

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อินเวอร์เตอร์สามเฟสควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 16 บิต

THREE PHASE INVERTER USING 16 BIT MICROCONTROLLER



โดย  
นายณัฐวัฒน์ กมลพัฒนะ  
นายณัฐพล มณีเนตร  
นายบัญชา แดงอุทัย

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 34146  
วัน, เดือน, ปี- 6 ต.ค. 2542

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ทำกรณใดๆสงวน อกรรมสิทธิ์ในเอกสารฉบับนี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2541

อินเวอร์เตอร์สามเฟสควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 16 บิต  
THREE PHASE INVERTER USING 16 BIT MICROCONTROLLER



อาจารย์ที่ปรึกษา

คร. วิจิตร กิณเรศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรปีการศึกษา 2541

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อินเวอร์เตอร์สามเฟสควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 16 บิต

ผู้จัดทำ

1. นายณัฐวัฒน์ กมลพัฒนะ
2. นายณัฐพล มณีเนตร
3. นายบัญชา แคนงอุทัย



อาจารย์ที่ปรึกษา

(คร. วิจิตร กิณเรศ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อินเวอร์เตอร์สามเฟสควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 16 บิต

นายฉัฐวัฒน์ กมลพัฒนะ

นายฉัฐพล มณีเนตร

นายบัญชา แดงอุทัย

คร. วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2541

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์ที่จะนำเสนอถึง การออกแบบ และการสร้าง ไอจีบีที อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส รวมถึงการศึกษาและการนำไมโครคอนโทรลเลอร์ 16 บิต มาประยุกต์ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ทั้งในช่วงแรงบิดคงที่ และ ช่วงที่กำลังคงที่ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาให้มอเตอร์สามารถทำงานที่ย่านความเร็วรอบที่กว้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## THREE – PHASE INVERTER USING 16 BIT MICROCONTROLLER

Nattawat Kamolpatana

Nattaphon Maneenetr

Bancha Dangutai

Dr. Vijit Kinnares Advisor

1998

### Abstract

The purpose of this project is to present the design and construction of a three phase IGBT inverter and study the application of a 16 bit microcontroller in the modulation of the speed control of a three phase induction motor in the constant torque region and the constant power region. The results should be in wider range of motor speed and further developments.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
สารบัญ	III
สารบัญภาพ	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 โครงสร้างพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์	1
1.2 ส่วนวงจรกำลัง	2
1.2.1 ส่วนวงจรกำลัง	2
1.2.2 ส่วนวงจรควบคุม	2
1.3 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทำโครงการ	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	4
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับไอจีบีที	4
2.1.1 คุณสมบัติของกระแสและศักดาไฟฟ้า	4
2.1.2 ลักษณะการทำงาน	5
2.1.3 วงจรสมมูลย์ของไอจีบีที	6
2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ	7
2.2.1 บทนำ	7
2.2.2 หลักการพื้นฐานการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	9
2.2.3 ลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิกัดความถี่และพิกัดแรงดัน	10
2.2.4 การควบคุมความเร็วโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่และแรงดันที่จ่ายให้กับสเตเตอร์	12
2.3 อินเวอร์เตอร์แบบสเปซเวกเตอร์แรงดัน	14
2.4 อินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสี่เหลี่ยม	21
บทที่ 3 วงจรและหลักการออกแบบ	23
3.1 บทนำ	23
3.2 ส่วนของวงจรกำลัง	24
3.2.1 วงจรกำลังขาเข้า	24
3.2.2 วงจรกำลังขาออก	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
บทที่ 4 ไมโครคอนโทรลเลอร์และการทำงานของโปรแกรมควบคุมอินเวอร์เตอร์	31
4.1 การทำงานของโปรแกรมควบคุม	31
4.1.1 การทำงานแบบเวกเตอร์แรงดัน	31
4.1.2 การเขียนโปรแกรมสเปซเวกเตอร์ใน 80C196KB	36
4.1.3 การเขียนโปรแกรมในโหมด square wave inverter	37
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	42
5.1 ขั้นตอนการทดลอง	42
5.2 ผลการทดลอง	42
5.2.1 วงจรจับเกทของ ไอจีบีที	42
5.2.2 ไอจีบีที	45
5.2.3 วงจรป้องกันการทำงานพร้อมกันของ ไอจีบีที	46
5.2.4 ส่วนวงจรจับด้วย ไอจีบีที	49
5.2.5 ทำการป้อนสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ เข้าวงจรจับด้วย ไอจีบีทีครบทุกชุด	51
บทที่ 6 บทสรุปและแนวทางการพัฒนา	53
6.1 ส่วนฮาร์ดแวร์	53
6.1.1 วงจรเรียงกระแสขาเข้า	53
6.1.2 วงจรสร้างเวลาเดดไทม์	53
6.1.3 วงจรจับเกท ไอจีบีที	53
6.1.4 วงจรกำลังขาออก	54
6.2 ส่วนซอฟต์แวร์	54
6.2.1 ในช่วงกำลังคั้งที่	54
6.2.2 ในช่วงแรงบิดคั้งที่	54
6.3 แนวทางในการพัฒนาต่อ	55
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ	1
รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	4
รูปที่ 2.1 แสดงกราฟระหว่างกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมไอจีบีที	5
รูปที่ 2.2 แสดงวงจรสมมูลของ ไอจีบีที	6
รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบปรับความเร็วได้	8
รูปที่ 2.4 แสดงตารางสูตรที่เกี่ยวข้องกับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ	9
รูปที่ 2.5 แสดงกราฟแรงบิดและความเร็ว โดยค่าแรงดันและความถี่ของแหล่งจ่ายมีค่าคงที่ที่พิกัด	11
รูปที่ 2.6 แสดงกราฟกระแสและความถี่ของ โรเตอร์ โดยค่าแรงดันและความถี่ของแหล่งจ่ายมีค่าคงที่ที่พิกัด	11
รูปที่ 2.7 แสดงกราฟการเริ่มต้นทำงานของมอเตอร์ โดยค่าแรงดันและความถี่คงที่ที่พิกัด	12
รูปที่ 2.8 แสดงกราฟแรงบิดและความเร็วรอบที่ค่าสลิปมีค่าน้อยเมื่อพลักแม่เหล็กในช่องอากาศและแรงบิดมีค่าคงที่	13
รูปที่ 2.9 แสดงกราฟแรงบิดที่โหลด โดยการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดจะมีค่าเท่ากับกำลังสองของความเร็วรอบ	14
รูปที่ 2.10 (ก) แสดงแบบจำลองชุดอินเวอร์เตอร์	14
(ข) แสดงเวกเตอร์แรงดันของชุดอินเวอร์เตอร์	14
รูปที่ 2.11 แสดงส่วนประกอบของเวกเตอร์แรงดัน	16
รูปที่ 2.12 แสดงเวกเตอร์แรงดันบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ (d-q)	18
รูปที่ 2.13 แสดงแผนผังเวลารูปแบบการสวิตช์	19
รูปที่ 2.14 แสดงเวกเตอร์แรงดันบนแกน(d-q)และแกนอ้างอิง $\alpha$ - $\beta$	20
รูปที่ 2.15 แสดงแผนภาพวิธีการหาเซกเตอร์ของเวกเตอร์แรงดัน	21
รูปที่ 2.16 แสดงอินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม	22
บทที่ 3 วงจรและหลักการออกแบบ	23
รูปที่ 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจร	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 3.4 แสดงวงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของวงจรหน่วงเวลา	25
รูปที่ 3.5 แสดงวงจรจับด้วยไอจีบีที	26
รูปที่ 3.6 แสดงวงจรจับเกทของไอจีบีที	28
รูปที่ 3.7 แสดงวงจรสร้างเวลาเคคใหม่	29
รูปที่ 3.8 แสดงวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา	30
บทที่ 4 ไมโครคอนโทรลเลอร์และการทำงานของโปรแกรมควบคุมอินเวอร์เตอร์	31
รูปที่ 4.1(ก) แสดงรูปสัญญาณสเปซเวกเตอร์ที่ได้จากการทำ simulation	32
รูปที่ 4.1(ข) แสดงรูปสัญญาณสเปซเวกเตอร์ที่ได้จากการทำ simulation	33
รูปที่ 4.2 แสดงรูปสัญญาณของแรงดันไลน์และแรงดันเฟส ที่มุม 0 องศา	34
รูปที่ 4.3 แสดงรูปสัญญาณของแรงดันไลน์และแรงดันเฟส ที่มุม 30 องศา	34
รูปที่ 4.4 แสดงรูปสัญญาณของแรงดันไลน์และแรงดันเฟส ที่มุม 0 องศา	35
รูปที่ 4.5 แสดงขั้นตอนการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ 80C196KB	36
รูปที่ 4.6 แสดงสัญญาณแรงดันระหว่างไลน์ที่ความถี่ 50 เฮิร์ต มีเฟสต่างกัน 120 องศา	38
รูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณแรงดันระหว่างไลน์ที่ความถี่ 50 เฮิร์ต มีเฟสต่างกัน 120 องศา และ FFT	38
รูปที่ 4.8 แสดง FFT ของสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 50 เฮิร์ต โดยอาศัยโปรแกรม Matlab	39
รูปที่ 4.9 แสดง FFT จากรูปที่ 4.9 พิจารณาถึงความถี่ 600 เฮิร์ต	39
รูปที่ 4.10 แสดงกราฟกระแสไลน์ที่ป้อนเข้ามอเตอร์ที่ความถี่ 50 เฮิร์ต	40
รูปที่ 4.11 แสดงกราฟสัญญาณต่างๆ เมื่อเทียบกับผลทางทฤษฎี	41
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	42
รูปที่ 5.1 แสดงกราฟเปรียบเทียบสัญญาณ PWM และสัญญาณ Opto Coupler	43
รูปที่ 5.2 แสดงกราฟสัญญาณเข้า LM311	44
รูปที่ 5.3 แสดงกราฟสัญญาณที่ขาออก LM311	44
รูปที่ 5.4 แสดงกราฟสัญญาณเข้าและออกวงจรจับเกท	45
รูปที่ 5.5 แสดงการต่อวงจรเพื่อทดสอบไอจีบีที	45
รูปที่ 5.6 แสดงสัญญาณทริก ไอจีบีทีเทียบกับสัญญาณเอาพุทของไอจีบีที	46
รูปที่ 5.7 แสดงสัญญาณ Q และ $\bar{Q}$ เมื่อสัญญาณอินพุทมีค่าความถี่ 1 KHz	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 5.10 แสดงสัญญาณ $Q_1$ และ $Q_2$ ที่มีค่า dead time เกิดขึ้น	49
รูปที่ 5.11 แสดงสัญญาณจับเกทของ ไอจีบีทีที่อยู่ในกึ่งเดียวกัน	50
รูปที่ 5.12 แสดงสัญญาณจับเกทและแรงดันคร่อม ไอจีบีทีตัวต่าง	50
รูปที่ 5.13 แสดงสัญญาณแรงดันระหว่างไลน์ โดยป้อนโปรแกรม Quasi-Square	51
รูปที่ 5.14 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบ, ความถี่และกระแส ในขณะภาวะโหลดต่างๆ	52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

อุตสาหกรรมในปัจจุบัน มอเตอร์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ซึ่งมอเตอร์ที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปจะเป็นมอเตอร์กระแสตรง (dc motor) โดยมีการคัปปลิง (coupling) ที่แกนของมอเตอร์ เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วในการหมุน ซึ่งเป็นการควบคุมที่ไม่ยุ่งยาก และราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมไม่สูงมากนัก แต่จะมีข้อเสียเนื่องมาจากมีขนาดใหญ่ ข้อจำกัดในการติดตั้ง ต้องการการบำรุงรักษาเป็นประจำ และราคาของตัวมอเตอร์กระแสตรงเองค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีกำลังเท่ากัน ซึ่งจะมีขนาดเล็กและราคาถูกกว่า และที่สำคัญคือไม่ต้องการการบำรุงรักษามากนัก แต่สาเหตุที่มอเตอร์เหนี่ยวนำยังไม่ได้รับความนิยมมากนัก เนื่องจากรีเลย์รีเลย์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไปเป็นเครื่องจักรรุ่นเก่า ซึ่งใช้มอเตอร์ประเภทอื่นอยู่ก่อนแล้ว ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกล จึงค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากมีความจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายพลังงานที่สามารถเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันหรือความถี่ได้ ทำให้ราคาของอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการควบคุมความเร็วค่อนข้างสูง

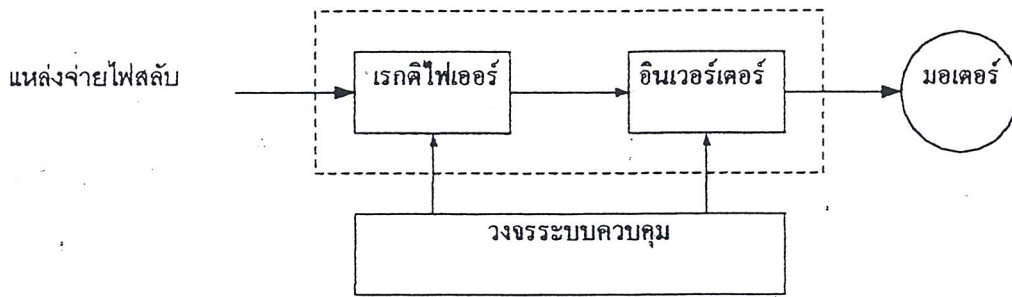
ในปัจจุบันได้มีการนำไมโคร โพรเซสเซอร์มาใช้ควบคุมในระบบอุตสาหกรรมมากขึ้น เนื่องจากไมโคร โพรเซสเซอร์ได้ถูกนำมาพัฒนาให้มียุคประกอบในการทำงานมากขึ้น มีความเร็วในการประมวลผลสูงขึ้น และมีขนาดเล็กกลง สำหรับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นจะทำงานควบคู่ไปกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะสร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) มาควบคุมการนำกระแสและหยุดนำกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งจะมีผลทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไป

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) เป็นอุปกรณ์แปลงไฟชนิดหนึ่ง ที่แปลงไฟสลับที่มีความถี่และแรงดันคงที่ ไปเป็นไฟสลับที่มีความถี่และแรงดันขนาดต่าง ๆ กัน

#### 1.1 โครงสร้างพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ โดยอินพุตของอินเวอร์เตอร์เป็นไฟสลับจากแหล่งจ่ายไฟ (50Hz หรือ 60Hz) ไฟสลับจะถูกแปลงเป็นไฟตรงโดยเรกติไฟเออร์ (Rectifier) จากนั้นไฟตรงจะถูกแปลงเป็นไฟสลับที่สามารถแปรขนาดแรงดันและความถี่ได้โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ นอกจากนั้นยังมีวงจรควบคุมสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรทั้งสองส่วนนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 แสดง โครงสร้างพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์

ประโยชน์ของการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์มีด้วยกันหลายประการดังนี้ คือ

1. สามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้โดยง่าย และเนื่องจากไม่ได้ใช้ชิ้นส่วนทางกล จึงมีอายุการใช้งานมีอายุยาวนานมากกว่า
2. ช่วยลดค่ากระแสในขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์
3. ได้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power factor) ที่สูงกว่า และมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงการปรับความเร็วของมอเตอร์
4. ใช้ขับมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และคงที่ตลอด โดยที่ค่าแรงดัน ไฟสลับที่ป้อนเข้าสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงกว้าง

## 1.2 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในโครงการ

อาจแบ่งได้เป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนวงจรกำลัง และส่วนวงจรควบคุม

### 1.2.1 ส่วนวงจรกำลัง

ในส่วนเรกติไฟเออร์จะประกอบด้วย วงจรบริดจ์ไดโอด (Bridge diode) เพื่อแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง และมีตัวเก็บประจุ (Filter capacitor) ซึ่งทำหน้าที่กรองแรงดันให้ เรียบยิ่งขึ้น และสำหรับส่วนอินเวอร์เตอร์ ได้ใช้ ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistor : IGBT) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวสวิตช์ โดยการรับสัญญาณขับมาจากส่วนวงจรควบคุมผ่านทางออปโต ไอโซเลเตอร์ (Opto Isolator) เพื่อทำการแยกกราวด์ด้วย

### 1.2.2 ส่วนวงจรควบคุม

- ในการควบคุมจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 16 บิต (80C196KB) เป็นตัวควบคุมหลัก โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะตั้งงานผ่านวงจรควบคุมต่าง ๆ เพื่อนำสัญญาณไปขับมอเตอร์

ในการใช้งาน ต้องนำวงจรทั้งสองส่วนมาประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งจะมีการกำหนดฟังก์ชันการใช้งาน และการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่วนวงจรควบคุม และนำค่าที่ได้มาใช้ในการคำนวณสมการต่าง ๆ เพื่อสร้างสัญญาณขับมอเตอร์ และส่วนวงจรควบคุมยังมีหน้าที่ตรวจจับความผิดปกติในการทำงาน เช่น การขับโหลดเกินกำลัง (Overload)

### 1.3 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทำโครงการ

เพื่อศึกษาหลักการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์ จนสามารถออกแบบวงจรกำลัง และพัฒนาระบบควบคุมที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 16 บิต และสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อนำไปใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในปริญญานิพนธ์นี้ จะแบ่งรายละเอียดออกเป็นส่วนตัวต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- บทที่ 1 บทนำ โดยจะอธิบายถึงวัตถุประสงค์ของโครงการนี้
- บทที่ 2 อธิบายถึงโครงสร้างและคุณสมบัติของไอจีบีที โครงสร้างและคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ รวมถึง ส่วนควบคุมอินเวอร์เตอร์
- บทที่ 3 อธิบายถึงส่วนประกอบต่าง ๆ ของวงจรที่ใช้โครงการ รวมถึงการออกแบบวงจรกำลัง
- บทที่ 4 อธิบายถึงระบบควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์
- บทที่ 5 อธิบายถึงขั้นตอนการทดลองและผลการทดลองในส่วนต่าง ๆ ของโครงการ
- บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปของโครงการ ปัญหาและข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น รวมไปถึงแนวทางในการพัฒนาโครงการนี้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

ในโครงการนี้ได้มีการนำเอาไอจีบีที เข้ามาใช้เป็นอุปกรณ์สวิทซ์ซิ่ง ดังนั้น เพื่อการเข้าใจมากขึ้นเราจะทำการศึกษาหลักการและทฤษฎีของไอจีบีทีอย่างคร่าวๆ และได้กล่าวถึงลักษณะของการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังจะแยกอธิบายได้ดังนี้

#### 2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับไอจีบีที

( Insulated Gate Bipolar Transistor : IGBT )

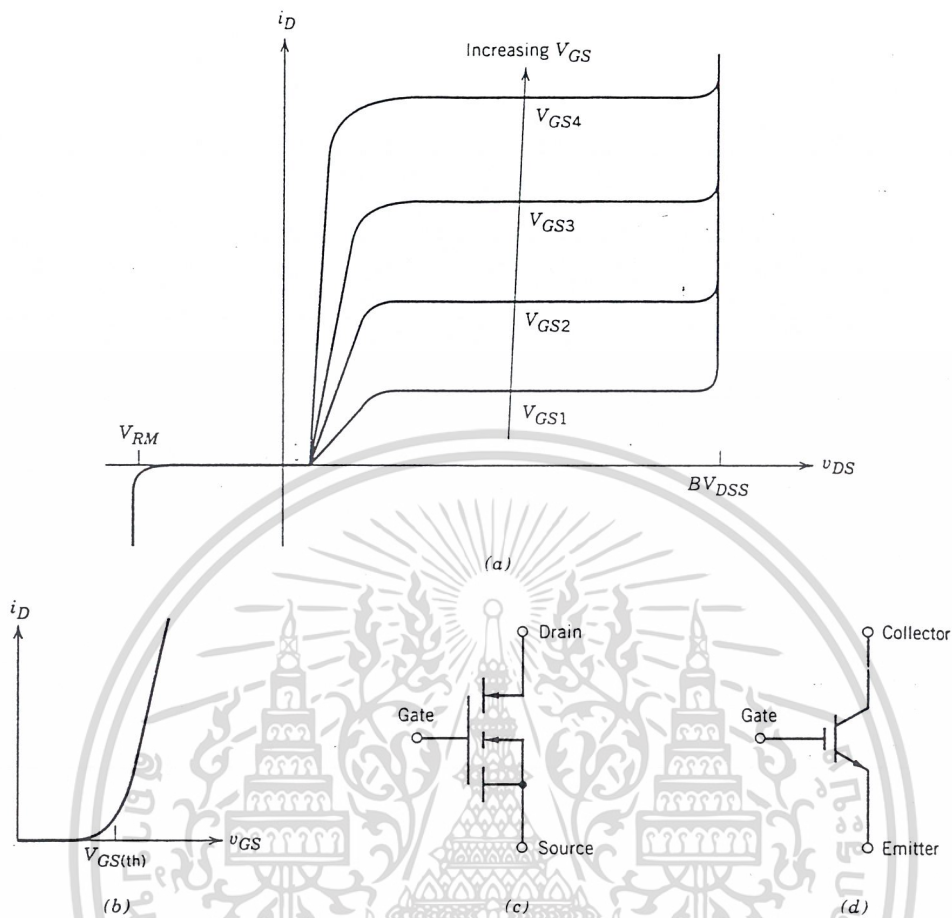
อุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์คอนโทรลที่พอจะคุ้นเคย และ ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ในขณะนี้ ได้แก่ เอสซีอาร์, ไตรแอก, ทรานซิสเตอร์ และ มอสเฟท โดยเฉพาะทรานซิสเตอร์ และมอสเฟท ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองชนิด ก็มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป กล่าวคือ ทรานซิสเตอร์ขณะอยู่ในสภาวะนำกระแสจะมีอัตราการสูญเสียกำลังงานต่ำ มีอัตราทนแรงดันและขยายกระแสได้สูง แต่ความเร็วในการสวิทซ์ซิ่งต่ำอยู่ โดยเฉพาะช่วงหยุดนำกระแสจะมีช่วงเวลาที่ยาวกว่า ซึ่งจะเป็นคุณสมบัติที่ตรงกันข้ามกับมอสเฟท ที่มีความเร็วในการสวิทซ์ ทำงานนำกระแสและหยุดนำกระแสได้เร็วกว่ามาก แต่ก็มีอัตราการสูญเสียกำลังงานสูงมากเช่นกัน จากเหตุผลที่กล่าวมา ของทรานซิสเตอร์ และมอสเฟท จึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ประเภทนี้ จนสามารถได้อุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ คอนโทรลชนิดใหม่ขึ้นมา โดยคุณสมบัติต่างๆ จะรวมเอาข้อได้เปรียบของทรานซิสเตอร์ และ มอสเฟท เข้ามารวมไว้ในอุปกรณ์ชนิดใหม่นี้ เรียกชื่ออย่างเป็นทางการว่า ไอจีบีที

