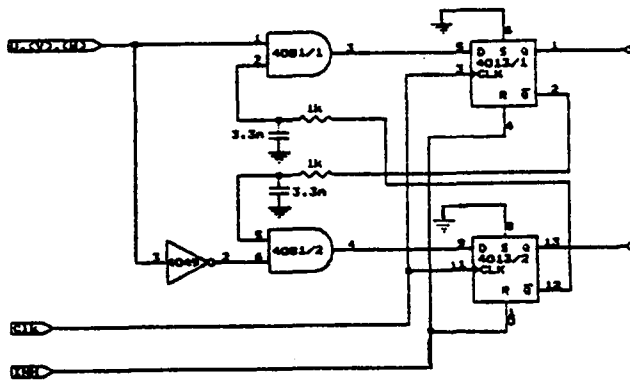


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมส่วนสร้างสัญญาณ PWM

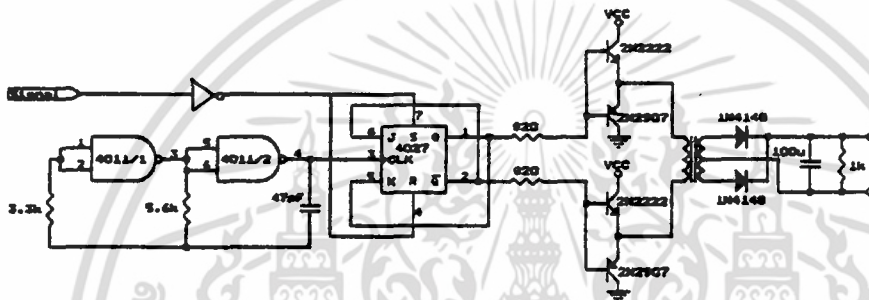


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าตีพิมพ์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ควรเผยแพร่ที่ 6 (ต่อ) ไฟล์สารัตถการงานของโปรแกรมสร้างสัญญาณ PWM ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



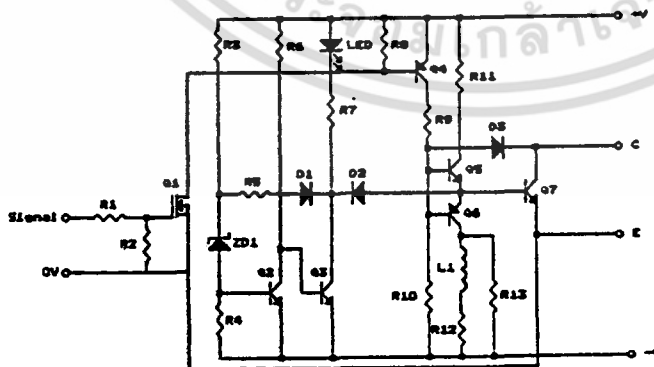
รูปที่ 7 วงจรหน่วงสัญญาณ

การแยกกราวนด์และไฟเลี้ยง มามอดูลแยกด้วยความถี่ประมาณ 2 MHz จากนั้นก็ส่งผ่านพัลส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์ แล้วสัญญาณที่ผ่านมาก็จะถูกนำมาคิดกระแส และกรองสัญญาณความถี่สูงออก แล้วจึงป้อนให้ส่วนวงจรรีเบส