##### 2.1.1 คุณสมบัติของกระแสและศักดาไฟฟ้า

ลักษณะของกระแสและศักดาไฟฟ้าของไอจีบีทีชนิดเอ็น-แชนแนล ดังแสดงในรูปที่ 2.1(a) ในทิศฟอว์เวิร์ด ( Forward ) จะเหมือนกับของ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ที่ใช้ในลอจิกเซอร์กิตแตกต่างกันเพียงควบคุมการทำงานด้วยความต่างศักย์ แทนที่จะควบคุมการทำงาน ด้วยกระแสเหมือนกับทรานซิสเตอร์ คุณสมบัติของไอจีบีทีชนิด พี-แชนแนล จะเหมือนกันเพียงแต่ขั้วของความต่างศักย์ และทิศทางของกระแสจะกลับกัน

ในรูปที่ 2.1 (b) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_D$  และ  $V_{GS}$  ลักษณะเหมือนกับของมอสเฟท คือ เส้นกราฟจะเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงของแรงแสเตรน และไม่เป็นเชิงเส้น ณ จุดที่กระแสเดรนมีค่าต่ำ เมื่อ  $V_{GS}$  มีค่าต่ำกว่าค่าหนึ่ง เรียกค่านี้ว่า  $V_{GS(th)}$  (Threshold Voltage) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 (a) แสดงกราฟระหว่างกระแสและแรงดันที่ตกคร่อม ไอจีบีที  
 (b) แสดงกราฟเอ๊าท์พุท  
 (c) และ (d) แสดงสัญลักษณ์ของ ไอจีบีทีชนิดเอ็น

ไอจีบีทีจะอยู่ในสถานะหยุดการนำกระแส ความวามงสัยคร่อมเกต และซอร์คสูงสุดที่ยอมให้ใช้ได้อยู่  
 ค่ากระแสเดรนสูงสุดที่ยอมให้ไหลในตัว ไอจีบีที

สัญลักษณ์ของวงจรของไอจีบีที ชนิด เอ็น-แชนแนล แสดงไว้ในรูปที่ 2.1(c)และ(d) ทิศทางของลูก  
 สรจะกลับทิศในกรณีของ ไอจีบีทีชนิด พี-แชนแนล

### 2.1.2 ลักษณะการทำงาน

#### สถานะนำกระแส

เมื่อขาเดรนได้รับแรงดันไบแอสตรง คือเป็นบวกเมื่อเทียบกับซอร์ค และ แรงดันระหว่างเกต และ  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

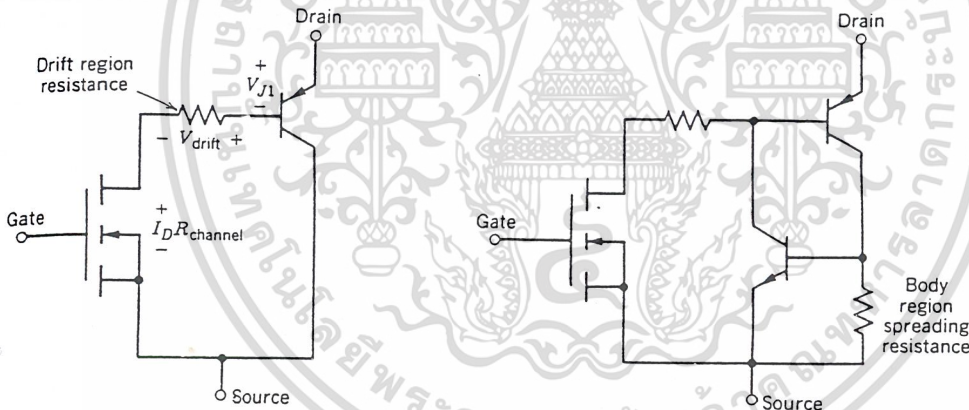
ซอร์ค มีค่าเกิน  $V_{GS(th)}$  ประจุไฟฟ้าบวกที่เกิดจากแรงดันที่ขาเกต จะดึงอิเล็กตรอนทำให้ไอจีบีที่อยู่ในสถานะนำกระแส นั่นคือเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าจากเดรนไปซอร์คได้

**สภาวะหยุดนำกระแส**

เมื่อแรงดันระหว่างเกต และซอร์ค ลดลงต่ำกว่าแรงดัน  $V_{GS(th)}$  จะทำให้มีแรงดันไม่เพียงพอสำหรับการแปรสภาพชั้นบอดี พี เป็น เอ็น ได้ ทำให้บริเวณขาเดรน ไม่ต่อกับบริเวณซอร์ค ไอจีบีที่ จึงอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแส ในสภาวะนี้แรงดันไบแอสกลับจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

**2.1.3 วงจรสมมูลของ ไอจีบีที**

วงจรสมมูลของไอจีบีที จะคล้ายกับทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพี โดยแทนได้ด้วยขาคอลเล็คเตอร์ (Collector), เบส (Base) และ อิมิตเตอร์ (Emitter) ตามลำดับ และบริเวณภายใต้เกต ก็จะมีขาคอนดัคชันของมอสเฟต ซึ่งจะมีความต้านทานบริเวณที่เชื่อมขาเบสของทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพี เข้ากับขาเดรนของมอสเฟต ซึ่งเมื่อเขียนวงจรสมมูลออกมา จะได้วงจร ดังรูปที่ 2.2 (a)



รูปที่ 2.2 (a) แสดงวงจรสมมูลของ ไอจีบีที ขณะทำงานในสภาวะปกติ

(b) แสดงวงจรสมมูลของ ไอจีบีที ซึ่งมีทรานซิสเตอร์ต่ออยู่ภายใน

จากรูปที่ 2.2(a) จะเห็นว่าเป็นวงจรคาร์ลิงตัน โดยมีมอสเฟตเป็นตัวขับทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพี แต่มีจุดพิเศษที่แตกต่างจากวงจรทั่วไป คือ กระแสเดรน ส่วนใหญ่จะไหลจากอิมิตเตอร์มายังเบส และผ่านขาเดรนของมอสเฟตมาจบลงที่ขาซอร์ค จะมีกระแสส่วนน้อยเท่านั้นที่ไหลจาก อิมิตเตอร์มายัง คอลเลคเตอร์ และขาซอร์ค สำหรับวงจรสมมูลในรูปที่ 2.2(b) จะแสดงให้เห็นว่า ภายในไอจีบีทีมีทรานซิสเตอร์แฝงอยู่ด้วย โดยดูได้จากทรานซิสเตอร์ ชนิด เอ็นพีเอ็น และชนิด พีเอ็นพี ต่อเข้าด้วยกัน ในลักษณะที่มีการป้อนกลับ โดยถ้ากระแสส่วนน้อยที่ไหลผ่าน จากอิมิตเตอร์มายังคอลเลคเตอร์ ของทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พี ผ่านความต้านทานข้างเคียง แล้วทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความต้านทานสูงกว่า 0.7 โวลต์ ทรานซิสเตอร์ชนิด พีเอ็นพี จะนำกระแส สำหรับแรงดันตกคร่อมขาเดรน และซอร์คของไอจีบีที ขณะนำกระแส ( $V_{DS(on)}$ ) สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$V_{DS(ON)} = V_{j1} + V_{drain} + I_D R_{channel} \quad \dots\dots\dots[2.1]$$

เมื่อ  $V_{j1}$  เป็นแรงดันไบแอสตรงที่ตกคร่อมรอยต่อพีเอ็นพีซึ่งมีค่าค่อนข้างจะคงที่ จะมีการเปลี่ยนแปลงบ้างก็เพียงเล็กน้อย เพราะมีความสัมพันธ์โดยตรงในลักษณะ เอ็กโพเนนเชียล กับกระแส ทำให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.7 - 1 โวลต์

$V_{drift}$  เป็นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานบริเวณลอยเลื่อน ซึ่งความต้านทานนี้จะมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่เมื่อเทียบกับค่าแรงดันในมอสเฟตแล้ว จะมีค่าน้อยกว่าเพราะผลของการ มีอคติสภาพนำที่เพิ่มขึ้นใน ไอจีบีที

$R_{channel}$  เป็นค่าความต้านทานในย่าน 1-1000 โอห์ม มีค่าค่อนข้างจะคงที่

$I_D R_{channel}$  เป็นแรงดันตกคร่อมมอสเฟต

## 2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

### ( Induction Motor Drives)

#### 2.2.1 บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอกจะเป็นที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม เพราะว่าเป็นมอเตอร์ที่มีราคาถูกและ โครงสร้างทนทาน เมื่อต้องการให้มอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานที่ความเร็วคงที่จะสามารถทำได้โดยป้อนแรงดันสาย (ซึ่งเป็นแรงดันที่คงที่ ที่ความถี่ 60Hz) แต่ในโครงการนี้จะใช้ เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ คอนเวอร์เตอร์ (power electronic converters) มาควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้เป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ (induction motor drive) สามารถแบ่งตามลักษณะการนำไปใช้งานได้ 2 ประเภทใหญ่ คือ

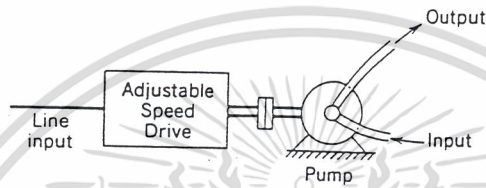
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. วงจรควบคุมขับเคลื่อนมอเตอร์แบบปรับความเร็วได้ (*Adjustable-speed drives.*)

ความสำคัญประการหนึ่งของชุดขับเคลื่อนนี้ คือ จะนำไปใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้งานเป็นพัดลม, คอมเพรสเซอร์, ปั๊ม และอื่นๆ

2. ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เซอร์โว (*servo drives.*)

เป็นการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สลับซับซ้อน นั่นคือนำมอเตอร์เหนี่ยวนำมาใช้งานเป็นมอเตอร์ชนิดเซอร์โว ในอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์, เครื่องจักรกล, โรบอทท์



รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบปรับความเร็วได้

ในระบบที่แสดงในรูปที่ 2.3 (การนำมอเตอร์เหนี่ยวนำมาใช้งานเป็นปั๊ม) พบว่าการลดลงของกำลังไฟฟ้าอินพุท เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ความเร็วของมอเตอร์และอัตราการไหลลดต่ำลง ทำให้สามารถสรุปเป็นสมการคร่าวๆ ได้ว่า

$$\text{Torque} \cong k_1(\text{speed})^2 \dots\dots\dots[2.2]$$

เพราะฉะนั้น กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ปั๊มจากมอเตอร์จะมีค่าเป็น

$$\text{Power} \cong k_2(\text{speed})^3 \dots\dots\dots[2.3]$$

เมื่อ  $k_1$  และ  $k_2$  เป็นค่าคงที่

จากตัวอย่างที่กล่าวมาแล้วนั้น พบว่าในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเกี่ยวข้องกับเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ อินเวอร์เตอร์ (power electronic inverters) และยังสามารถควบคุมความเร็วในเกินกว่าความเร็วที่พิกัดของมอเตอร์ได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 หลักการพื้นฐานการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เนื่องจากในโครงการนี้จะเกี่ยวข้องกับมอเตอร์แบบกรงกระรอกชนิด 3 เฟส ดังนั้นในการพิจารณาจะเฉพาะเจาะจงไปที่มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกเท่านั้น เนื่องจากที่สเตเตอร์จะประกอบไปด้วยขดลวด 3 เฟส วางอยู่ในช่องสล็อตห่างกัน 120° และส่วนของโรเตอร์แบบกรงกระรอกจะทำมาจากแท่งตัวนำหลายๆ แท่ง โดยที่จุดปลายของแต่ละแท่งจะถูกัดวงจรเข้าด้วยกันโดยใช้วงแหวน short ring จากโครงสร้างที่กล่าวมาอย่างคร่าวๆ จะเห็นว่าง่าย, ราคาถูก, และมีความทนทาน ทำให้เป็นที่นิยมใช้กัน

เมื่อทำการจ่ายแรงดัน 3 เฟสที่สมดุลเข้าที่ขอรอาร์เมเจอร์ในสเตเตอร์ จะทำให้เกิดกระแสไหลในขดลวดทั้ง 3 ขด และจะเกิดสนามแม่เหล็ก  $B_{ag}$  ในช่องอากาศซึ่งจะมีคุณสมบัติดังนี้(1) มีขนาดคงที่ และ (2) หมุนด้วยความเร็วคงที่ และเรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) โดยความเร็วซิงโครนัส ในมอเตอร์ที่มี  $p$ -ขั้ว และมีความถี่  $f$  จะสามารถหาได้จากสูตร

$$n_s = 120f/p \dots\dots\dots[2.4]$$

สมการอื่นๆ ที่สำคัญสำหรับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการปรับความถี่จะสามารถสรุปได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \omega_s &= k_s f \\ S &= (\omega_s - \omega_r) / \omega_s \\ f_r &= S f \\ V_s &\cong k_3 \Phi_{ag} f \\ I_r &\cong k_4 \Phi_{ag} f_r \\ T_e &\cong k_5 \Phi_{ag}^2 f_r \end{aligned}$$

รูปที่ 2.4 แสดงตารางสูตรที่เกี่ยวข้องกับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ ที่แสดงจากสูตร ทำให้สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละค่าได้เป็นข้อๆ ดังนี้

1. ค่า synchronous speed เปลี่ยนแปลงตามการปรับค่าความถี่ของแรงดันที่จ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

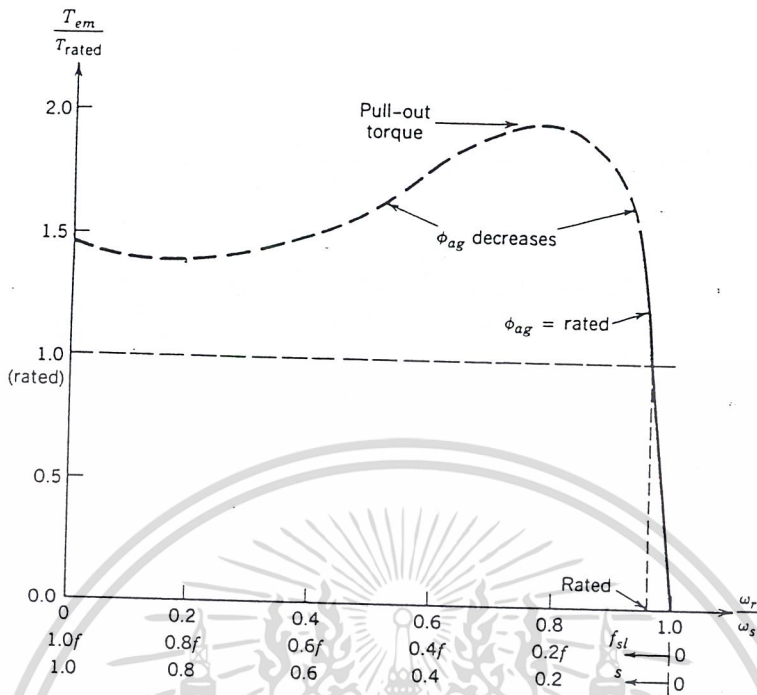
2. ที่ความถี่ต่ำ ค่ากำลังงานสูญเสียที่เกิดจากความต้านทานภายในมอเตอร์และ slip frequency จะมีค่าน้อย เพราะฉะนั้น ที่สถานะ steady state ค่า slip frequency ควรมีค่าไม่เกินพิกัดความถี่ที่ระบุไว้บน nameplate
3. ที่ slip frequency ต่ำๆ โดยความถี่ของแหล่งจ่ายคงที่ พบว่าค่า slip(S) จะมีค่าน้อยตาม slip frequency และการปรับความเร็วของมอเตอร์จะแปรผันอย่างเป็นเชิงเส้นกับความถี่ของแรงจ่าย
4. ถ้าหับแรงบิดของมอเตอร์จะมีค่าเท่ากับค่าที่พิกัด เมื่อความถี่ที่จ่ายให้มอเตอร์มีค่าเท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายและค่า  $\Phi_{ag}$  ควรมีค่าคงที่และเท่ากับค่าที่พิกัด

จากความสัมพันธ์ 4 ข้อที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้เราสามารถสรุปได้ว่าความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการควบคุมความถี่( $f$ )ของแหล่งจ่ายไฟที่ให้แก่มอเตอร์ และฟลักแม่เหล็กในช่องอากาศ (air gap flux  $\Phi_{ag}$ )ควรทำให้มีค่าคงที่ที่พิกัด โดยการควบคุมขนาดของแรงดันซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่เช่นเดียวกัน

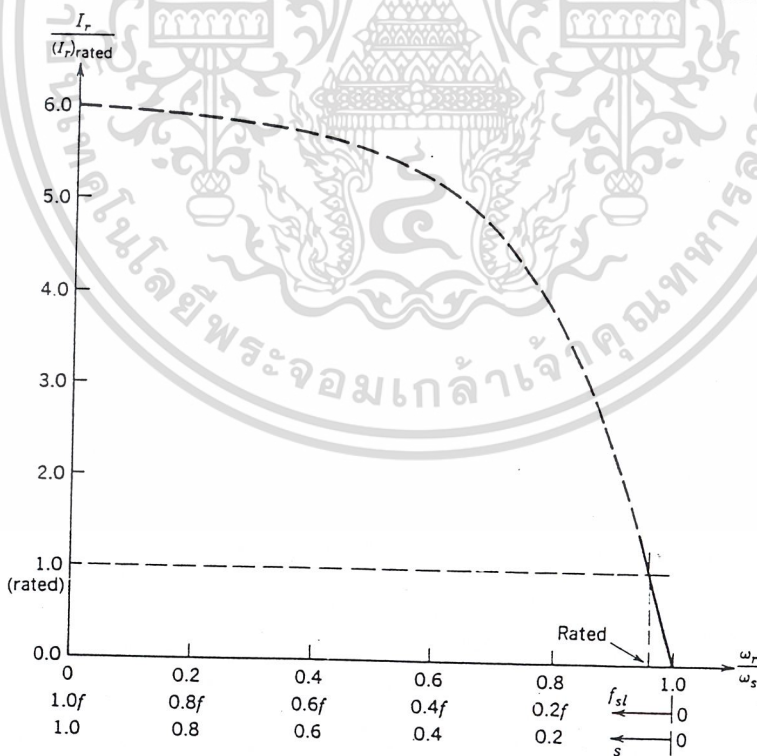
### 2.2.3 ลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิกัดความถี่และพิกัดแรงดัน

ลักษณะพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ระบุอยู่ใน nameplate ทั้งค่าของความถี่และระดับแรงดันแสดงอยู่ในรูปที่ 2.5 (แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่, ความเร็วรอบ และแรงบิด) และรูปที่ 2.6(แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่, ความเร็วรอบ และกระแส) ซึ่งจากกราฟสามารถอธิบายได้ว่า กราฟจะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นเมื่อค่า  $f$ ,  $T_e$  และ  $I_r$  มีค่าต่ำ แต่เมื่อค่า  $f$  มีค่ามากขึ้นถึงจุดหนึ่ง ค่า  $T_e$  และ  $I_r$  จะไม่เปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นกับ  $f$  เพราะว่าการที่ค่าของ  $I_r$  มีค่ามากขึ้นจะเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งทำให้ค่า  $\Phi_{ag}$  มีค่าลดลงในขณะที่ค่าของแรงดันและความถี่ที่แหล่งจ่ายยังคงที่ จากผลกระทบทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นผลทำให้กราฟของแรงบิดและกระแส ที่ค่าความถี่มากถึงค่าหนึ่ง แสดงออกมาเป็นเส้นประในรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6 โดยจะเรียกจุดที่เกิดค่าแรงบิดสูงสุดนี้ว่า pull-out torque

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงกราฟแรงบิดและความเร็ว โดยค่าแรงดันและความถี่ของแหล่งจ่ายมีค่าคงที่ที่พิกัด