รูปที่ 8 วงจรแยกสัญญาณ

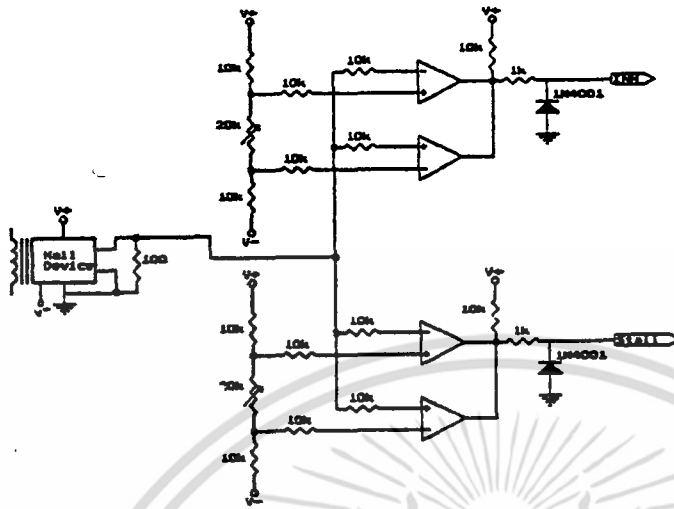
วงจรรีเบส ดังรูปที่ 9 จะนำสัญญาณที่ผ่านจากส่วนแยกสัญญาณมาทำให้ Q_1 , Q_2 , Q_3 และ Q_7 นำกระแส และเมื่อไม่มีสัญญาณ จะทำให้ Q_5 นำกระแสเพียงตัวเดียว เพื่อดึงกระแสเบสออกจาก Q_7 ทำให้ Q_7 หายกระแสเร็วขึ้น การต่อ D_3 ทำให้ Q_7 นำกระแสอยู่ในช่วงควอซีแซตเทอเรชัน (Quasi-saturation) สำหรับ Q_2 และ Q_3 นั้นจะทำงานร่วมกับ ZD_1 เพื่อตรวจจับระดับไฟเลี้ยงวงจรรีเบส มีให้ค่าเกินไป มิฉะนั้นแล้ว อาจจะทำให้ Q_7 นำกระแสอย่างไม่มีสมบรูณ์



รูปที่ 9 วงจรรีเบส

วงจรตรวจจับกระแสเกิน ดังรูปที่ 10 ประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับกระแสซึ่งจะให้แรงดันเปลี่ยนแปลง ยกสำนวนที่เอากระแสที่ส่งไปใช้สำหรับใช้แทนเพื่อกรอกใส่เท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ตามขนาดกระแส แล้วนำแรงดันมาเข้าวงจรเปรียบเทียบแรงดัน 2 ชด โดจะตรวจสอบ 2 ระดับ คือระดับ เหมารวมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

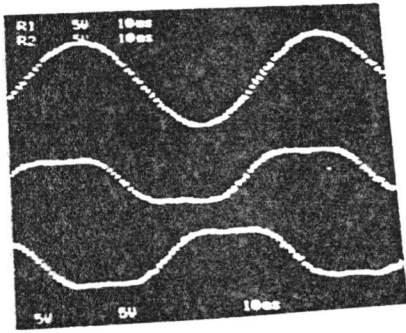
ที่ให้คงค่าความถี่รูปคลื่นไว้ จนกว่ากระแสจะอยู่ในระดับปรกติ และให้หยุดการทำงานจนกว่าจะรีเซ็ตเพื่อให้ระบบเริ่มทำงานใหม่



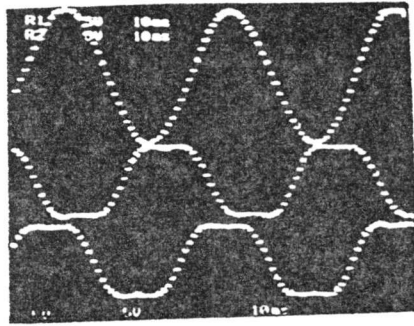
รูปที่ 10 วงจรตรวจจับกระแส

ผลการทดลอง

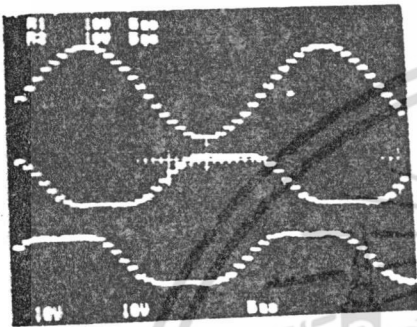
จากการทดลองขั้วมอเตอร์เห็นส่วนนำ 3 เฟส ขนาด 0.75 kW นิทกกระแส 3.3 A ที่พิกัดศักดาไฟฟ้า 220 V สามารถเปลี่ยนความถี่ได้ตั้งแต่ 0.5 ถึง 100 Hz โดยเปลี่ยนแปลงครึ่งละ 0.5 Hz และทำการตรวจสอบโวลท์เตจที่ไลน์ เมื่อสร้างรูปคลื่นตามสมการ 1 ที่สัดส่วนความถี่ต่างๆ ได้ผลใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ ดังรูปที่ 11 ซึ่งนำมาออกเลขที่สัญญาณสามเหลี่ยม ดังรูปที่ 12 เมื่อวัดรูปคลื่นศักดาไฟฟ้า และกระแส ที่สัดส่วนความถี่ต่างๆ ได้ผลดังรูปที่ 13 รวมทั้งวัดแอมป์ความถี่ของสัญญาณในสภาวะต่างๆดังรูปที่ 14 แล้ว พบว่าการเปลี่ยนสัดส่วนความถี่ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดฮาร์โมนิกที่ความถี่ต่ำ