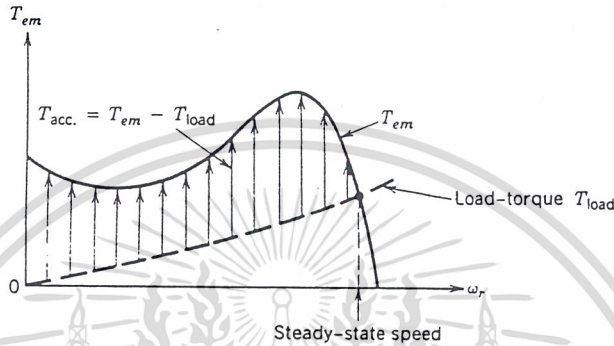


รูปที่ 2.6 แสดงกราฟกระแสและความถี่ของโรเตอร์

โดยค่าแรงดันและความถี่ของแหล่งจ่ายมีค่าคงที่ที่พิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้งานทั่วๆ ไปจะไม่ใช้งานมอเตอร์ในช่วงที่กราฟเป็นเส้นประ เนื่องจากเป็นช่วงที่  $\Phi_{ag}$  มีค่าไม่คงที่ แต่ถ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำเริ่มต้นทำงานจากการป้อนแรงดันสาย โดยปราศจากการใช้อุปกรณ์ควบคุมทางเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ (power electronic controller) จะทำให้ค่ากระแสขณะเริ่มต้นทำงานมีค่าสูงกว่าค่าที่พิกัด 6-8 เท่า ซึ่งอาจจะทำให้มอเตอร์เสียหายได้ ในรูปที่ 2.7 แสดงถึงการเร่งระดับของแรงบิด( $T_e - T_{load}$ ) โดยเริ่มต้นเร่งจากระดับเริ่มต้น และจากกราฟยังพบอีกว่าที่จุดตัดระหว่างกราฟ  $T_e$  และ กราฟ  $T_{load}$  จะใช้เป็นจุดการทำงานที่ steady-state



รูปที่ 2.7 แสดงกราฟการเริ่มต้นทำงานของมอเตอร์ โดยค่าแรงดันและความถี่ที่พิกัด

**2.2.4 การควบคุมความเร็วโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่และแรงดันที่จ่ายให้กับสเตเตอร์**

ตามที่ได้อธิบายมาแล้วก่อนหน้านี้ ทำให้เราพบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความถี่ ที่ซึ่งใช้เป็นค่าควบคุม synchronous speed(และสามารถควบคุมความเร็วของโรเตอร์ได้ ถ้าค่า slip มีค่าน้อย) และในการควบคุมนั้นจะต้องรักษา  $\Phi_{ag}$  ให้มีค่าคงที่ ซึ่งทำได้โดยการปรับระดับแรงดันให้เป็นเชิงเส้นกับความถี่ ดังนั้นการปรับความถี่และแรงดันของมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ได้มีการนำวงจรการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำมาใช้งาน

**2.2.4.1 ลักษณะของแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ**

จากรูปที่ 2.4 พบว่าเมื่อทำให้  $\Phi_{ag}$  มีค่าคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่าง  $T_e$  และ  $f_r$  จะเป็นเชิงเส้นในช่วงที่ค่า  $f_r$  มีค่าต่ำซึ่งสมการในช่วงนี้จะออกมาเป็น

$$T_e \cong k_9 f_r \dots\dots\dots [2.5]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

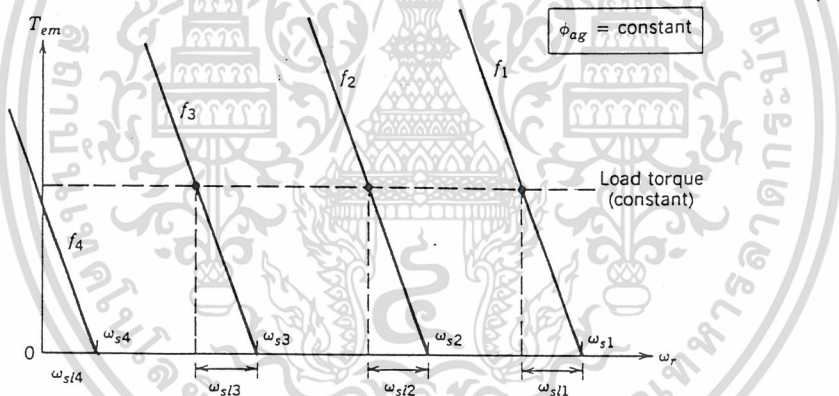
สมการข้างต้นจะอ้างถึงส่วนที่เป็นเส้นทึบของกราฟแรงบิดและความเร็วรอบ ในรูปที่ 2.8 และเนื่องจากความถี่  $f$  เป็นฟังก์ชันของ slip speed( $\omega_s$ ) ทำให้  $T_e$  เป็นฟังก์ชันกับ  $\omega_r$  ด้วยเช่นเดียวกันตามสมการ

$$\omega_r = (f_r/f)\omega_s = 4\pi f_r/p \dots\dots\dots[2.6]$$

จากสมการทั้ง 2 สมการข้างบนจะได้ว่า

$$T \cong k_{10}\omega_r \dots\dots\dots[2.7]$$

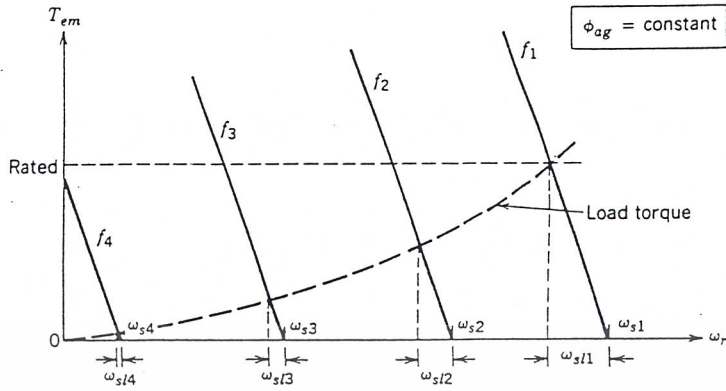
เมื่อนำสมการระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบมา plot โดยเปลี่ยนความถี่ไปเรื่อยๆ ซึ่งเท่ากับเปลี่ยน  $\omega_r$  ด้วยเช่นเดียวกัน จะได้กราฟออกมาดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงกราฟแรงบิดและความเร็วรอบที่ค่า  $S$  มีค่าน้อย เมื่อฟลักแม่เหล็กในช่องอากาศและแรงบิดมีค่าคงที่

จากกราฟทำการพิจารณาที่ความถี่ 2 ระดับคือ  $f_1$  และ  $f_2$  ดังนั้นความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนจะเป็น  $\omega_{s1}$  และ  $\omega_{s2}$  ถ้าแรงบิดที่โหลด มีค่าเท่ากันทั้ง 2 ระดับความถี่ จากสมการข้างต้นพบว่า  $\omega_{s1} = \omega_{s2}$  ดังนั้นเส้นกราฟที่มีค่าแรงบิดที่โหลด และ slip speed เท่ากันแต่เปลี่ยนระดับของความถี่ไป จะได้เส้นกราฟที่เหมือนกันแต่จะขนานกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

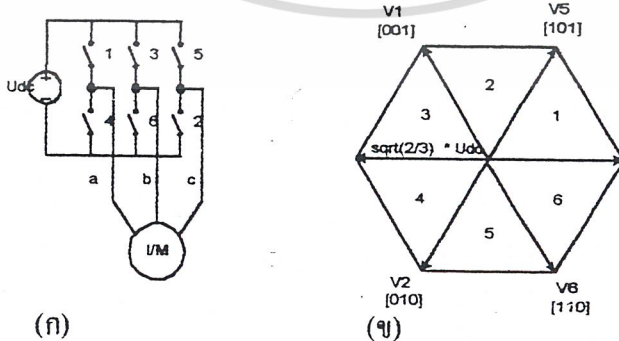


รูปที่ 2.9 แสดงกราฟแรงบิดที่โหลด โดยการเปลี่ยนแปลงของแรงบิด จะมีค่าเท่ากับกำลังสองของความเร็วรอบ

นั่นคือถ้าแรงบิดที่โหลดมีค่าคงที่ ค่า  $\omega_s$  ก็จะคงที่ด้วย แต่เนื่องจากเมื่อความถี่ลดลงค่าของ slip จะเพิ่มขึ้นทำให้ การสูญเสียกำลังงานในโรเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตาม  $f$  มีลดลงเพื่อลดความเร็วของมอเตอร์ แต่ค่าแรงบิดที่โหลดในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้งานในแบบต่างๆ จะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบยกกำลังสอง ดังนั้นในกรณีที่การลดลงของ  $f$  มีค่าเท่ากับกับการลดลงของ slip ค่าความสูญเสียในโรเตอร์ จะมีค่าน้อยลงตามรูปที่ 2.9

2.3 อินเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เวกเตอร์ของแรงดัน

จากบทที่ที่ผ่านมาจะเห็นว่าอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุมแบบเวกเตอร์ จะเป็นแบบควบคุมแรงดัน (Voltage Control) ซึ่งเป็นการทำงานที่ทำโดยใช้หลักการของเวกเตอร์แรงดัน ซึ่งจะได้อธิบายดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.10 (ก) แบบจำลองชุดอินเวอร์เตอร์ (ข) เวกเตอร์แรงดันของชุดอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.10(ก) เป็นชุดอินเวอร์เตอร์ที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง  $U_{dc}$  และสวิตช์กำลัง 6 ตัว ซึ่งสามารถจะสร้างเวกเตอร์แรงดันได้ 8 แบบ กล่าวคือเวกเตอร์ศูนย์  $V_0$ ,  $V_7$  และเวกเตอร์  $V_1$ - $V_6$  ซึ่งมีขนาด  $\sqrt{2/3} \cdot U_{dc}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ข) โดยที่ตัวเลขในวงเล็บแสดงถึงลักษณะการเปิดปิดวงจรของสวิตช์ในเฟส a, b และ c ตามลำดับ “0” หมายถึงสวิตช์ตัวบนเปิดวงจร “1” หมายถึงสวิตช์ตัวบนปิดวงจร ยกตัวอย่างเช่น ในกรณี  $V_4[100]$  จะเป็นกรณีที่สวิตช์หมายเลข 1, 6 และ 2 ปิดวงจร จะได้แรงดันระหว่างสายดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} v_{ab} &= v_a - v_b = U_{dc} \\ v_{bc} &= v_b - v_c = 0 \\ v_{ca} &= v_c - v_a = -U_{dc} \\ v_a + v_b + v_c &= 0 \end{aligned} \quad \dots\dots[2.8]$$

โดยที่  $v_a, v_b, v_c$  เป็นแรงดันเฟสเทียบกับจุดสะเทิน(neutral)ในมอเตอร์

เพราะฉะนั้นเราจะได้ว่าแรงดันเฟสมีค่าเท่ากับ

$$v_a = \frac{2}{3} U_{dc}, v_b = -\frac{1}{3} U_{dc}, v_c = -\frac{1}{3} U_{dc} \quad \dots\dots[2.9]$$

ซึ่งสามารถแปลงเป็นเวกเตอร์แรงดันได้ดังนี้

$$\vec{v} = v_d + jv_q = \sqrt{\frac{2}{3}} (v_a + v_b e^{j\gamma} + v_c e^{j2\gamma}) \quad \dots\dots[2.10]$$

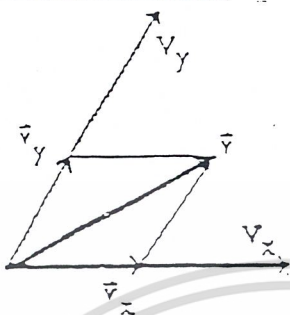
แทนค่า (3.2) ลงใน (3.3) จะได้

$$\begin{aligned} v_d &= \sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc}, v_q = 0 \\ |\vec{v}| &= \sqrt{v_d^2 + v_q^2} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} \end{aligned} \quad \dots\dots[2.11]$$

เนื่องจากเวกเตอร์แรงดันที่เราสามารถสร้างได้มีเพียง 8 แบบ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เราจึงไม่สามารถที่จะสร้างเวกเตอร์แรงดันตามต้องการได้โดยตรง แต่เราจะใช้วิธีการสร้างเวกเตอร์แรงดันที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเฉลี่ยเท่ากับแรงดันที่ต้องการแทน โดยอาศัยเวกเตอร์ศูนย์ และเวกเตอร์แรงดัน 2 เวกเตอร์ที่อยู่ข้างเคียงกัน เช่น  $V_4$  และ  $V_5$  เป็นต้น

### หลักการทำ PWM แบบเวกเตอร์แรงดัน



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของเวกเตอร์แรงดัน

ในที่นี้เรากำหนดให้เวลาที่ใช้ในการสวิตช์ทั้งหมดเท่ากับ  $T_s$ ,  $t_x$  เท่ากับเวลาในการต่อวงจรของสวิตช์ตามเวกเตอร์  $V_x$  และ  $t_y$  เท่ากับเวลาในการต่อวงจรของสวิตช์ตามเวกเตอร์  $V_y$  ที่อยู่ข้างเคียงกัน โดยที่ช่วงเวลาที่เหลือจะเป็นของเวกเตอร์ศูนย์ ดังนั้นเราจะได้ค่าเฉลี่ยของเวกเตอร์แรงดัน  $\bar{v}$  ในช่วงเวลา  $T_s$  เป็น

$$\begin{aligned}\bar{v} \cdot T_s &= V_x \cdot t_x + V_y \cdot t_y + V_0 \frac{t_0}{2} + V_7 \frac{t_0}{2} \\ T_s &= t_x + t_y + t_0 \\ \bar{v} &= \left( \frac{t_x}{T_s} \right) V_x + \left( \frac{t_y}{T_s} \right) V_y\end{aligned}\quad \dots[2.10]$$

ในทางกลับกันถ้าเรากำหนดเวกเตอร์แรงดันเฉลี่ยที่ควรได้เป็น  $\bar{v}$  เราก็สามารถคำนวณค่า  $t_x$ ,  $t_y$  และ  $t_0$  ได้จากความสัมพันธ์ข้างต้น โดยการแตกเวกเตอร์แรงดันที่ต้องการลงในแนวของเวกเตอร์ที่ใช้ในการสวิตช์เป็น  $\bar{v} = \bar{v}_x + \bar{v}_y$  โดยที่  $\bar{v}_x$  เป็นเวกเตอร์องค์ประกอบในแนว  $V_x$  ส่วน  $\bar{v}_y$  เป็นเวกเตอร์องค์ประกอบในแนว  $V_y$  เราจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_x = \frac{|\bar{v}_x|}{V_x} T_s$$

$$t_y = \frac{|\bar{v}_y|}{V_y} T_s$$

....[2.11]

$$t_o = T_s - t_x - t_y$$

ดังนั้นเมื่อทราบว่าแรงดันแวกเตอร์เฉลี่ย ( $\bar{v}$ ) อยู่ที่เซกเตอร์ใด เช่นในรูปที่ 3.1 เราสามารถคำนวณขนาดของแวกเตอร์ประกอบทั้งสองในกรณีต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

เซกเตอร์ที่ 1

$$\bar{v} = \bar{v}_x + \bar{v}_y = x + jy = \left( |v_4| + \frac{1}{2}|v_5| \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2}|v_5|$$

$$|v_4| = x - \frac{y}{\sqrt{3}}; |v_5| = \frac{2y}{\sqrt{3}}$$

เซกเตอร์ที่ 2

$$\bar{v} = \bar{v}_x + \bar{v}_y = x + jy = \left( \frac{1}{2}|v_5| - \frac{1}{2}|v_1| \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2}|v_5 - v_1|$$

$$|v_5| = x + \frac{y}{\sqrt{3}}; |v_1| = -x + \frac{y}{\sqrt{3}}$$

เซกเตอร์ที่ 3

$$\bar{v} = \bar{v}_x + \bar{v}_y = x + jy = \left( -\frac{1}{2}|v_1| - |v_3| \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2}|v_1|$$

$$|v_3| = -x - \frac{y}{\sqrt{3}}; |v_1| = \frac{2y}{\sqrt{3}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซกเตอร์ที่ 4

$$\bar{v} = \bar{v}_x + \bar{v}_y = x + jy = \left( -|v_3| - \frac{1}{2}|v_2| \right) - j \frac{\sqrt{3}}{2}|v_2|$$

$$|v_3| = -x + \frac{y}{\sqrt{3}}; |v_2| = -\frac{2y}{\sqrt{3}}$$

เซกเตอร์ที่ 5

$$\bar{v} = \bar{v}_x + \bar{v}_y = x + jy = \left( \frac{1}{2}|v_6| - \frac{1}{2}|v_2| \right) - j \frac{\sqrt{3}}{2}(|v_6| + |v_2|)$$

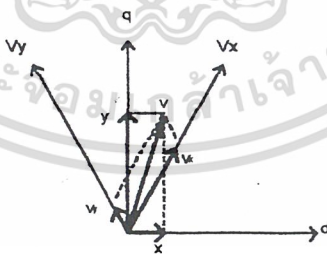
$$|v_6| = x - \frac{y}{\sqrt{3}}; |v_2| = -x - \frac{y}{\sqrt{3}}$$

เซกเตอร์ที่ 6

$$\bar{v} = \bar{v}_x + \bar{v}_y = x + jy = \left( |v_4| + \frac{1}{2}|v_6| \right) - j \frac{\sqrt{3}}{2}|v_6|$$

$$|v_4| = x + \frac{y}{\sqrt{3}}; |v_6| = -\frac{2y}{\sqrt{3}}$$

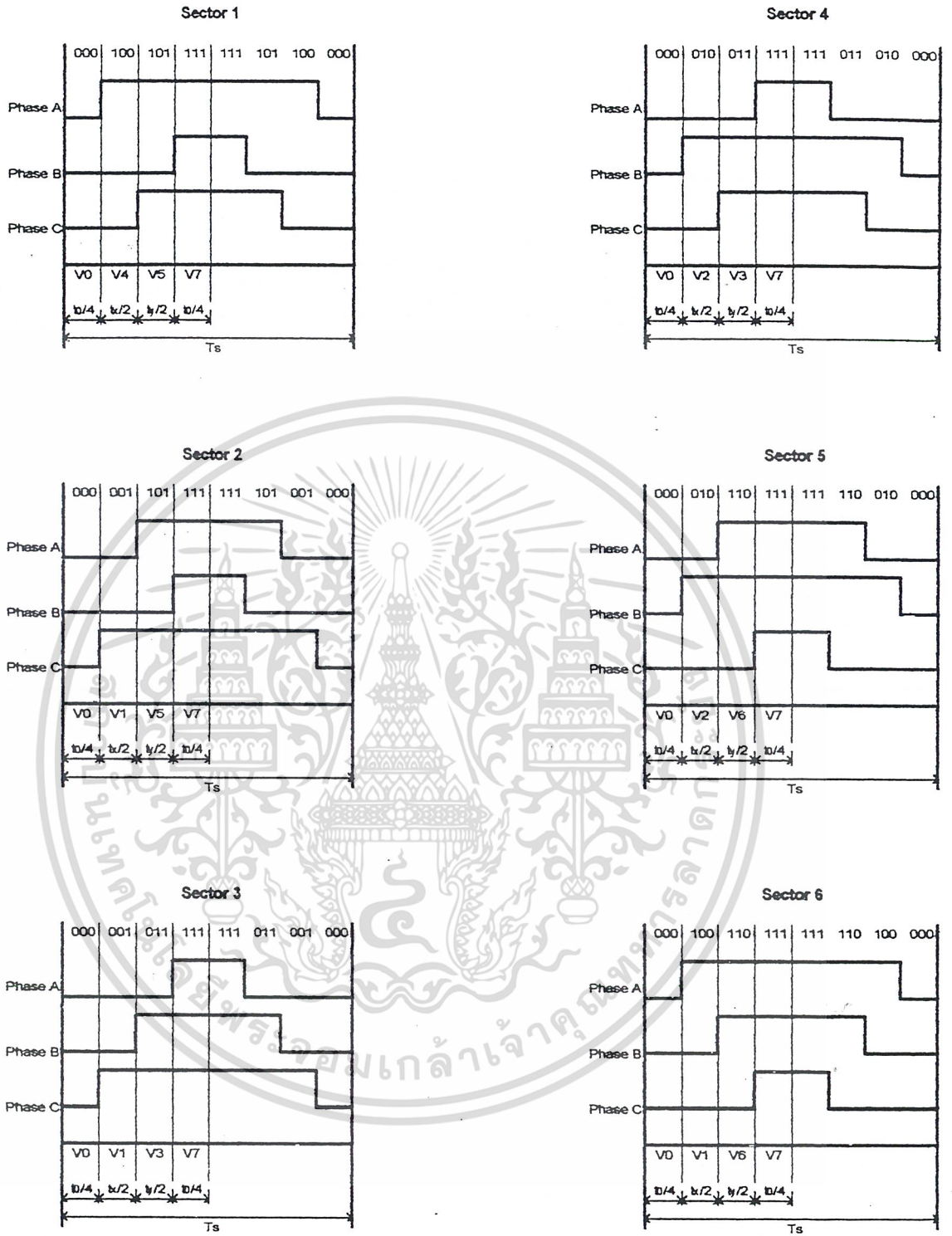
โดยที่  $x$  และ  $y$  เป็นขนาดขององค์ประกอบเวกเตอร์แรงดันในแกน d-q ในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เวกเตอร์แรงดันบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ (d-q)