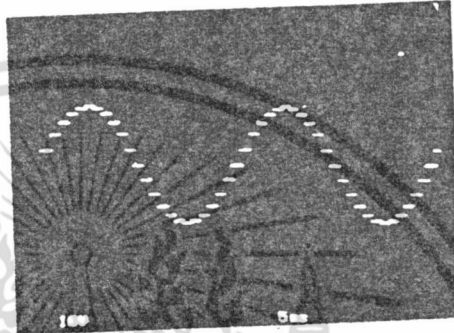
(ก)



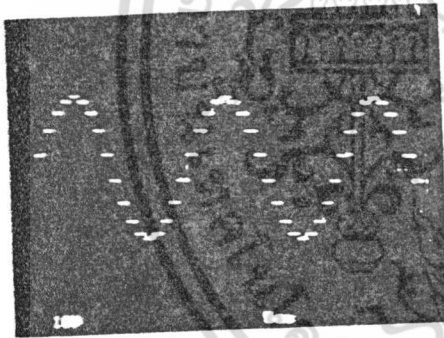
(ข)



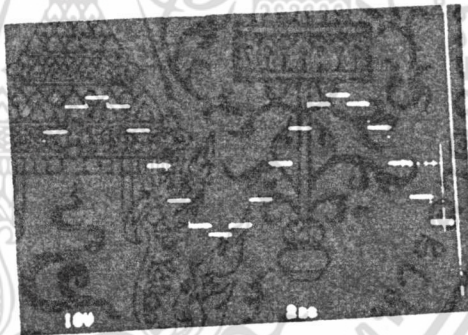
(ค)



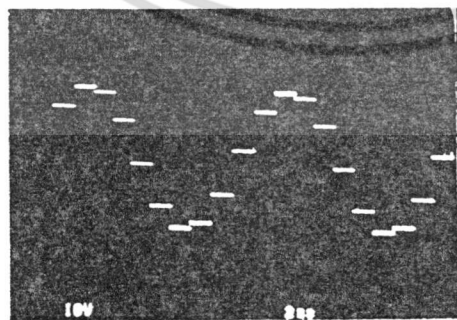
(ง)



(จ)

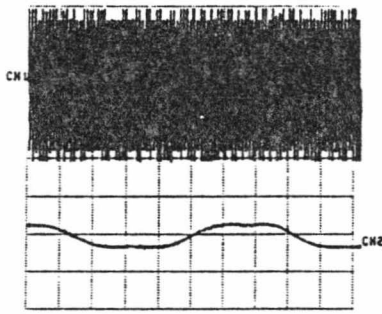


(ฉ)



(ช)

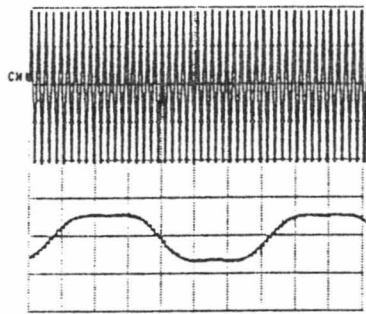
รูปที่ 11 รูปคลื่นโวลต์เคจก์ไลน์ ที่สัดส่วนความถี่ต่างๆ (ก) 30 (ข) 20 (ค) 15 (ง) 12
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้บริการเชิงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญได้ให้นาไปประเษนด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณใดๆ ทั้งสน อักทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SIGNALPARAMETER:
 CH1 - VOLTS/DIV: 5 U
 CH2 - VOLTS/DIV: 5 U
 TIMEBASE-SEC/DIV: 20ms

PRINTERPARAMETER:
 ZOOMRANGE - CH1: 0-9
 ZOOMRANGE - CH2: 0-9
 HARDCOPY SOURCE: NH 205-3

REMARKS:



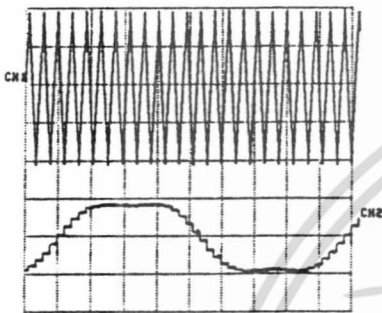
SIGNALPARAMETER:
 CH1 - VOLTS/DIV: 5 U
 CH2 - VOLTS/DIV: 5 U
 TIMEBASE-SEC/DIV: 20ms

PRINTERPARAMETER:
 ZOOMRANGE - CH1: 0-9
 ZOOMRANGE - CH2: 0-9
 HARDCOPY SOURCE: NH 205-3

REMARKS:

(ก)

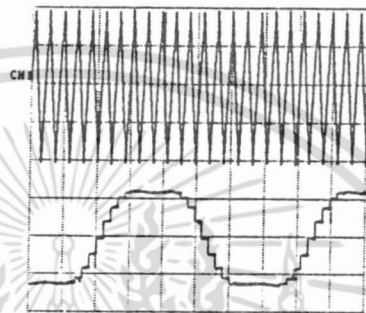
(ข)



SIGNALPARAMETER:
 CH1 - VOLTS/DIV: 5 U
 CH2 - VOLTS/DIV: 5 U
 TIMEBASE-SEC/DIV: 5ms

PRINTERPARAMETER:
 ZOOMRANGE - CH1: 0-9
 ZOOMRANGE - CH2: 0-9
 HARDCOPY SOURCE: NH 205-3

REMARKS:



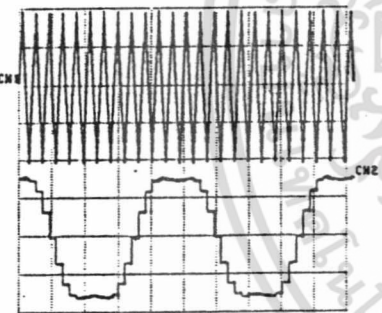
SIGNALPARAMETER:
 CH1 - VOLTS/DIV: 5 U
 CH2 - VOLTS/DIV: 5 U
 TIMEBASE-SEC/DIV: 5ms

PRINTERPARAMETER:
 ZOOMRANGE - CH1: 0-9
 ZOOMRANGE - CH2: 0-9
 HARDCOPY SOURCE: NH 205-3

REMARKS:

(ค)

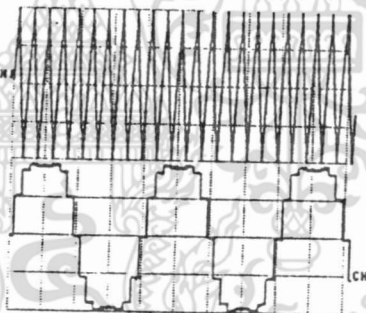
(ง)



SIGNALPARAMETER:
 CH1 - VOLTS/DIV: 5 U
 CH2 - VOLTS/DIV: 5 U
 TIMEBASE-SEC/DIV: 5ms

PRINTERPARAMETER:
 ZOOMRANGE - CH1: 0-9
 ZOOMRANGE - CH2: 0-9
 HARDCOPY SOURCE: NH 205-3

REMARKS:



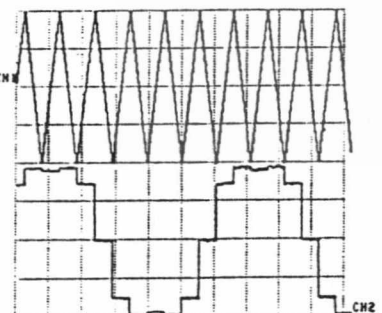
SIGNALPARAMETER:
 CH1 - VOLTS/DIV: 5 U
 CH2 - VOLTS/DIV: 5 U
 TIMEBASE-SEC/DIV: 5ms