ถึงแม้ว่าเราจะคำนวณช่วงเวลา  $t_x$ ,  $t_y$  และ  $t_u$  ของเวกเตอร์แรงดันได้แล้วก็ตาม เรายังสามารถกำหนดรูปแบบในการสวิตช์ได้อย่างอิสระ แต่ในวิทยานิพนธ์นี้เราจะกำหนดรูปแบบการสวิตช์ตามรูปที่ 2.13 อันจะทำให้เกิดการมอดูเลต แบบขอบคู่ (double edge) ซึ่งมีลักษณะสมมาตรและมีคุณสมบัติในด้านการกระจายฮาร์มอนิกที่ดี (H. Broeck, 1988)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แผนผังเวลารูปแบบการสวิตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### หลักการเลือกเซกเตอร์

เมื่อทราบแรงดันเวกเตอร์จากการคำนวณของการควบคุมแบบแยกการควบคุมให้มีอิสระต่อกัน ซึ่งเป็นค่าที่วัดเทียบกับแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์ เราสามารถที่จะหาว่าเวกเตอร์นั้นอยู่ที่มุมเท่าไรเทียบกับแกนอ้างอิงสเตเตอร์ ทำให้ทราบว่าเลือกใช้เวกเตอร์คู่ใดในเวกเตอร์ทั้ง 6

กล่าวคือ สมมติให้แรงดันเวกเตอร์เฉลี่ยที่เราต้องการสร้างคือ  $\bar{v} = v_\alpha + jv_\beta$  ซึ่งเทียบกับแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์จากรูปที่ 3.5 การย้ายแกนมาเป็นแกนอ้างอิงสเตเตอร์กระทำดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \rho & -\sin \rho \\ \sin \rho & \cos \rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad \dots[2.12]$$

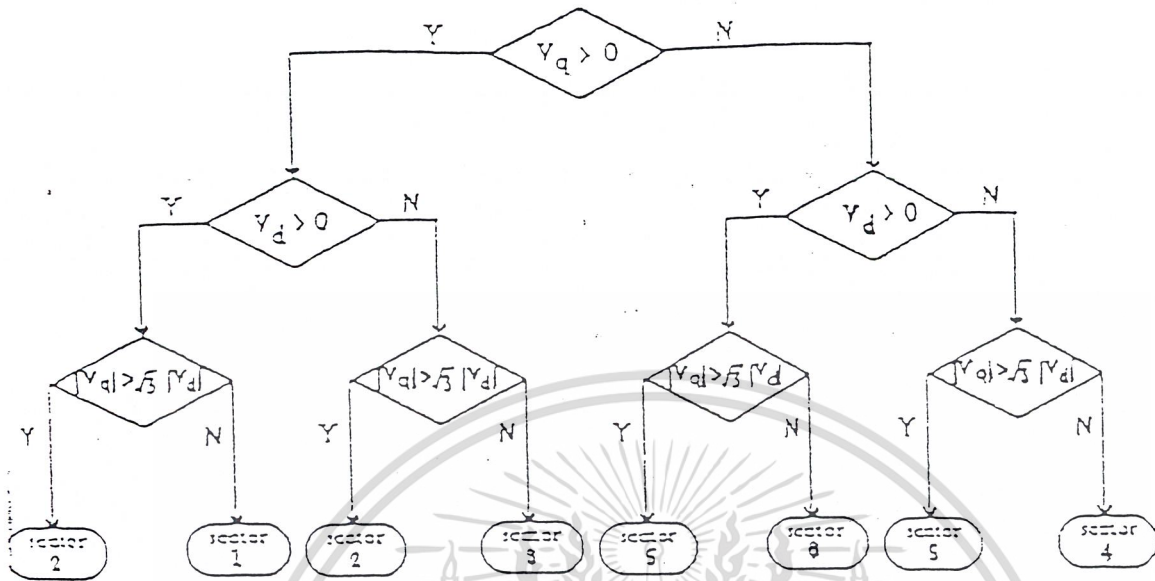
โดยที่  $\rho$  = มุมระหว่างแกนอ้างอิง โรเตอร์ฟลักซ์ ทำกับแกนอ้างอิงสเตเตอร์



รูปที่ 2.14 เวกเตอร์แรงดันบนแกนอ้างอิง d-q และแกนอ้างอิง  $\alpha$ - $\beta$

แต่เนื่องจากในการทำการควบคุมให้มีอิสระต่อกัน และการย้ายแกนอ้างอิงมายังแกนสเตเตอร์ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น เราจะทราบเพียงค่าเวกเตอร์ประกอบของเวกเตอร์แรงดัน ( $v_d, v_q$ ) เท่านั้น ดังนั้นหากเราต้องการทราบมุมของเวกเตอร์นั้นจะต้องทำการคำนวณ  $\arctan(v_q/v_d)$  ซึ่งในกรณีที่น่าไปเขียนด้วยซอฟต์แวร์ จะยุ่งยากและเกิดความผิดพลาดสูงในช่วงมุมใกล้  $90^\circ$  ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอแนวทางการหาเซกเตอร์ของเวกเตอร์แรงดัน โดยไม่ต้องคำนวณค่ามุมของเวกเตอร์แรงดัน ซึ่งมีวิธีการดังแสดงในแผนภาพในรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แผนภาพวิธีการหาเซกเตอร์ของเวกเตอร์แรงดัน

วิธีการสร้างรูปแบบการสวิตช์ดังกล่าวอาศัยการเปรียบเทียบค่าเท่านั้นจึงง่ายและเหมาะสมสำหรับการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 80C196KB โดยอาศัยตัวจับเวลาภายใน และพอร์ตรับและส่งสัญญาณที่มีความเร็วสูง (High speed Input/output; HIS, HSO) เมื่อทราบรูปแบบการสวิตช์และเมื่อถึงเวลาในการสวิตช์ของรูปแบบนั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่ง HSO ให้ส่งรูปแบบการสวิตช์นั้น เป็นสัญญาณสำหรับการตัด-ต่อสวิตช์ที่ความถี่การสวิตช์เป็นหลัก kHz ได้

#### 2.4 อินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสี่เหลี่ยม

เมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์ถึงความเร็ววิกฤต การปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ไม่สามารถเพิ่มแรงดันได้อีก เพราะฉะนั้น การเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถทำได้โดยการเพิ่มความถี่เท่านั้น ทำให้ไม่สามารถรักษาสัดส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ได้อีก ดังนั้นค่าแรงบิดก็จะตกลงเป็นส่วนของกำลังสองของความถี่

หากให้แรงดันดีซีลิงค์คงที่ อินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสี่เหลี่ยมนั้นจะไม่สามารถเปลี่ยนขนาดแรงดันกระแสระดับขาออกได้ โดยสามารถหาค่าแรงดัน RMS ระหว่างเส้นของส่วนประกอบมูลฐานได้เท่ากับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

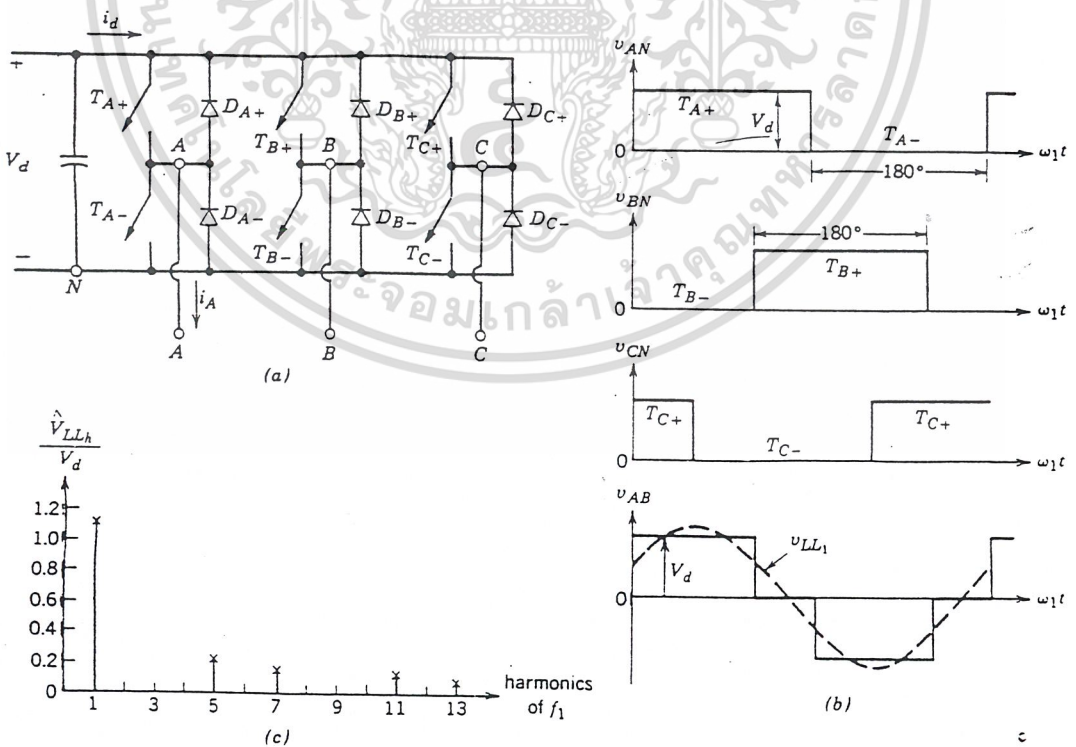
$$\begin{aligned}
 V_{LL_1} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{4V_d}{2\pi} \\
 &= \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_d \\
 &= 0.78V_d
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

และรูปคลื่นแรงดันระหว่างไลน์ขาออกไม่ได้ขึ้นกับ โหลดโดยมันจะประกอบด้วย ฮาร์โมนิก  $(6n \pm 1)$  ซึ่งจะมีขนาดแอมป์จูดลดลงเป็นส่วนกลับกับอันดับฮาร์โมนิกของมัน ดังรูปที่ 2.10 โดยเป็นไปดังสมการ

$$V_{LL_h} = \frac{0.78}{h} V_d
 \tag{2.14}$$

โดย

$$h = 6n \pm 1 \quad (n=1,2,3,\dots)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.16 แสดงอินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

### บทที่ 3

#### วงจรและหลักการออกแบบ

##### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวงจรต่างๆ ที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์ โดยแบ่งส่วนของวงจรถูกออกเป็น 2 ส่วน คือ

##### 1. ส่วนของวงจรกำลัง

ภาคกำลังด้านเข้า ประกอบด้วย

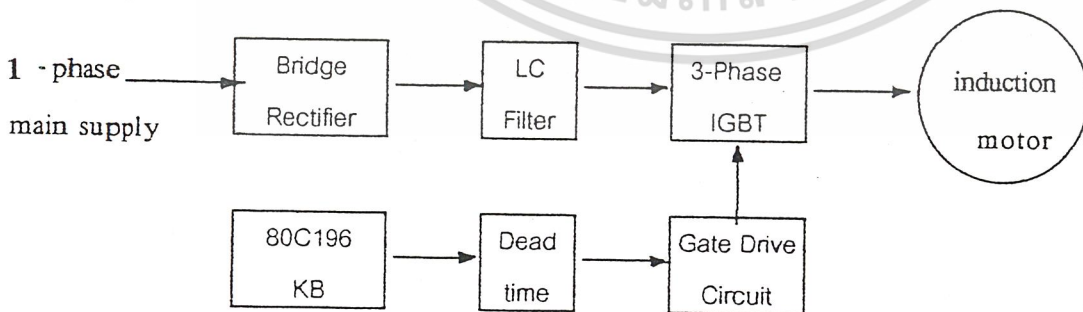
- ชุดเรียงกระแส (Rectifier) ใช้ไดโอดแบบบริดจ์ 3 เฟส
- ชุดวงจรกรองสัญญาณ (LC filter)
- ชุดแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง (Power Supply)

ภาคกำลังด้านออก ประกอบด้วย

- ชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ใช้ IGBT Module
- ชุดขับเกทของ IGBT 6 ชุด
- ชุดป้องกันการทำงานพร้อมกันของ IGBT (Overlap Protection Circuit)

##### 2. ส่วนของวงจรควบคุม ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ของ INTEL 80C196 ทำงานที่ความถี่ 12 MHz

และซอฟต์แวร์ของระบบควบคุม โดยความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบต่างๆ สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรม ดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ส่วนของวงจรกำลัง

#### 3.2.1 วงจรกำลังขาเข้า

วงจรในภาคเรกติไฟเออร์ทำหน้าที่แปลงไฟสลับเป็นไฟตรง ซึ่งจะประกอบด้วย ส่วนของวงจรเรียงกระแส และวงจรป้องกัน ดังต่อไปนี้

##### 3.2.1.1 วงจรเรียงกระแส

จากรูปที่ 3.2 จะทำการเรียงกระแสโดยการใช้ไดโอดกำลัง 4 ตัว และจัดวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier) ซึ่งในการกำหนดพิกัดของกระแส และแรงดันสูงสุด สามารถหาได้จากพิกัดของมอเตอร์ (1 แรงม้า) และแรงดันที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์ (220 V)

#### ไดโอดเรียงกระแส

พิกัดกระแสที่ใช้ จะกำหนดไว้ที่ 150% ของพิกัดของมอเตอร์ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} I &= [P_{out} / (\sqrt{3}) V_{in(RMS)}] * 150\% \quad \dots\dots\dots[3.1] \\ &= [(746)/(1.732*220)]*1.5 \\ &= 2.93 \text{ A} \end{aligned}$$

สามารถเลือกใช้ไดโอดที่ทนกระแสได้ 3 A เป็นอย่างต่ำ

พิกัดแรงดันที่ใช้ จะกำหนดไว้ที่ 150% ของค่าแรงดันยอด (Peak)

$$\begin{aligned} V &= 1.414 * V_{in(RMS)} * 150\% \quad \dots\dots\dots[3.2] \\ &= 1.414 * 220 * 1.5 \\ &= 466 \text{ V} \end{aligned}$$

สามารถเลือกใช้ไดโอดที่ทนแรงดันได้ 500V เป็นอย่างต่ำ

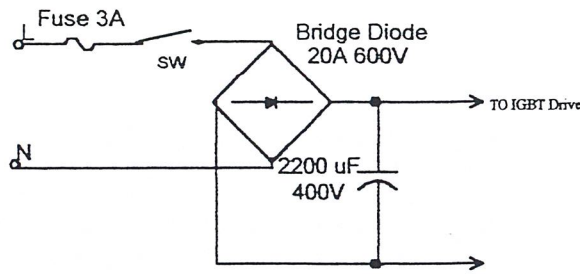
#### ตัวเก็บประจุฟิลเตอร์ (Filter Capacitor)

ตัวเก็บประจุฟิลเตอร์จะทำหน้าที่กรองแรงดันให้เรียบ และโดยทั่วไปจะใช้ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์ สำหรับการกำหนดค่าแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุฟิลเตอร์ มีการคำนวณตามสูตรดังนี้

$$\begin{aligned} V &= 1.414 * V_{in(RMS)} \quad \dots\dots\dots[3.3] \\ &= 1.414 * 220 \\ &= 311 \text{ V} \end{aligned}$$

สามารถเลือกใช้ค่าแรงดัน 400 V ซึ่งสามารถหาซื้อได้

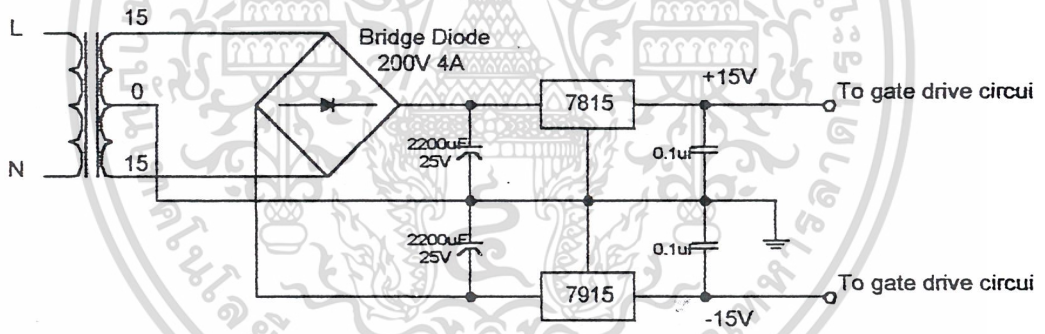
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



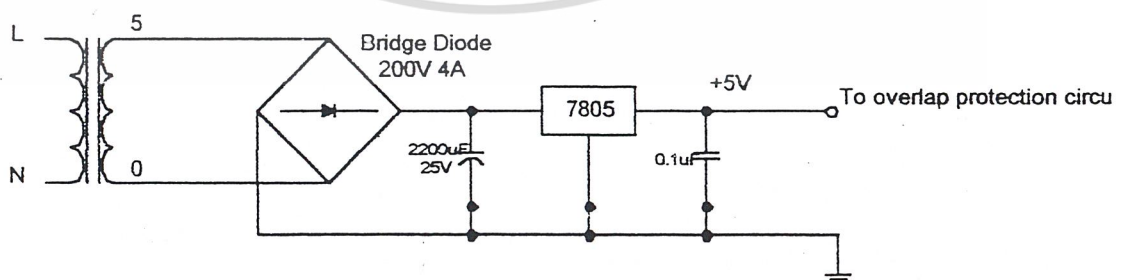
รูปที่ 3.2 แสดงวงจรเรียงกระแส

3.2.1.2 วงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง

ส่วนของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง ซึ่งจะต้องจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรขับสัญญาณเกต ซึ่งจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟ 4 ชุด ซึ่งแยกออกจากกัน เพื่อจ่ายให้กับวงจรขับเกตทั้ง 6 วงจร ดังรูปที่ 3.3 และจ่ายไฟเลี้ยงให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ 80C196 วงจรหน่วงเวลา (Overlap protection circuit) ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 แสดงวงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของวงจรขับเกต



รูปที่ 3.4 แสดงวงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของวงจรหน่วงเวลา

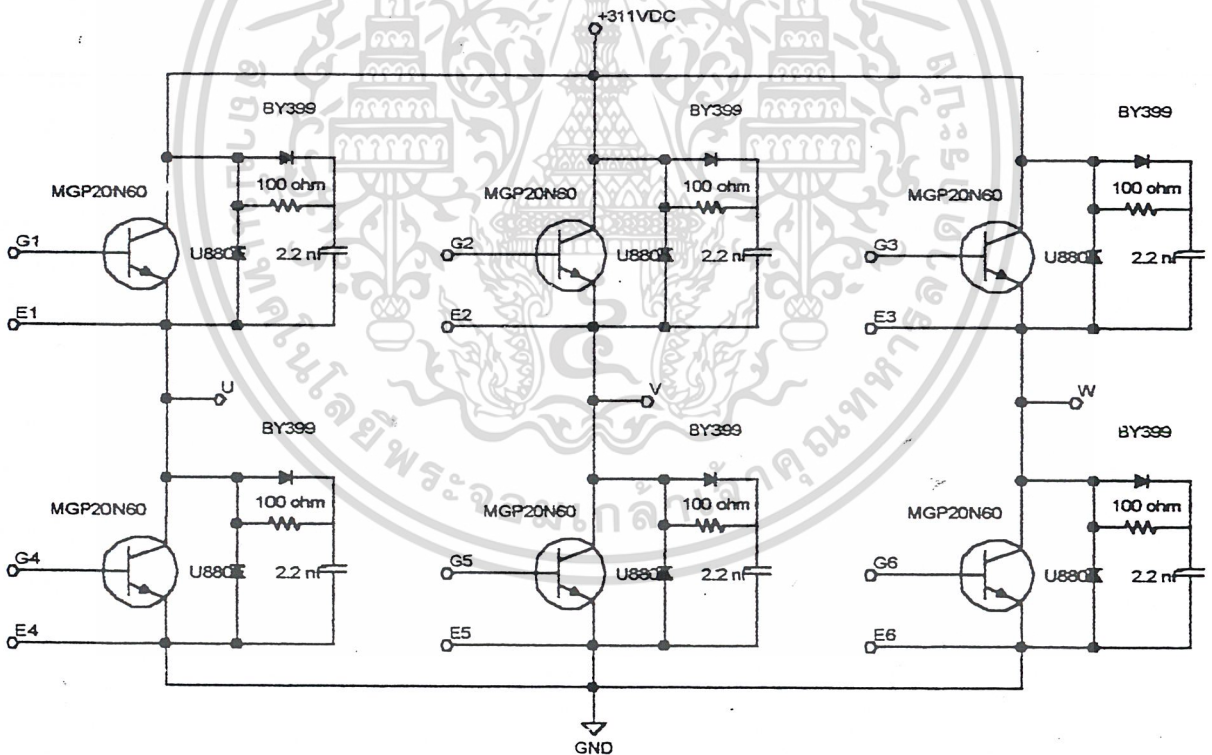
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 วงจรกำลังขาออก

ในส่วนนี้ จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟตรง เป็นแรงดันไฟสลับเพื่อขับมอเตอร์ตามที่ต้องการ โดยมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ส่วนวงจรขับด้วยไอจีบีที ส่วนวงจรขับเคลื่อนของไอจีบีที และส่วนของวงจรหน่วงเวลา ( วงจรสร้างเวลาเคคโทม์ )