PRINTERPARAMETER:
 ZOOMRANGE - CH1: 0-9
 ZOOMRANGE - CH2: 0-9
 HARDCOPY SOURCE: NH 205-3

REMARKS:

(จ)

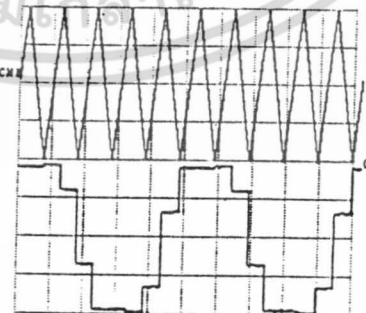
(ฉ)



SIGNALPARAMETER:
 CH1 - VOLTS/DIV: 5 U
 CH2 - VOLTS/DIV: 5 U
 TIMEBASE-SEC/DIV: 2ms

PRINTERPARAMETER:
 ZOOMRANGE - CH1: 0-9
 ZOOMRANGE - CH2: 0-9
 HARDCOPY SOURCE: NH 205-3

REMARKS:



SIGNALPARAMETER:
 CH1 - VOLTS/DIV: 5 U
 CH2 - VOLTS/DIV: 5 U
 TIMEBASE-SEC/DIV: 2ms

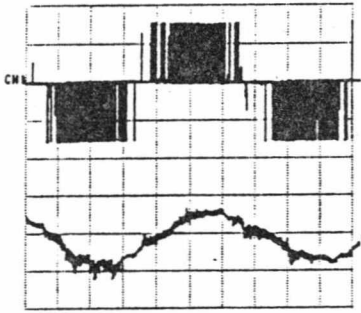
PRINTERPARAMETER:
 ZOOMRANGE - CH1: 0-9
 ZOOMRANGE - CH2: 0-9
 HARDCOPY SOURCE: NH 205-3

REMARKS:

(ช)

(ซ)

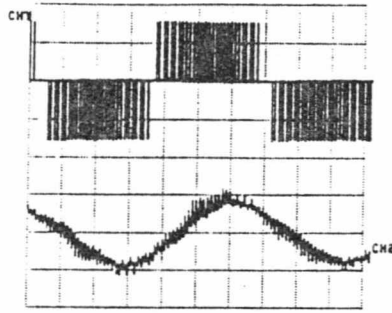
รูปที่ 12 รูปคลื่นเกี่ยวกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่ต่างๆ (ก) free running (ข) 30 (ค) 20
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 (ง) 15 (จ) 12 (ฉ) 9 (ช) 6 (ซ) 5
 ไม่ว่าจะวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SIGNALPARAMETER:
 CH1 - VOLTS/DIV: 2 U
 CH2 - VOLTS/DIV: 18uV
 TIMEBASE-SEC/DIV: 20ns

PRINTERPARAMETER:
 ZOOMRANGE - CH1: 8-9
 ZOOMRANGE - CH2: 8-9
 HARDCOPY SOURCE: HN 285-3

REMARKS:



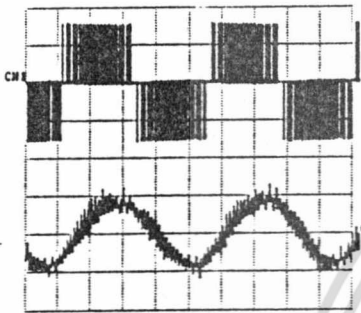
SIGNALPARAMETER:
 CH1 - VOLTS/DIV: 2 U
 CH2 - VOLTS/DIV: 18uV
 TIMEBASE-SEC/DIV: 10ns

PRINTERPARAMETER:
 ZOOMRANGE - CH1: 8-9
 ZOOMRANGE - CH2: 8-9
 HARDCOPY SOURCE: HN 285-3

REMARKS:

(ก)

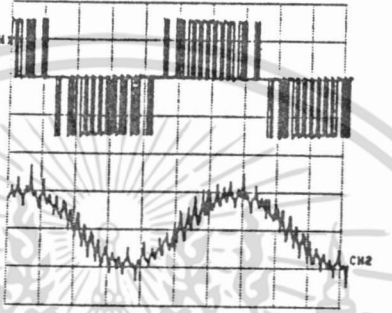
(ข)