#### 3.2.2.1 ส่วนวงจรขับด้วยไอจีบีที(IGBT Drive)

เหตุผลสำคัญของการเลือกอุปกรณ์สวิทช์จึงโดยการใช้ไอจีบีที เนื่องจากข้อดีในด้านความเร็วในการสวิทช์ที่สูงเกือบเท่ามอสเฟต และมีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสที่ต่ำเหมือนกับทรานซิสเตอร์ ทำให้สามารถขับ ไอจีบีทีที่มีความถี่สูงและเกิดความร้อนน้อยในการทำงานเนื่องจากกำลังสูญเสียที่ตกคร่อมบนตัวไอจีบีทีมีค่าต่ำ โดยในโครงการเลือกใช้ เบอร์ MGP20N60 เนื่องจากมีความเร็วในการสวิทช์สูงและสามารถทนกระแสและแรงดันที่พิกัดได้



รูปที่ 3.5 แสดงวงจรขับด้วยไอจีบีที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรในรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่า มีอุปกรณ์ที่ประกอบเข้ากับ ไอจีบีทีแต่ละตัวดังนี้

ฟรีวีลิ่งไดโอด(Freewheeling Diode) จะทำหน้าที่ป้องกันแรงดันย้อนกลับจากค่าความเหนี่ยวนำของตัวมอเตอร์ซึ่งมีค่าสูงและสามารถทำให้ ไอจีบีทีเสียหายได้ และในโครงการนี้เลือกใช้ไดโอดเบอร์ U880 ซึ่งสามารถทนกระแสได้ 8 A และทนแรงดันได้ 800 V

วงจร snubber (Snubber) จะทำหน้าที่จำกัดแรงดันตกคร่อมตัว ไอจีบีที และลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการสวิตช์ที่ความถี่สูง ซึ่งมีการคำนวณค่า R และ C ที่ใช้ดังนี้

$$C = [I_{PK} * t_{OFF}] / 2V_m \quad \dots\dots\dots[3.4]$$

$$R = [t_{ON(min)} / (2 * 3C)] \quad \dots\dots\dots[3.5]$$

ในที่นี้  $t_{OFF}$  จะหาได้จากข้อมูลของตัว ไอจีบีที ซึ่งมีค่าประมาณ 0.5 $\mu$ S และ  $t_{ON(min)}$  มีค่าประมาณ 1.25  $\mu$ S

$$C = [(746/220) * 1.414 * 0.5 * 10^{-6}] / 2 * (1.414 * 220)$$

$$= 3.8 \text{ nF}$$

$$R = (1.25 * 10^{-6}) / (2 * 3 * 3.8 * 10^{-9})$$

$$= 54.8 \Omega$$

ความสูญเสียที่เกิดขึ้นบนตัวต้านทาน คำนวณได้จาก

$$P_D = C * (2V_m)^2 / 2T \quad \dots\dots\dots[3.6]$$

เมื่อ T = คาบเวลาการทำงานของ ไอจีบีที

$$= 1/f = 1/(16 * 10^3)$$

$$= 66.7 \mu\text{S}$$

$$P_D = [3.8 * 10^{-9} * (2 * 1.414 * 220)^2] / (2 * 66.7 * 10^{-6})$$

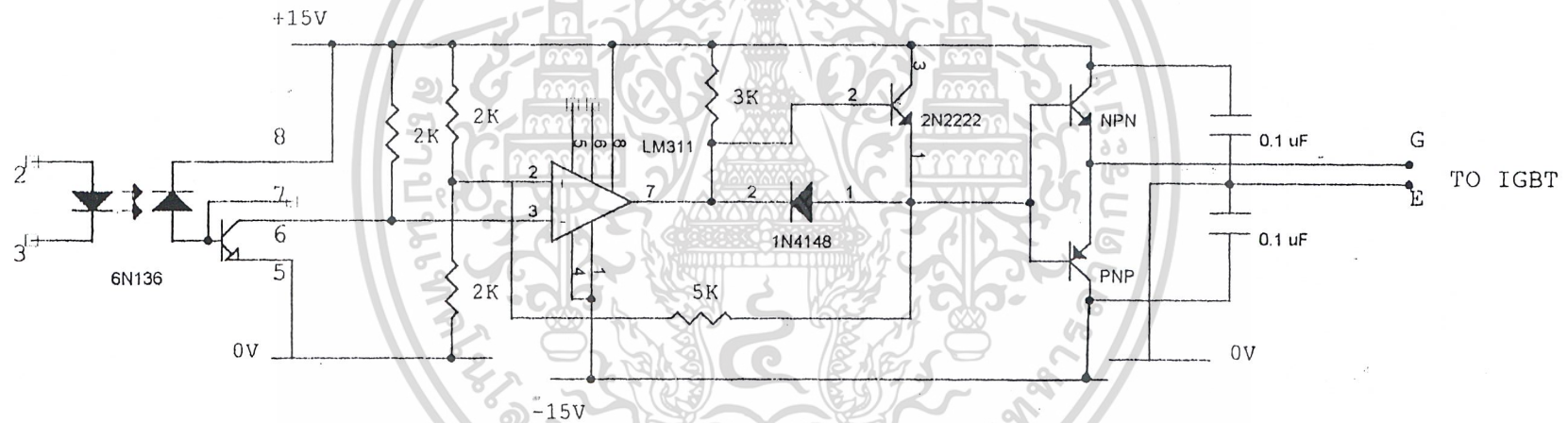
$$= 11 \text{ W}$$

### 3.2.2.2 ส่วนวงจรขับเคลื่อนของ ไอจีบีที (Gate Drive Circuit)

วงจรขับเคลื่อน มีหน้าที่ในการขับ ไอจีบีทีให้เกิดการสวิตช์ในวงจรกำลัง 3 เฟสอินเวอร์เตอร์ โดยมีทั้งหมด 6 ชุด เนื่องจากมี ไอจีบีที ทั้งหมด 6 ตัว

ไอจีบีทีไม่ต้องการกระแสในการขับเคลื่อน เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยแรงดัน แต่ในขณะที่นำกระแส และหยุดนำกระแสจะเกิดกระแสขบเกลเป็นสัญญาณพัลส์ช่วงสั้น ๆ เนื่องมาจาก Input Capacitance โดยปกติแล้ว ไอจีบีที จะหยุดนำกระแส โดยการตั้งค่าแรงดันตกคร่อมเกต - อิมิตเตอร์ ( $V_{GE}$ ) เป็นศูนย์ แต่จะเป็นการดีกว่าที่จะควบคุมไอจีบีทีให้หยุดนำกระแส โดยใช้ค่าแรงดันตกคร่อมเป็นลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงวงจรขับเคลื่อนเกตของ IGBT

Title		
GATE DRIVE CIRCUIT		
Size	Document Number	Rev
A	Doc1	
Date:	Monday, October 12, 1998	Sheet 1 of 1

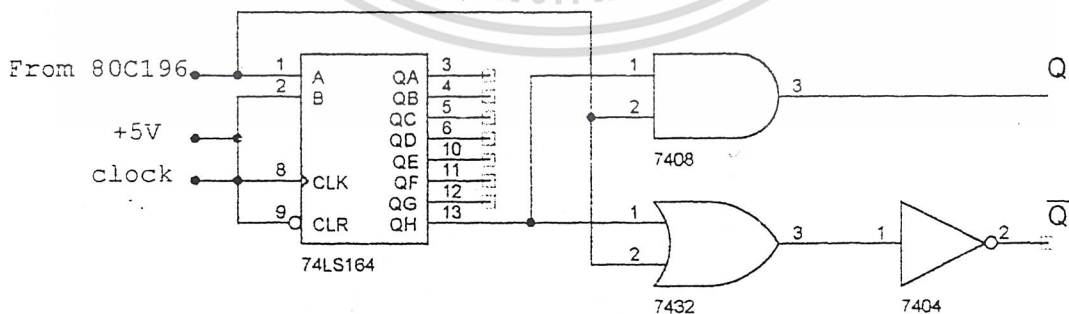
จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่า มีการแยกกราวด์ระหว่างวงจรควบคุมและวงจรกำลัง เพื่อป้องกันการรบกวนและอันตรายจากไฟแรงดันสูง ซึ่งมาจากวงจรกำลัง ในโครงงานนี้ใช้ออปโตไอโซเลเตอร์ เบอร์ 6N136 ซึ่งสามารถป้องกันการรบกวนได้ดี และสามารถใช้งานได้ที่ความเร็วสูง เอาท์พุทจากออปโตไอโซเลเตอร์จะผ่านวงจรบัฟเฟอร์ (Buffer) ที่ใช้ทรานซิสเตอร์ เพื่อเพิ่มกระแสที่ใช้ในการอัดและคายประจุของค่าความจุภายในเกทของไอจีบีที ซึ่งจะช่วยให้ใช้เวลาในการสวิตช์สั้นลง และสามารถใช้งานที่ความถี่สูงได้

### 3.2.2.3 ส่วนวงจรสร้างเวลาเคคไทม์

ในการเปลี่ยนสภาวะ จากสภาวะนำกระแส (ON) ไปเป็น สภาวะหยุดนำกระแส (OFF) หรือในทางกลับกัน ของอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งโดยทั่วไป จะต้องใช้เวลาค่าหนึ่ง ซึ่งจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับค่าเวลาการสวิตช์ (Switching Time) ของอุปกรณ์นั้น ๆ และในช่วงเวลาดังกล่าวค่ากระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ถ้าเกิดเหตุการณ์ที่อุปกรณ์ทั้งสองตัวมีการเปลี่ยนสภาวะการนำกระแส โดยมีช่วงเวลาคาบเกี่ยวกัน จะทำให้มีกระแสไหลเป็นจำนวนมาก และสามารถทำให้อุปกรณ์นั้นเสียหายได้

เพื่อป้องกันความเสียหายจากสาเหตุดังกล่าว จึงจำเป็นต้องเผื่อค่าเวลาสำหรับใช้ในการเปลี่ยนสภาวะการนำกระแสเพื่อไม่ให้คาบเกี่ยวกัน หรือเรียกว่า ค่าเวลาเคคไทม์

จากวงจรรูปที่ 3.7 จะเห็นว่า มีการใช้ 74LS164 ซึ่งเป็นชิพรีจิสเตอร์ (Shift Register) แบบ Serial In - Parallel Out โดยจะทำการเลื่อนสัญญาณที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วทำการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณขาเข้า 74LS164 และสัญญาณขาออก 74LS164 ผ่าน AND Gate (7408) ได้สัญญาณ Q และเปรียบเทียบสัญญาณทั้งสองนี้ผ่าน OR Gate (7432) และผ่านอินเวอร์เตอร์ (7404) ได้สัญญาณ  $Q^*$  สัญญาณที่ได้ทั้งสองนี้จะมีค่าหนึ่งช่วงเวลาไม่ให้เกิดสภาวะ ON พร้อมกัน แล้วนำสัญญาณทั้งสองผ่านเข้าวงจรขั้วเกทของไอจีบีที

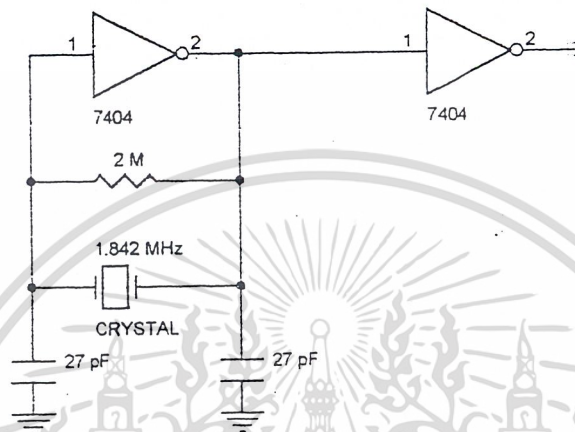


รูปที่ 3.7 แสดงวงจรสร้างเวลาเคคไทม์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2.4 ส่วนวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา

เนื่องจาก 74LS164 ต้องมีสัญญาณนาฬิกาป้อนเข้าที่ขา 8 เพื่อให้สามารถทำการเลื่อนสัญญาณได้ จึงต้องมีส่วนวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาจากคริสตัล ในโครงงานนี้ใช้คริสตัลค่าความถี่ 1.842 MHz



รูปที่ 3.8 แสดงวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ไมโครคอนโทรลเลอร์และการทำงานของโปรแกรมควบคุมอินเวอร์เตอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 16 บิต เบอร์ 80196KB ที่มีคุณสมบัติที่เป็นจุดเด่นมากมาย เช่น ชุดคำสั่ง ( instruction set ) ที่สามารถ บวก ลบ คูณ หาร ข้อมูลขนาด 16 บิตได้ อุปกรณ์ต่อพ่วงมาตรฐาน ที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง โครงสร้างในการทำงานของเครื่องเป็นแบบ Register to Register Architecture ซึ่งก็คือการที่มี Accumulator ขนาด 8 บิต จำนวน 232 ตัวนั่นเอง ซึ่งจะทำให้เกิดการเขียนโปรแกรมเป็นไปได้ง่ายขึ้น

#### 4.1 การทำงานของโปรแกรมควบคุม

จากบทก่อนได้กล่าวถึงลักษณะการควบคุมมอเตอร์ว่า หากเราต้องการปรับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยให้ค่าแรงบิดคงที่นั่นเราต้องรักษาฟลักซ์ข้ามช่องอากาศของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้คงที่ นั่นคือเราต้องรักษาอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ โปรแกรมที่ทำงานในลักษณะดังกล่าวจะอาศัยหลักการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ( PWM ) ซึ่งจะอาศัยหลักการสเปซเวกเตอร์แรงดัน ( Voltage - space vector ) ส่วนในการควบคุมความเร็วในช่วงที่ความเร็วเกินพิกัดนั้น เราจะไม่สามารถควบคุม โดยการเพิ่มแรงดันได้อีก การควบคุมความเร็วในช่วงนี้สามารถเพิ่มได้เฉพาะความถี่เท่านั้น ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าแรงบิดต้องแปรผกผันกับความถี่ที่เพิ่มขึ้นอย่างแน่นอน โปรแกรมในช่องนี้จะใช้การควบคุมแบบ Square wave inverter นั่นเอง จึงแบ่งการเขียนโปรแกรมให้ทำงานได้ทั้ง 2 โหมดการทำงาน

##### 4.1.1 การทำงานแบบเวกเตอร์แรงดัน ( Voltage space vector )

###### ขั้นตอนการทำงาน

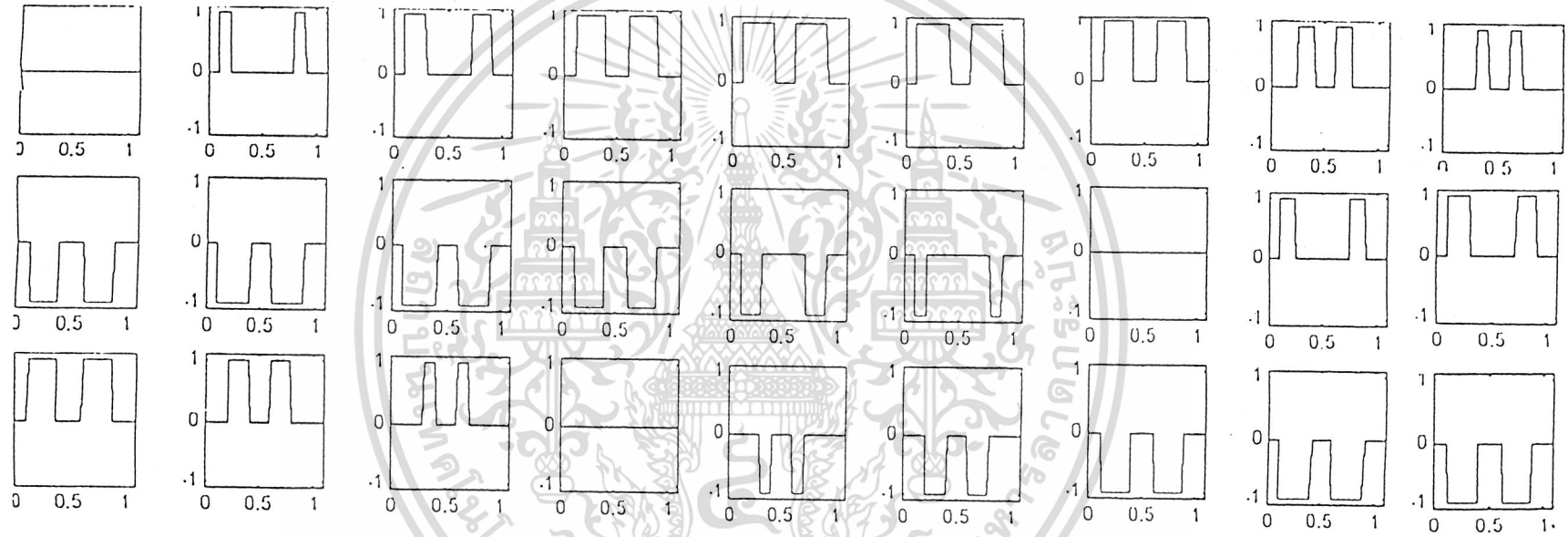
- เขียนโปรแกรม Simulation ของ Voltage space vector เพื่อนำ algorithm ที่ถูกต้องมาใช้เป็นแนวในการเขียนโปรแกรมภาษา Assembly ของ 80C196KB ต่อไป
- เขียนโปรแกรมในภาษา Assembly บนบอร์ด 80C196 KB
- ทำการตรวจสอบ สัญญาณที่ได้

##### 4.1.2 ทำการเขียนโปรแกรม Simulation ใน Matlab

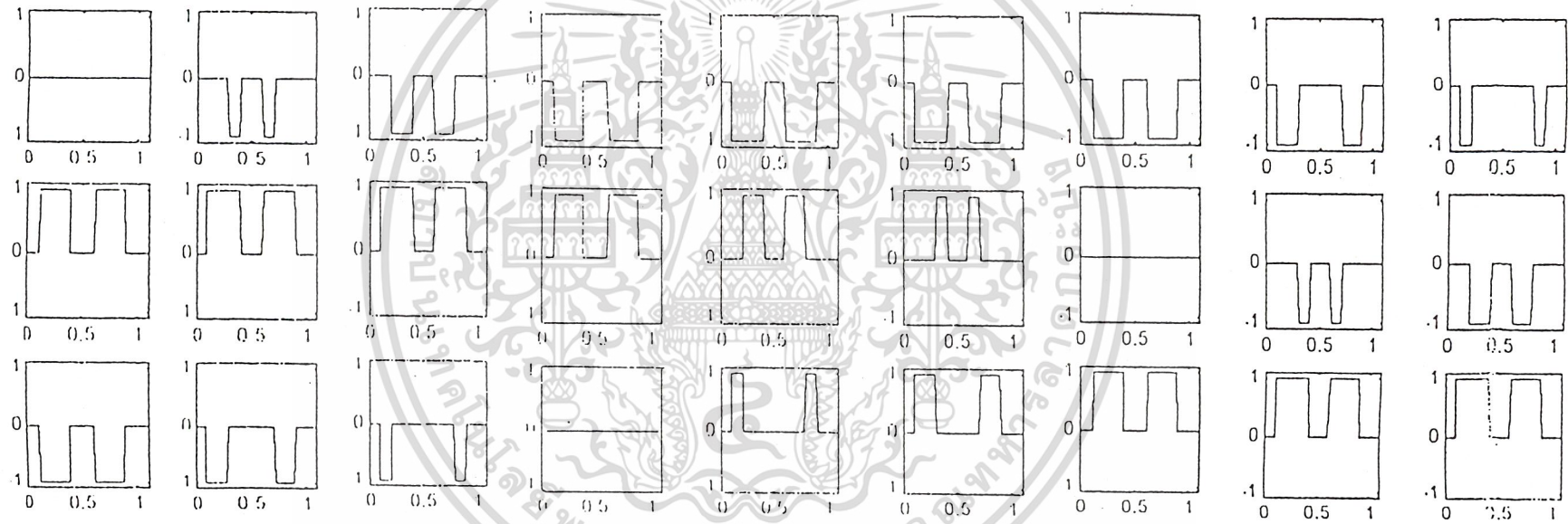
การเขียนโปรแกรม Simulation นั้นเป็นประโยชน์อย่างยิ่งเพราะจะทำให้เราสามารถตรวจสอบ แนวคิดในการทำโปรแกรมจริงว่าถูกต้องหรือไม่ โดยอาศัยภาษาระดับสูงที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจว่า มาทดสอบก่อน ซึ่งจะดีกว่าการที่ลงไปเขียนโปรแกรมภาษา Assembly เลย

#### ผลการทดลอง

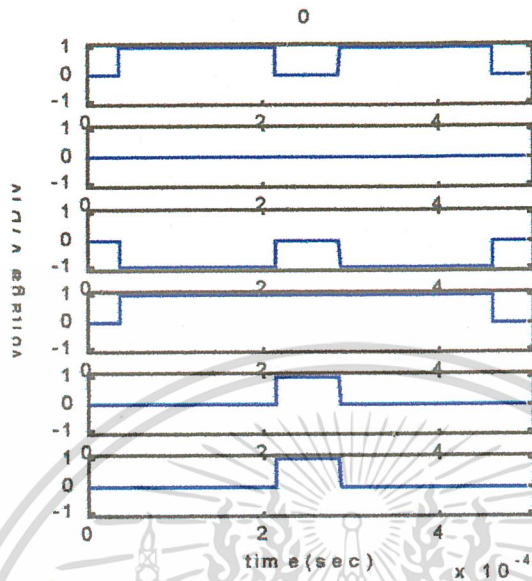
จากโปรแกรม simulation ในภาคผนวก ทำให้เราทราบว่าแนวคิดในการทำของเรานั้นถูกต้องแล้ว ซึ่งผลการทดลองโปรแกรม simulation ได้ผลดังรูป 4.1 (ก) และ 4.1 (ข) ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1(ก) แสดงสัญญาณ PWM ที่ได้จากการ Simulation