SIGNALPARAMETER:
 CH1 - VOLTS/DIV: 2 U
 CH2 - VOLTS/DIV: 18uV
 TIMEBASE-SEC/DIV: 10ns

PRINTERPARAMETER:
 ZOOMRANGE - CH1: 8-9
 ZOOMRANGE - CH2: 8-9
 HARDCOPY SOURCE: HN 285-3

REMARKS:



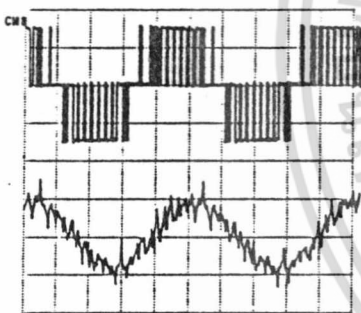
SIGNALPARAMETER:
 CH1 - VOLTS/DIV: 2 U
 CH2 - VOLTS/DIV: 18uV
 TIMEBASE-SEC/DIV: 5ns

PRINTERPARAMETER:
 ZOOMRANGE - CH1: 8-9
 ZOOMRANGE - CH2: 8-9
 HARDCOPY SOURCE: HN 285-3

REMARKS:

(ค)

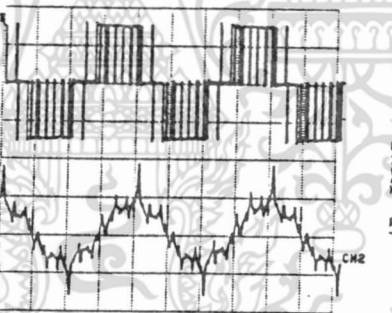
(ง)



SIGNALPARAMETER:
 CH1 - VOLTS/DIV: 2 U
 CH2 - VOLTS/DIV: 18uV
 TIMEBASE-SEC/DIV: 5ns

PRINTERPARAMETER:
 ZOOMRANGE - CH1: 8-9
 ZOOMRANGE - CH2: 8-9
 HARDCOPY SOURCE: HN 285-3

REMARKS:



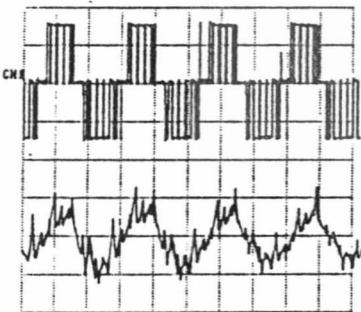
SIGNALPARAMETER:
 CH1 - VOLTS/DIV: 2 U
 CH2 - VOLTS/DIV: 18uV
 TIMEBASE-SEC/DIV: 5ns

PRINTERPARAMETER:
 ZOOMRANGE - CH1: 8-9
 ZOOMRANGE - CH2: 8-9
 HARDCOPY SOURCE: HN 285-3

REMARKS:

(จ)

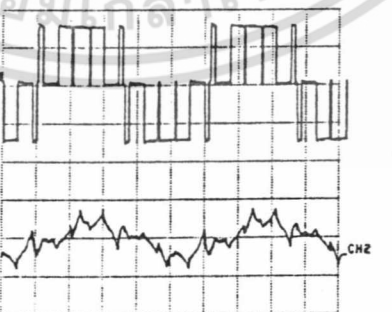
(ฉ)



SIGNALPARAMETER:
 CH1 - VOLTS/DIV: 2 U
 CH2 - VOLTS/DIV: 18uV
 TIMEBASE-SEC/DIV: 5ns

PRINTERPARAMETER:
 ZOOMRANGE - CH1: 8-9
 ZOOMRANGE - CH2: 8-9
 HARDCOPY SOURCE: HN 285-3

REMARKS:



SIGNALPARAMETER:
 CH1 - VOLTS/DIV: 2 U
 CH2 - VOLTS/DIV: 18uV
 TIMEBASE-SEC/DIV: 2ns

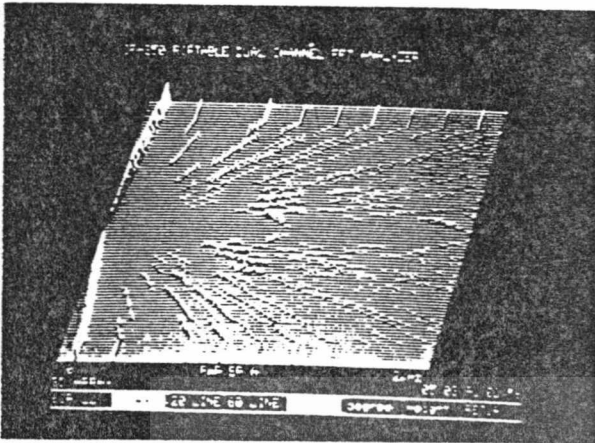
PRINTERPARAMETER:
 ZOOMRANGE - CH1: 8-9
 ZOOMRANGE - CH2: 8-9
 HARDCOPY SOURCE: HN 285-3

REMARKS:

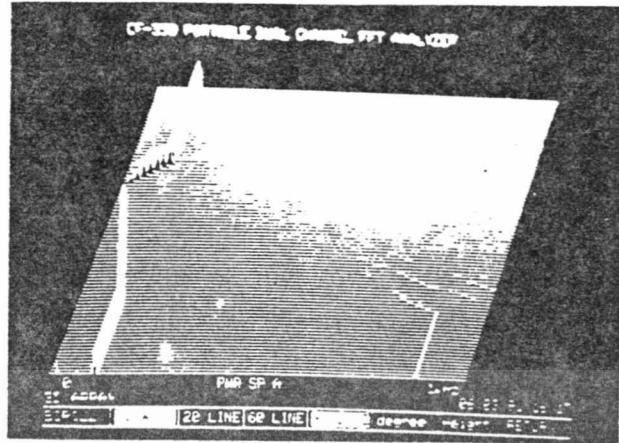
(ช)

(ซ)

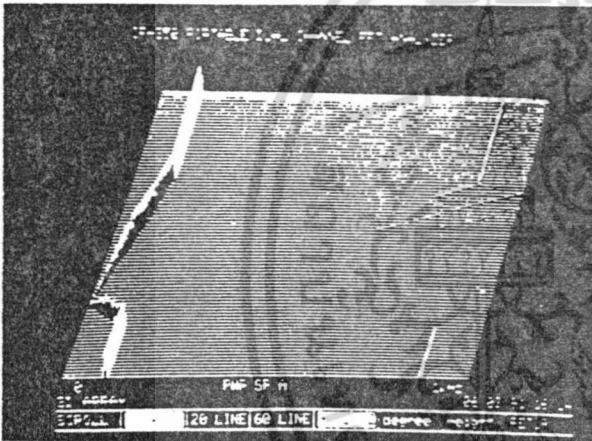
รูปที่ 13 รูปคลื่นสีกคาไฟฟ้าและกระแสที่ความถี่ต่างๆ (ก) free running (ข) 30 (ค) 20
 เฮกซ์ เป็นเฮกซ์ รหัสที่ส่งวนใส่ ที่บอกการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 (ง) 15 (จ) 12 (ฉ) 9 (ช) 6 (ซ) 5
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 14 แถบความถี่ของสัญญาณ (ก) เมื่อกลับทิศมอเตอร์ (ข) เมื่อเพิ่มอัตราเร่ง
(ค) เมื่อลดอัตราเร่ง (ง) เมื่อกระแสเกินขณะเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุป

จากผลการทดลองควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พบว่าสามารถเปลี่ยนความเร็วได้อย่างต่อเนื่อง และรูปคลื่นกระแสที่มอเตอร์ใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ตามวัตถุประสงค์ จากเนื้อหาของบทความทั้งหมดสามารถปรับปรุงให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยเพิ่มความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยมให้สูงขึ้น ซึ่งจะทำได้สามารถบริหารจัดการโมเมนต์ได้มากขึ้น แต่จะเป็นผลให้ความถี่ในการสวิทชิงสูงขึ้น และความสูญเสียจากการสวิทชิงที่อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์กำลังสูงขึ้นด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. J.A. Houldsworth and D.A. Grant, The use of harmonic distortion to increase the output of a three-phase PWM inverter, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-20, pp. 1224-1228, Sept/Oct. 1984



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้