รูปที่ 4.1(ข) แสดงสัญญาณ PWM ที่ได้จากการ Simulation

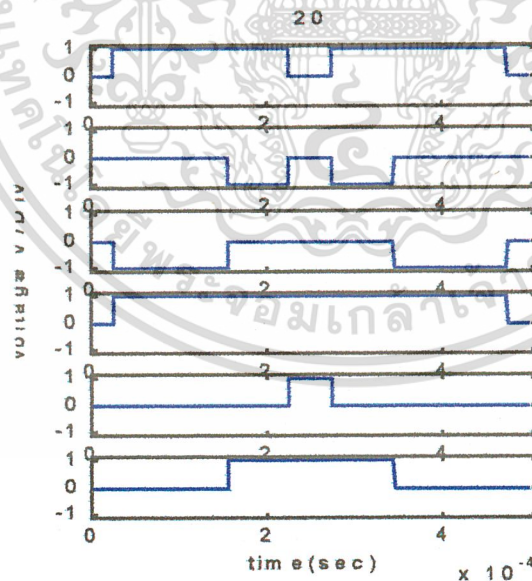


รูปที่ 4.2 แสดงรูปสัญญาณของแรงดันไลน์และแรงดันเฟส ที่มุม 0 องศา

โดยมี  $T_{0/4}=36 \text{ usec}$

$T_{x/2}=177 \text{ usec}$

$T_{y/2}=0 \text{ usec}$



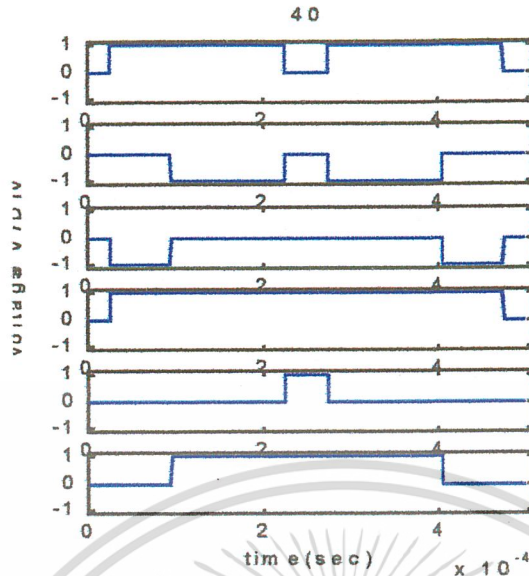
รูปที่ 4.3 แสดงรูปสัญญาณของแรงดันไลน์และแรงดันเฟส ที่มุม 30 องศา

โดยมี  $T_{0/4}=24 \text{ usec}$

$T_{x/2}=132 \text{ usec}$

$T_{y/2}=70 \text{ usec}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

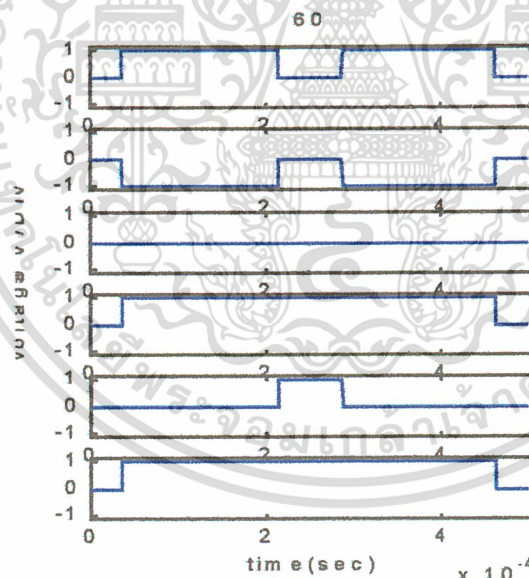


รูปที่ 4.4 แสดงรูปสัญญาณของแรงดันไลน์และแรงดันเฟส ที่มุม 0 องศา

โดยมี  $T_{0/4}=24 \text{ usec}$

$T_x/2=70 \text{ usec}$

$T_y/2=32 \text{ usec}$



รูปที่ 4.5 แสดงรูปสัญญาณของแรงดันไลน์และแรงดันเฟส ที่มุม 0 องศา

โดยมี  $T_{0/4}=36 \text{ usec}$

$T_x/2=0 \text{ usec}$

$T_y/2=177 \text{ usec}$

จากผลการ Simulate พบว่าแนวคิดดังกล่าวน่าจะถูกต้อง เนื่องจากลักษณะรูปคลื่นมีการกระจาย

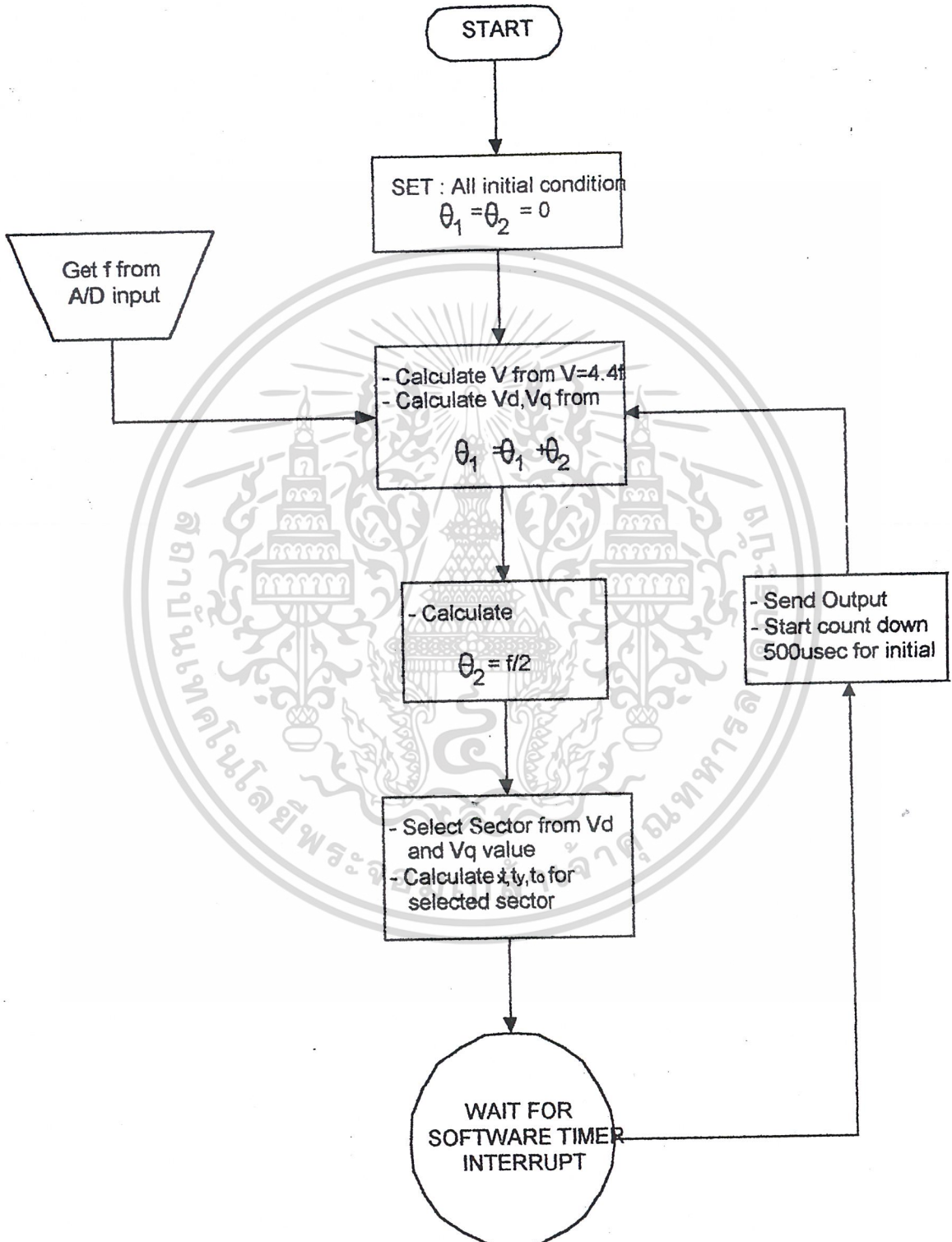
ตัวแบบชาวน้จริง จึงทำการเขียน โปรแกรมในภาษา Assembly ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.1.3 การเขียน โปรแกรมสเปซเวคเตอร์ใน 80C196KB

จากการ Simulate ดังที่กล่าวมาแล้วจึงทำการเขียน โปรแกรม Assembly ตามแนวคิดที่ได้ ทำ Simulation มาทุกประการ โดยมี Flow chart ดังนี้



รูปที่ 4.5 แสดงขั้นตอนการทำงานของ 80C196KB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเขียนโปรแกรมแล้ววิเคราะห์ผลลัพธ์พบว่าสัญญาณเอาพุท ไม่ได้เป็นสัญญาณ PWM ึ่ง เนื่องจากไม่ได้มีการกระจายตัวแบบขายน ส่วนสัญญาณเฟสนั้น มีลักษณะคล้ายที่ออกแบบไว้ แต่ ญญาณในบางเฟสยังไม่ถูกต้องจึงทำให้รูปคลื่นไลน์ที่ได้ยังไม่ถูกต้อง ดังนั้นสัญญาณที่ได้จากไมโคร อนโทรลเลอร์จึงมีแต่เพียง square wave inverter mode เท่านั้น ส่วนแบบเวคเตอร์แรงดันจำเป็นต้องมี ารพัฒนาต่อไป

#### 4.1.3 การเขียนโปรแกรมในโหมด square wave inverter

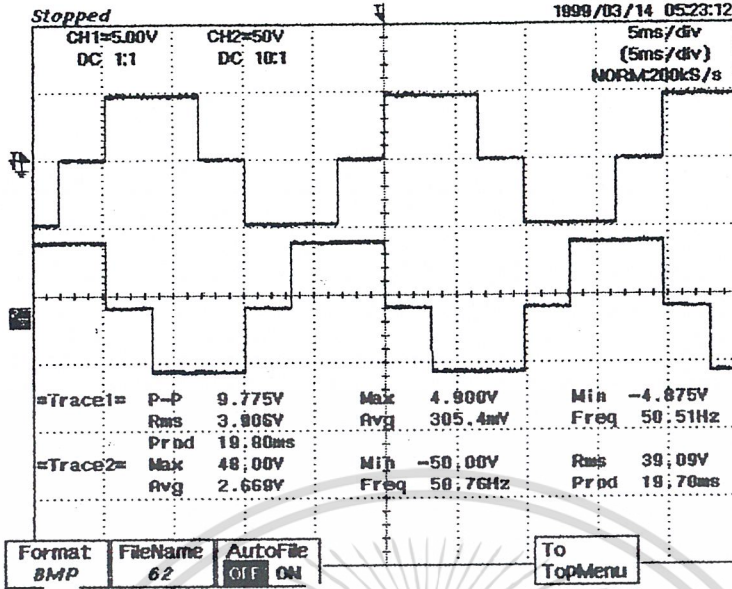
##### ขั้นตอนการทำงาน

- สร้างรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีเฟสต่างกัน 120 องศา 3 ชุด
- ตรวจสอบสัญญาณ ไลน์ว่าถูกต้องหรือไม่
- ตรวจสอบฮาร์มอนิกของแรงดัน ว่าเป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่

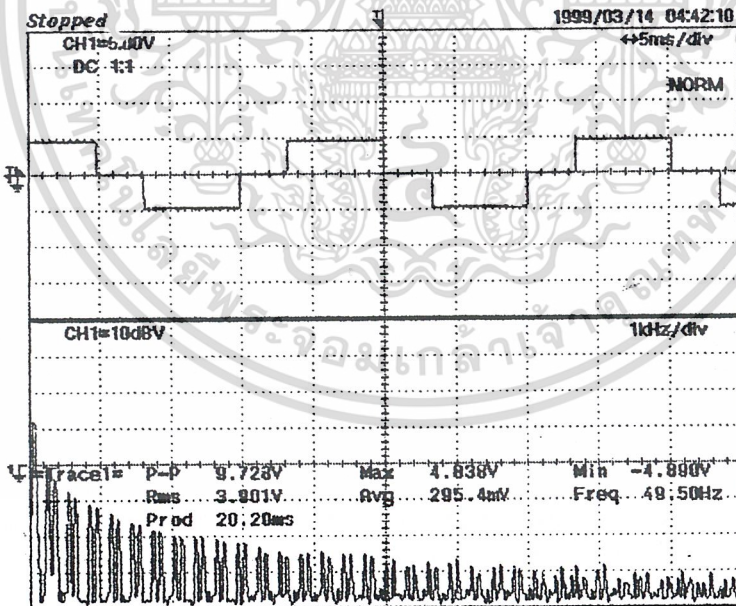
##### ผลการทดลอง

จากรูปที่ 4.6 แสดงรูปสัญญาณ ไลน์ที่มีเฟสต่างกันอยู่ 120 องศา เนื่องจากเป็นสัญญาณที่ความถี่ 50 เฮิร์ต ดังนั้นเฟสต่างต้องเท่ากับ 6.6 ms และต้องมีค่า RMS ของแรงดันระหว่างไลน์ประมาณ 0.78 เท่าของ แรงดันสูงสุดด้วย ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.78 \times 5 = 3.9 \text{ V}$  ซึ่งก็มีค่าเท่ากับผลที่วัดได้จาก Oscilloscope จริง ส่วนฮาร์มอนิกนั้นก็ต้องประกอบด้วย ความถี่ Fundamental และ ฮาร์มอนิกลำดับที่  $6n+/-1$  ซึ่งหากแรงดันที่ได้มีฮาร์มอนิกตรงกับทฤษฎี ก็เท่ากับคุณสมบัติของสัญญาณมีความถูก ต้องมากซึ่งจากผลการทดลองก็สอดคล้องตามทฤษฎีอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในรูป 4.7 - 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

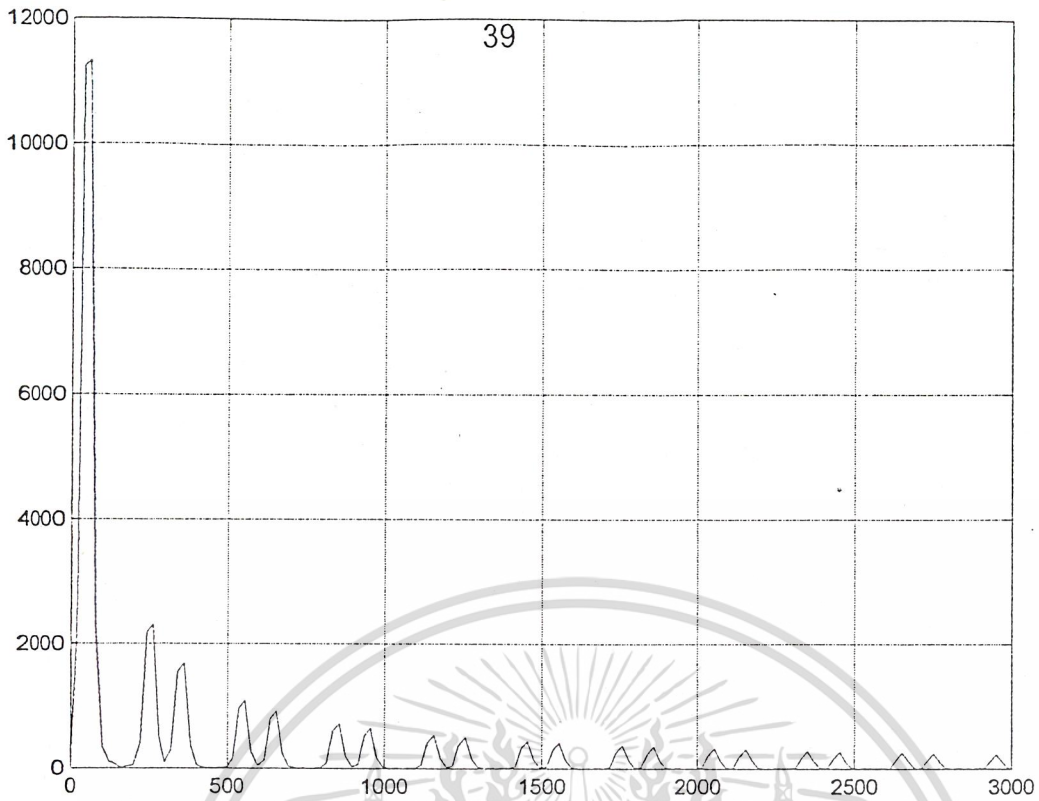


รูปที่ 4.6 แสดงสัญญาณแรงดันระหว่างไลน์ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์มีเฟสต่างกัน 120 องศา

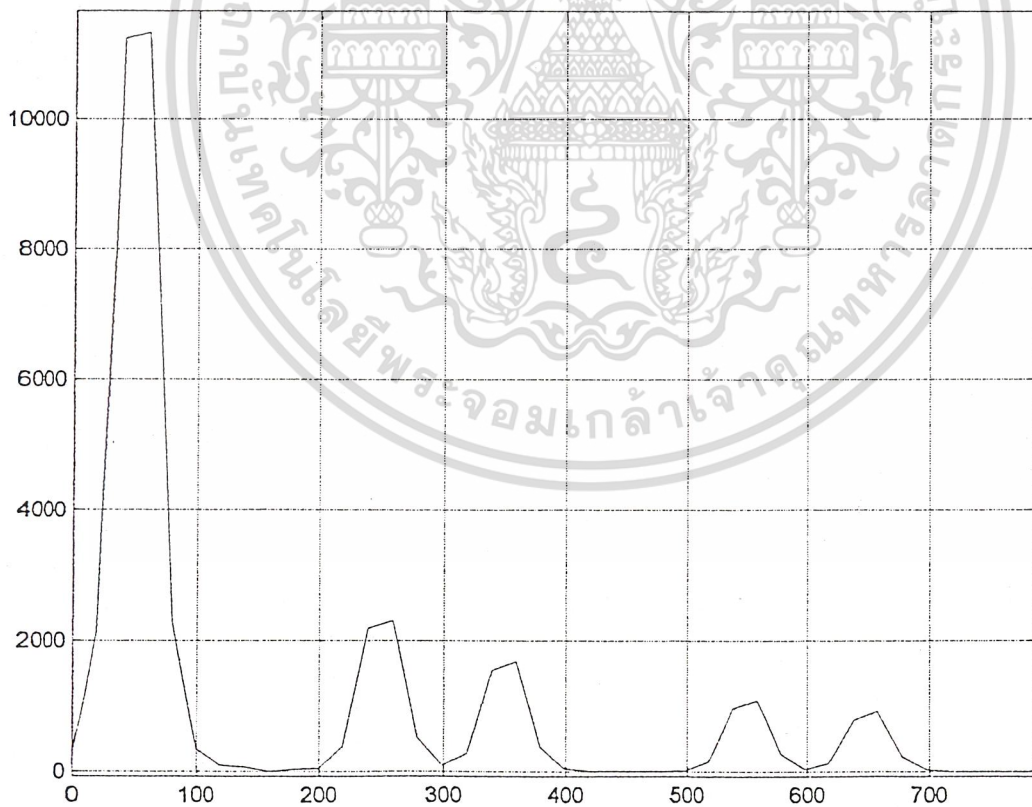


รูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณแรงดันระหว่างไลน์ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์มีเฟสต่างกัน 120 องศา และ FFT

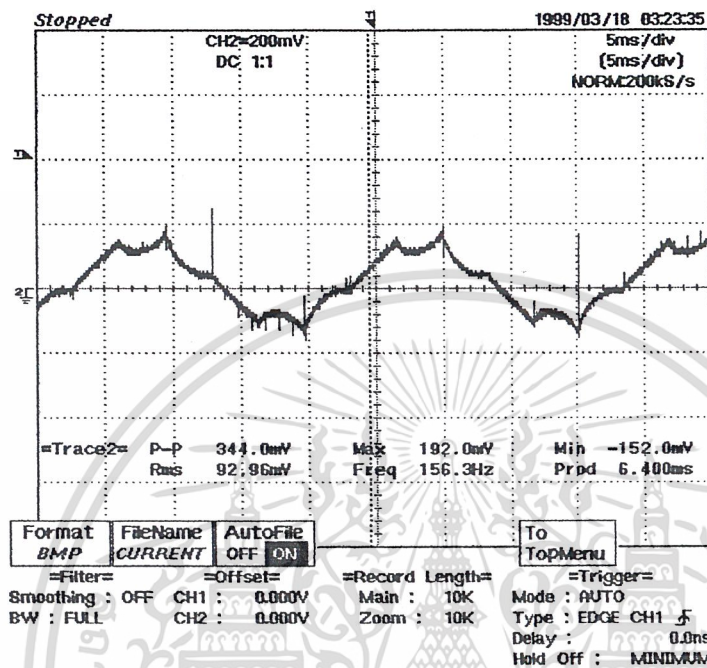
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดง FFT ของสัญญาณ Square wave inverter ที่ความถี่ 50 เฮิร์ต โดยอาศัยโปรแกรม Matlab

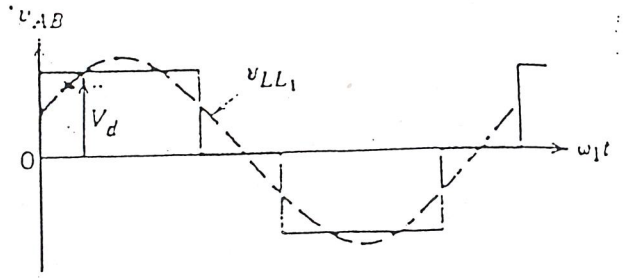
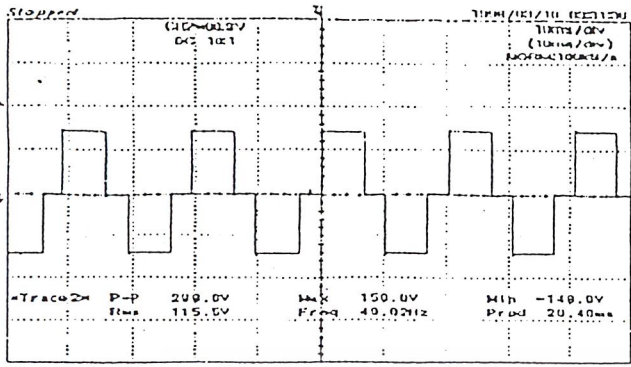


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สามารถนำไปสำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 4.9 แสดง FFT จากรูปที่ 4.8 พิจารณาถึงความถี่ 700 เฮิร์ต  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

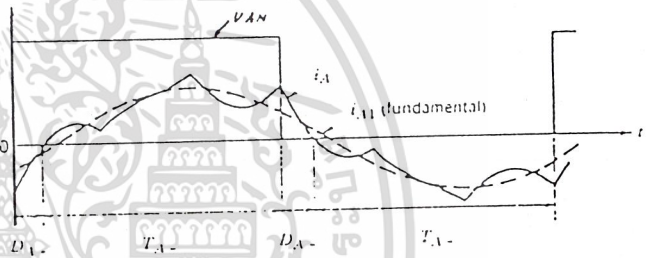
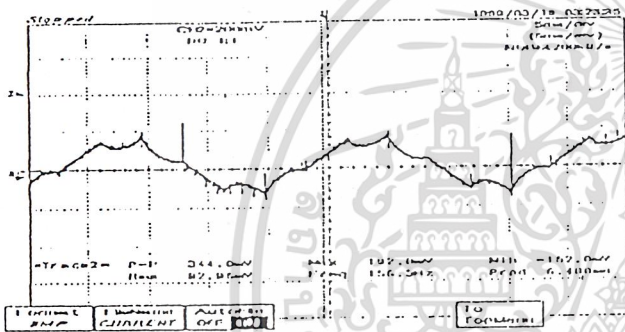


รูปที่ 4.10 แสดงกราฟกระแสโล้นที่ป้อนเข้ามอเตอร์ที่ความถี่ 50 เฮิร์ต

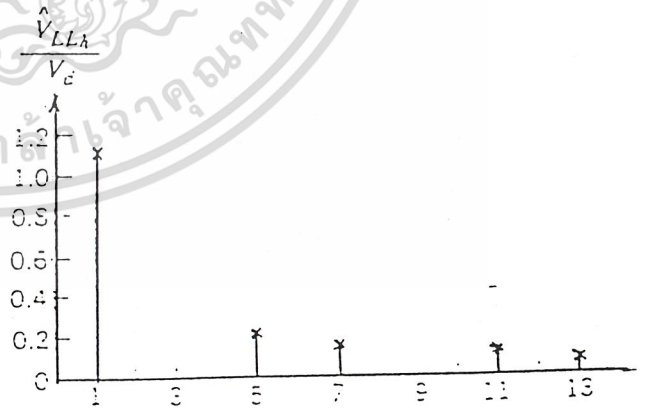
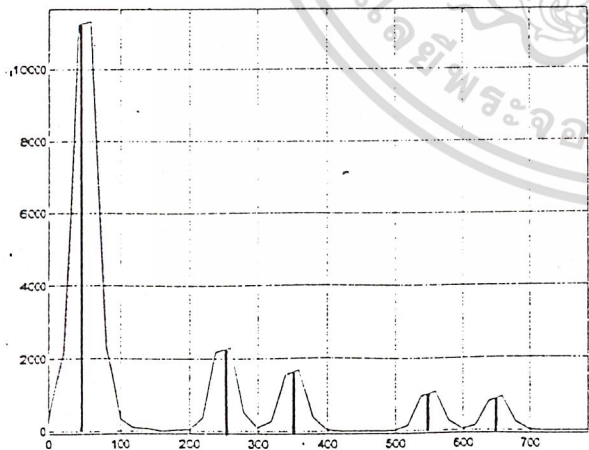
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11(ก) แสดงแรงดันโวลต์ที่ป้อนเข้ามอเตอร์เทียบกับผลทางทฤษฎี



รูปที่ 4.11(ข) แสดงกระแสโวลต์ที่ป้อนเข้ามอเตอร์เทียบกับผลทางทฤษฎี



รูปที่ 4.11(ค) แสดงอันคัมฮาร์โมนิคของแรงดันโวลต์เทียบกับผลทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 5.1 ขั้นตอนการทดลอง

- ทำการต่อวงจรจับเกทของไอจีบีทีตามรูปที่ 3.6 และทำการวัดสัญญาณที่จุดต่างๆ ของวงจร
- ทำการต่อวงจรจับเกทเข้ากับไอจีบีที และทำการป้อนอินพุทที่มีความถี่ต่างกัน แล้ววัดสัญญาณ ( $V_{CE}$ ) ของ ไอจีบีที
- ทำการต่อวงจรป้องกันการทำงานพร้อมกันของ ไอจีบีที แล้วทำการวัดสัญญาณเอาต์พุทที่ได้ว่ามีค่า dead time เท่ากับเท่าไร แล้วทำการเปลี่ยนค่าความถี่ของคริสตัล เพื่อหาค่า dead time ที่เหมาะสม
- นำสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ผ่านวงจรสร้างคลื่นสี่เหลี่ยม ผ่านวงจรจับเกท เพื่อนำไปขับ ไอจีบีที ที่วงจรกำลัง แล้วทำการวัดผลที่ได้

#### 5.2 ผลการทดลอง

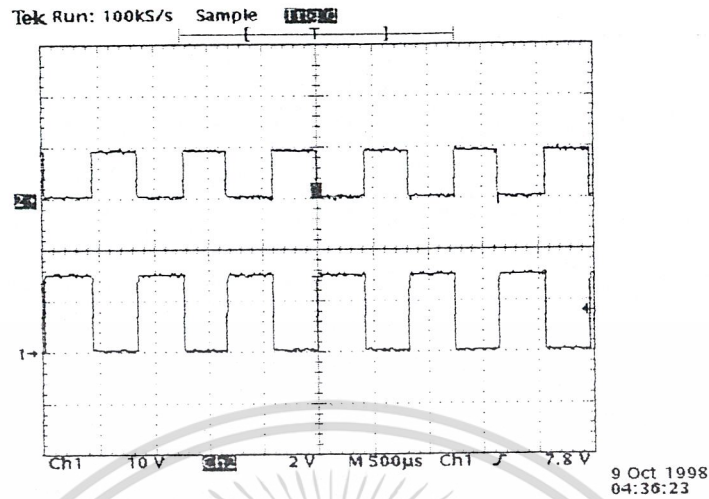
##### 5.2.1 วงจรจับเกทของไอจีบีที

หลังจากทำการต่อวงจรและป้อนไฟเลี้ยงเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ทำการวัดค่าสัญญาณที่จุดต่าง ๆ ของวงจรดังนี้

ก) เปรียบเทียบสัญญาณอินพุทจาก PWM และสัญญาณที่ออกจาก Opto Coupler

โดยสัญญาณ PWM ในที่นี้สมมติโดยใช้สัญญาณ จาก ไอซี เบอร์ 555 แทน โดยสัญญาณที่ใช้ เป็นพัลส์ที่มีความถี่ประมาณ 1.2 kHz ตามทฤษฎีนั้น ค่าสัญญาณที่ได้จาก Opto Coupler จะมีค่าสัญญาณที่กลับเฟสกัน และเนื่องจาก Opto Coupler เบอร์ 6N136 นี้มีลักษณะเป็น ไอเฟ่นคอลเลคเตอร์ และได้ทำการต่อเข้ากับไฟ +15 V ดังนั้นสัญญาณที่ได้ควรจะมิลักษณะเป็น พัลส์ที่กลับเฟสกับอินพุท และมีความสูงเป็น +15 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



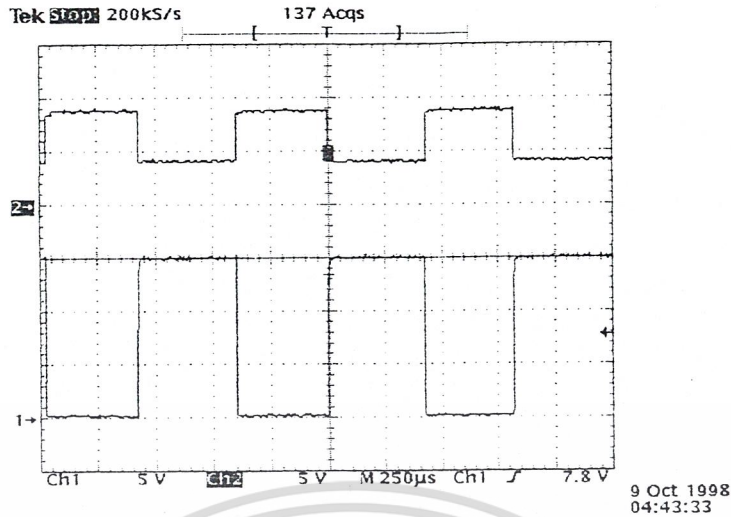
รูปที่ 5.1 แสดงกราฟเปรียบเทียบสัญญาณ PWM และสัญญาณ Opto Coupler

จากกราฟที่ได้จาก ออสซิโลสโคป CH<sub>2</sub> จะเป็นสัญญาณ PWM และมีค่า Volt/div = 2V ส่วน CH<sub>1</sub> จะเป็นสัญญาณที่ออกจาก Opto Coupler และมีค่า Volt/div = 10V ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าสัญญาณมีค่าตรงกับที่ต้องการ โดยสัญญาณที่ได้นี้จะป้อนเข้าสู่ LM311 เพื่อทำการเปรียบเทียบต่อไป

#### ข) เปรียบเทียบสัญญาณเข้าและออก LM311

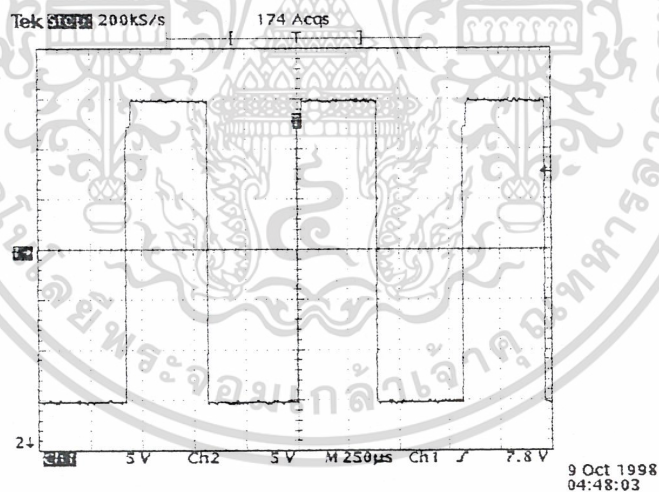
สัญญาณเข้า LM311 ที่ขาลบ จะได้จาก Opto Coupler ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์สูง 15V และที่ขา บวกจะได้จาก การแบ่งแรงดันโดยใช้ ตัวต้านทาน 2KΩ จำนวน 2 ตัว ดังนั้นจะได้แรงดันไฟตรง 7.5 V ที่ขาบวก โดยที่ขาไฟเลี้ยงของ LM 311 จะต่อไฟเลี้ยง +15V , -15V ตามรูป โดยหลักการทำงานจะได้ว่า ในช่วงเวลาที่สัญญาณที่ขาลบ มีค่ามากกว่าขาบวก จะได้สัญญาณเอาต์พุตเป็น -15V ส่วนในช่วงเวลาที่สัญญาณขาบวก มีค่ามากกว่าขาลบ จะได้สัญญาณเอาต์พุตเป็น +15V เพราะฉะนั้นสัญญาณที่ได้จึงควรมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ที่มีค่า +15V และ -15V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 แสดงกราฟสัญญาณเข้า LM311

จะเห็นได้ว่าที่ CH<sub>2</sub> ซึ่งแสดงสัญญาณที่ขาบวกนั้น ไม่เป็นแรงดันไฟตรง 7.5 V ทั้งนี้เนื่องจากมีตัวต้านทาน  $5K\Omega$  ค่อยู่ จึงมีหน้าที่เสมือนเป็นตัว feedback สัญญาณกลับมา ซึ่งถ้าถอดตัวต้านทานนี้ ออก แล้วทำการวัดสัญญาณ ก็จะได้ค่าแรงดันไฟตรง 7.5 V

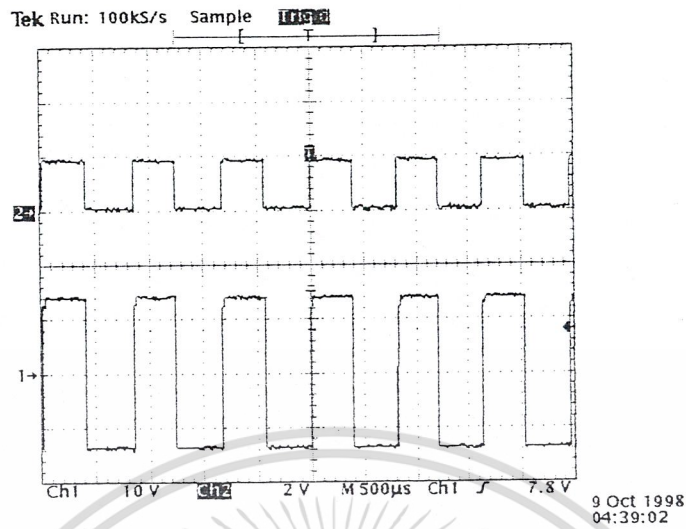


รูปที่ 5.3 แสดงกราฟสัญญาณที่ขาออก LM311

ค) เปรียบเทียบสัญญาณเข้า Opto Coupler กับสัญญาณออกวงจรจับเกท

เนื่องจาก สัญญาณที่ได้จาก Opto Coupler จะมีลักษณะกลับเฟสกับสัญญาณอินพุท แต่หลังจากเปรียบเทียบกับ LM311 จะได้รูปคลื่นสี่เหลี่ยม ที่มีเฟสเดียวกับสัญญาณอินพุท ดังนั้นจึงสามารถนำสัญญาณที่ได้จากวงจรจับเกทนี้ไปขับ ไอจีบีที ได้เลย โดยไม่ต้องมีการกลับสัญญาณอีก

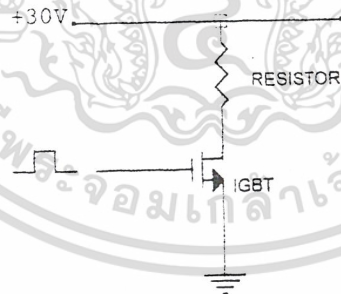
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แสดงกราฟสัญญาณเข้าและออกวงจรขับเกท

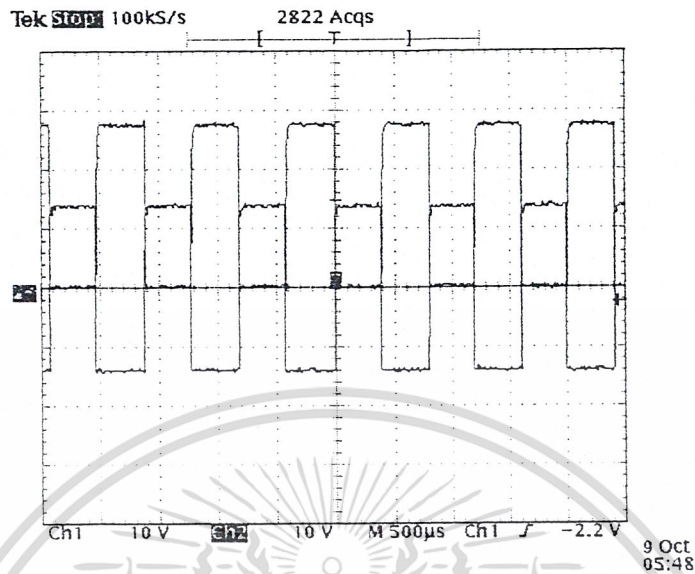
### 5.2.2 ไอจีบีที

ทำการต่อวงจรขับเกทเข้ากับขาเกท และขาอิมิตเตอร์ของไอจีบีที โดยที่ขาคอลเลกเตอร์ของไอจีบีที ต่อเข้ากับคิซิ่งลิ่งค์ โดยในที่นี้สมมติให้ใช้คิซิ่งลิ่งค์ คือ ไฟกระแสตรง 30V พร้อมทั้งมีการต่อตัวต้านทานเพื่อคิงกระแส ดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงการต่อวงจรเพื่อทดสอบไอจีบีที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 แสดงสัญญาณทริกไอจีบีทีที่เทียบกับสัญญาณเอาต์พุตของไอจีบีที

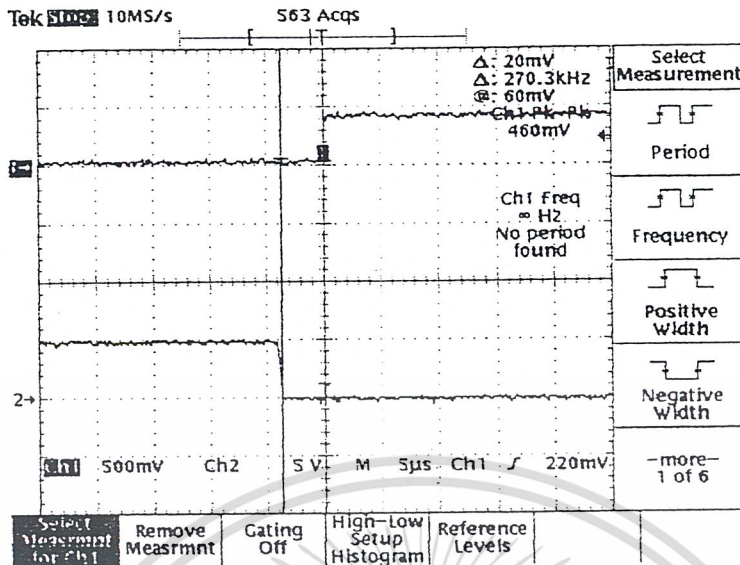
จากผลการทดลองของรูปที่ 5.6 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีสัญญาณทริกจากวงจรขับเคลื่อน จะทำให้ ไอจีบีทีอยู่ในสถานะนำกระแส ค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานจึงเท่ากับศูนย์ ในขณะที่เมื่อมีสัญญาณ OFF จากวงจรขับเคลื่อน จะทำให้ ไอจีบีทีอยู่ในสถานะหยุดนำกระแส ค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน จึงมีค่าเท่ากับค่า DC LINK คือประมาณ 30 โวลท์

### 5.2.3 วงจรป้องกันการทำงานพร้อมกันของไอจีบีที

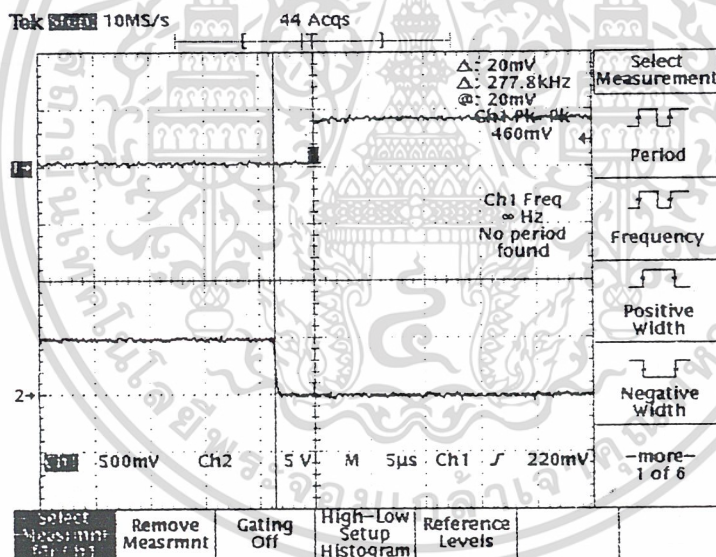
หลังจากต่อวงจรตามรูปแล้ว ทำการวัดสัญญาณ จะได้สัญญาณ 2 ค่า ที่มีค่า dead time อยู่ค่าหนึ่ง โดยค่า dead time นี้ จะขึ้นอยู่กับ ค่าความถี่ของคริสตัลที่เอามาใช้เป็น Clock รวมไปถึงขาเอาต์พุตของไอซีที่ต่อออกมาใช้ เนื่องจากไอซีเบอร์ที่ใช้นี้มีลักษณะเป็นแบบ Serial-In Parallel-Out ดังนั้น ถ้าเราเลือกใช้ขาเอาต์พุตค่ามาก จะมีการเลื่อนของสัญญาณมากกว่าขาเอาต์พุตค่าน้อย

ก) เปรียบเทียบค่าสัญญาณ โดยใช้คริสตัล 1.842 MHz โดยเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต ที่มีความถี่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 แสดงสัญญาณ Q และ  $\bar{Q}$  เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าความถี่ 1 KHz

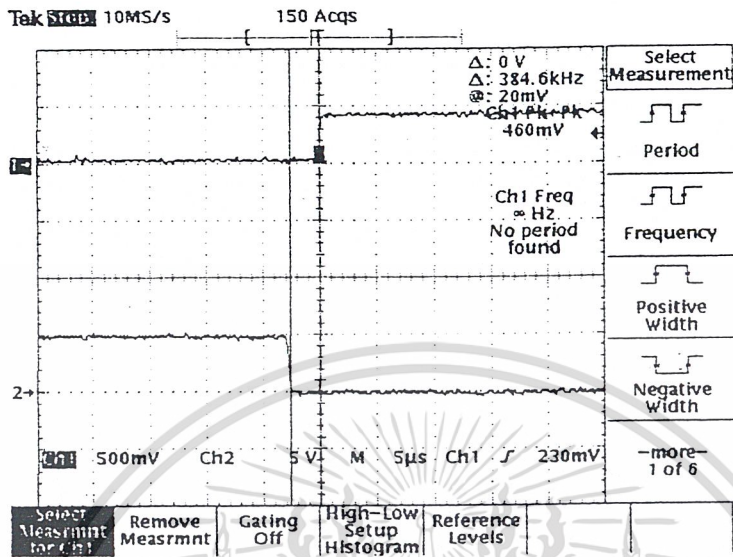


รูปที่ 5.8 แสดงสัญญาณ Q และ  $\bar{Q}$  เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าความถี่ 50 Hz

จากรูปที่ 5.7 จะเห็นว่าสัญญาณ Q และ  $\bar{Q}$  มีความเหลื่อมล้ำกัน 270 KHz ซึ่งหมายถึงมีค่า Dead time เกิดขึ้นระหว่างสัญญาณทั้งสองประมาณ 3.7  $\mu$ sec และจากรูปที่ 5.8 จะเห็นว่าสัญญาณ Q และ  $\bar{Q}$  มีความเหลื่อมล้ำกัน 277 KHz ซึ่งหมายถึงมีค่า Dead time เกิดขึ้นระหว่างสัญญาณทั้งสองประมาณ 3.6  $\mu$ sec เพราะฉะนั้นค่า Dead time ของสัญญาณทั้งสองจะคงที่ ถึงแม้ว่าค่าความถี่ของสัญญาณอินพุตเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) เปรียบเทียบสัญญาณ โดยเพิ่มค่าความถี่ของคริสตอลเป็น 2.45 MHz



รูปที่ 5.9 แสดงสัญญาณ Q และ  $\bar{Q}$  เมื่อค่าความถี่ของคริสตอลเป็น 2.45 KHz

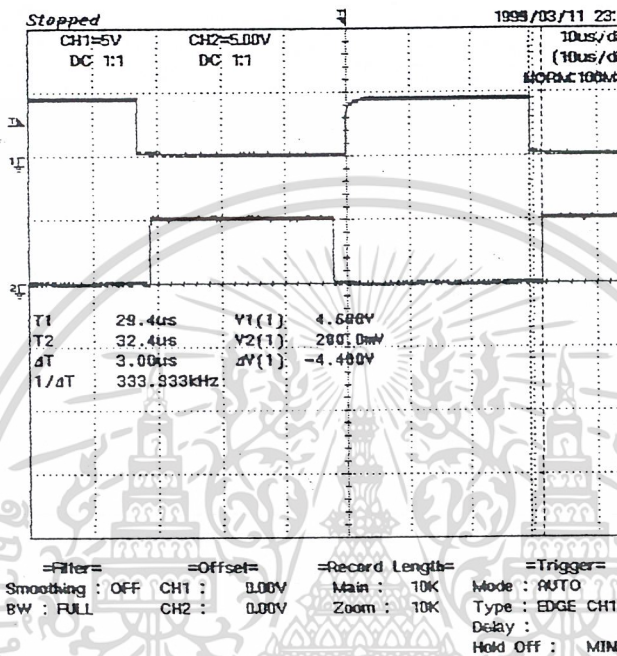
การทดลองนี้ ได้คงค่าความถี่ของสัญญาณอินพุตที่ 1 KHz และเปลี่ยนความถี่คริสตอลเป็น 2.45 KHz จะเห็นว่ามีความเหลื่อมล้ำกันของสัญญาณเกิดขึ้นประมาณ 384 KHz ซึ่งหมายถึงมีค่า Dead time เกิดขึ้น 2.6  $\mu$ sec

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ค่า Dead time จะเปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ของคริสตอล โดยถ้าเพิ่มค่าความถี่ของคริสตอล จะได้ค่า Dead time ที่มีค่าลดลง ในทางกลับกัน ถ้าลดค่าความถี่ของคริสตอล ก็จะได้ค่า Dead time ที่มากขึ้น จากการทดลองเมื่อใช้ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (function generator) สร้างความถี่แทนคริสตอลเพื่อหาค่าความถี่ที่เหมาะสมจะได้ผลดังนี้

ความถี่ของคริสตอล (MHz)	ค่า Dead time ( $\mu$ sec)
2.2	3.0
1.8	4.0
1.3	6.0
0.9	7.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.10 จะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณา สัญญาณ Q1 และ Q2 จะเห็นว่า มีการหน่วงเวลาทั้งในขอบขาขึ้นและขอบขาลง ทำให้ไอจีบีทีใน branch เดียวกันนั้น ไม่มีโอกาสนำกระแสพร้อมกัน ทำให้ไม่เกิดสถานะลัดวงจรระหว่างสายขึ้น



รูปที่ 5.10 แสดงสัญญาณ Q1 และ Q2 ที่มีค่า dead time เกิดขึ้น

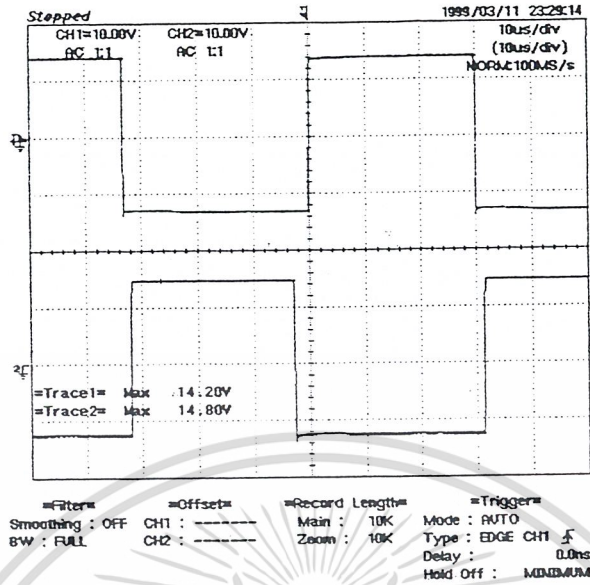
#### 5.2.4 ส่วนวงจรขับด้วยไอจีบีที

เมื่อทำการทดลองในส่วนวงจรต่าง ๆ โดยได้ผลตรงตามที่ต้องการแล้ว ทำการต่อวงจรต่าง ๆ เข้าด้วยกัน โดยนำสัญญาณที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ผ่านไปยัง วงจรสร้างเดคโทม์ แล้วผ่านไปยัง วงจรขับเกท แล้วผ่านไปยังวงจรถักที่ต่อไอจีบีที 2 ตัวใน Branch เดียวกัน โดยในกรณีนี้จะเพิ่ม DC LINK ขึ้นเป็นประมาณ 90 โวลต์ แล้วทำการทดสอบผล

##### ก) ที่วงจรขับเกท

ทำการวัดสัญญาณเอาต์พุทของวงจรขับเกทที่จะนำไปขับ ไอจีบีที 2 ตัวที่อยู่ใน branch เดียวกัน พบว่า สัญญาณทั้งสองมีค่าเดคโทม์ตามที่ต้องการ ซึ่งสามารถนำไปขับ ไอจีบีที ได้โดยปลอดภัย เนื่องจาก ไอจีบีที จะ ไม่มีโอกาสเกิดสถานะนำกระแสในเวลาเดียวกัน

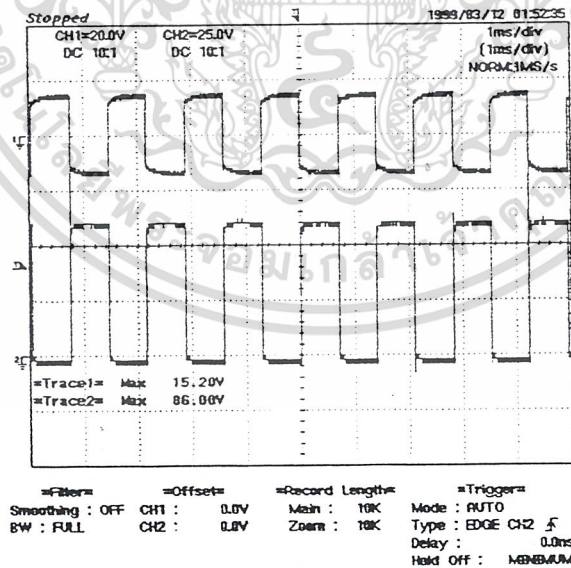
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 แสดงถึงสัญญาณขับเกท ของ ไอจีบีทีที่อยู่ใน branch เดียวกัน

ข) ที่ ไอจีบีที

ทำการจ่ายสัญญาณขับเกทให้กับ ไอจีบีทีทั้งสองใน branch เดียวกัน แล้วทำการวัดผล พบว่า ไม่เกิดการลัดวงจร เพราะสามารถวัดค่าแรงดันคร่อมตัว ไอจีบีทีได้ และ ไอจีบีทีสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 5.12

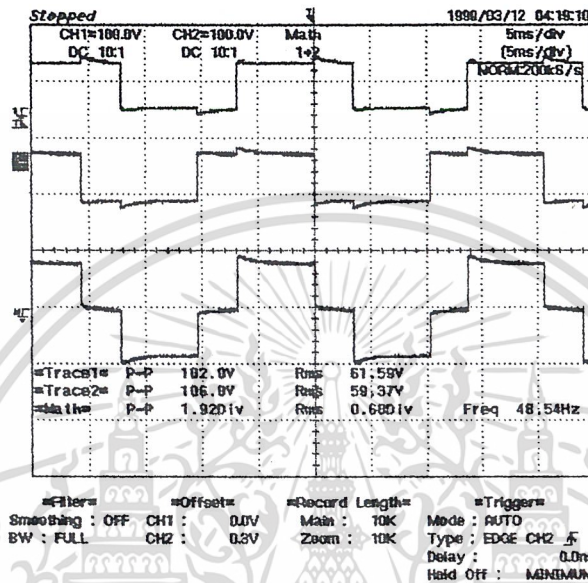


รูปที่ 5.12 แสดงถึงสัญญาณขับเกท และแรงดันคร่อม ไอจีบีทีตัวล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.5 ทำการป้อนสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ เข้าวงจรจับด้วยไอจีบีทีครบทุกชุด

ในกรณีนี้จะทำการป้อนสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ Quasi-Square แล้วทำการวัดสัญญาณแรงดันระหว่างไลน์ เพื่อคว่าสัญญาณเป็นไปตามต้องการ และมีรูปแบบที่เหมาะสม พร้อมทั้งจะนำไปจับมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือไม่ ดังแสดงในรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 แสดงสัญญาณแรงดันระหว่างไลน์ โดยป้อนโปรแกรม Quasi-Square

จากรูป 5.13 สัญญาณ 2 สัญญาณบน เป็นค่าแรงดันคร่อม ไอจีบีทีในคนละbranch โดยสัญญาณล่างแสดงถึงแรงดันระหว่างไลน์ซึ่งอยู่ในรูปแบบ Quasi-Square ตามที่ต้องการ และมีค่า  $V_p$  เท่ากับค่าแรงดัน DC LINK ที่ป้อนให้ ซึ่งรูปแบบแรงดันนี้สามารถนำไปจับมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ และได้ทำการบันทึกผลความเร็วรอบ, ความถี่และกระแสในขณะภาวะโหลดต่างๆ ได้ดังตารางในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบ, ความถี่และกระแสในขณะภาวะโหลดต่างๆ**

แรงดัน (Volt)	ความถี่ (Hz)	ความเร็วรอบ ขณะไม่มีโหลด (RPM)	กระแสในขณะภาวะ (Amp)		
			ไม่มี โหลด	โหลด 1/2 Kg	โหลด 1 Kg
220	25	510	1.20	1.20	1.25
220	30	605	0.90	0.90	1.90
220	33	656	0.90	0.95	1.00
220	50	1001	0.50	0.55	0.60
220	60	1198	0.45	0.50	0.60
220	70	1395	0.40	0.50	0.60
220	80	1597	0.40	0.55	0.80
220	90	1797	0.35	0.70	1.60
220	100	2030	0.30	1.20	1.20

รูปที่ 5.11 ตารางผลการทดลองแสดงความเร็วรอบ, ความถี่และกระแสในขณะภาวะ โหลดต่างๆ

**สรุปผลการทดลอง** จากการทดลองพบว่าในขณะที่ทำการใส่โหลดในช่วงแรงบิดคงที่(ในช่วงการปรับความถี่ต่ำกว่า 50 Hz) ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะไม่ตกลงมากนัก แต่ในขณะที่ทำการใส่โหลดในช่วงกำลังคงที่(ในช่วงการปรับความถี่สูงกว่า 50 Hz) ความเร็วของมอเตอร์จะตกลงอย่างมาก เนื่องจากแรงบิดในช่วงนี้จะมีค่าตกลงจากช่วงที่แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

## บทสรุปและแนวทางการพัฒนา

บทสรุป

สิ่งที่กล่าวถึงการทดลองในส่วนต่าง ๆ มาแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่า โครงการนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนฮาร์ดแวร์ (Hardware) และส่วนซอฟต์แวร์ (Software) ดังนั้น จึงขอแยกพิจารณาเป็น ส่วนดังกล่าว

## 6.1 ส่วนฮาร์ดแวร์

ประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสขาเข้า, วงจรสร้างเวลาเคค ไทม์, วงจรจับเกท ไอจีบีที, วงจรกำลังขาออก

6.1.1 วงจรเรียงกระแสขาเข้า จากการวัดค่าสัญญาณที่ได้ เป็นไปตามที่ต้องการ และไม่มี ความผิดพลาด เนื่องจากเป็นวงจรที่ไม่ซับซ้อน และมีรูปแบบการต่อวงจรที่ตายตัว

ปัญหาที่เกิดขึ้น ได้แก่ เวลาทดสอบวงจรขณะไรโพลด จะเกิดประจุค้างที่ตัวเก็บ ประจุและใช้เวลานานมากในการคายประจุ เนื่องจากได้ใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความเก็บประจุค่อนข้างสูง เคยแก้ไขด้วยการต่อตัวต้านทานขนานเข้าไปในวงจร โดยคำนวณค่าพิกัดกำลังให้เหมาะสม ก็ยังไม่ช่วย ขึ้นมาเท่าไร ซึ่งถ้าใช้ตัวต้านทานที่มีค่าสูงมากจนเกินไปก็อาจเป็นค่าความสูญเสีย (Loss) ในวงจรได้

6.1.2 วงจรสร้างเวลาเคค ไทม์ ค่าสัญญาณที่ได้ เป็นไปตามที่ต้องการและมีลักษณะแน่นอน เนื่องจากใช้ Logic Gate ผลลัพธ์เป็นเพียงแค่สถานะ High และสถานะ Low จึงมีความปลอดภัยสูง กว่าวงจรสร้างเวลาเคค ไทม์แบบที่อาศัยค่า Time Constant ของ R และ C ซึ่งผลลัพธ์ไม่แน่นอน และอาจแปรผันตามอุณหภูมิได้

ปัญหาที่เกิดขึ้น มีความยุ่งยากในการสร้างสัญญาณนาฬิกาจากคริสตอล และ ตัวไอซีค่อนข้างบอบบาง และเสียหายง่าย

6.1.3 วงจรจับเกท ไอจีบีที ค่าสัญญาณที่ได้เป็นไปตามที่ต้องการและมีลักษณะที่แน่นอน เนื่องจากมีการใช้ตัวเปรียบเทียบ (Comparator) ทำให้ค่าสัญญาณที่ได้มีความสูงเท่ากับค่าไฟเลี้ยงที่ต่อ วงจรอาจมีขนาดใหญ่กว่าการใช้ไอซีสำเร็จรูป และต้องสร้างวงจรจ่ายไฟเลี้ยงถึง 4 ชุด แต่สัญญาณที่ได้สามารถนำไปจับ ไอจีบีทีได้อย่างมีประสิทธิภาพ และวงจรเสียหายไ้ยากกว่า

ปัญหาที่เกิดขึ้น เนื่องจากสัญญาณที่ผ่านเข้ามาจะต้องผ่านออปโต ไอโซเลเตอร์เพื่อ แยกกราวด์ก่อน โดยปัญหาส่วนใหญ่จะเกิดที่ตัวออปโต ไอโซเลเตอร์ เนื่องจากมีความ Sensitive มาก ถึงแม้ว่าจะได้มีการต่อ ตัวต้านทานจำกัดกระแสขาเข้าไว้ ก็ไม่เกิดผลที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.4 วงจรกำลังขาออก ประกอบด้วยไอจีบีทีต่อกันเป็นคู่ ๆ จำนวน 3 Branch สัญญาณที่ได้เป็นไปตามสัญญาณทริกจากวงจรจับเกท และได้แรงดันคคคร่อมไอจีบีที เป็นไปตามค่าแรงดัน DC LINK ที่ป้อนให้

ปัญหาที่เกิดขึ้น เมื่อทำการป้อนสัญญาณเข้าพร้อมกันทั้งสามชุด ได้ผลที่ไม่แน่นอนขึ้น เพราะเกิดการล้ควงจรขึ้น ที่ไอจีบีทีคู่ใดคู่หนึ่ง ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจาก สัญญาณทริกได้เหนี่ยวนำไอจีบีทีตัวอื่นให้เกิดสภาวะนำกระแสตามไปด้วย จึงเกิดการล้ควงจรขึ้น หรืออาจมีสาเหตุจากค้วงจรมีความไม่สมบรูณ์ ซึ่งต้องวิเคราะห์ห้กันให้แน่นอนต่อไป

## 6.2 ส่วนซอฟต์แวร์

สำหรับในส่วนซอฟต์แวร์และการควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น ในช่วงแรก ๆ ต้องใช้เวลาส่วนใหญ่ในการศึกษาและค้นคว้า เนื่องจากเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์แบบใหม่ที่ไม่เคยศึกษามาก่อน

หลักจากนั้นได้มีการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์โดยการออกแบบให้สร้างสัญญาณควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งในช่วงกำลังคงที่ และ ช่วงแรงบิคคงที่

6.2.1 ในช่วงกำลังคงที่ ได้ออกแบบสัญญาณเป็นแบบคลื่นสี่เหลี่ยม 3 เฟส ที่สัญญาณห่างกัน 120 องศา เมื่อวัดค่าสัญญาณระหว่างไลน์ จะได้เป็นสัญญาณแบบ Quasi-Square ซึ่งสามารถนำมาใช้จับมอเตอร์ได้ เพราะตามทฤษฎีกล่าวไว้ว่า ในช่วงความเร็วรอบมากกว่าความเร็วพิกัด จะไม่สามารถนำสัญญาณ PWM มาใช้ได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องอัตราคงที่ของแรงดันและความถี่ ซึ่งในช่วงนี้ต้องใช้คลื่นสี่เหลี่ยมมาจับแทน

ผลของสัญญาณที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นไปตามที่ค้ต้องการ คือได้สัญญาณแบบ Quasi-Square ที่มีความแน่นอนสูง เพราะค่า  $V_{RMS}$  ที่ได้เป็นไปตามทฤษฎี และเมื่อนำไปวิเคราะห์ห้หาล้าค้บฮาร์โมนิค พบว่า มีผลตรงตามทฤษฎีทุกประการ จึงสามารถกล่าวได้ว่า ไม่มีปัญหาเลยสำหรับในส่วนนี้

6.2.2 ในช่วงแรงบิคคงที่ ได้ออกแบบสัญญาณ โดยการสร้าง PWM แบบ SpaceVector ซึ่งมีความยุ่งยากมาก โดยในช่วงแรกเป็นการศึกษาหลักการ พร้อมทั้งทำการ Simulation เพื่อศึกษาถึงอัลกอริทึมที่ใช้ในการสร้างโปรแกรม โดยผลในการ Simulation ออกมาตรงตามทฤษฎีทุกประการ หลังจากนั้นได้ทำการเขียนโปรแกรม Assembly ซึ่งได้ผลออกมาใกล้เคียงกับในทฤษฎีมาก แต่เมื่อนำไปวิเคราะห์ห้หาล้าค้บฮาร์โมนิค พบว่า มีความแตกต่างกันพอสมควร และสัญญาณมีความเพี้ยนจากที่ค้ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาที่เกิดขึ้น คือสัญญาณที่ได้ไม่ตรงกับที่ต้องการ และไม่สามารถนำไปใช้ขับมอเตอร์ได้ เนื่องจากจากการทดลองพบว่ามีเกิด Spike-Voltage ในทิศทางตรงกันข้ามกับช่วงเวลาของสัญญาณที่เกิดขึ้น โดยปัญหาที่เกิดขึ้นน่าจะเกิดจากความผิดพลาดในบางคำสั่งของโปรแกรม ไม่น่าจะเป็นที่อัลกอริทึม เพราะผลที่ได้จาก Simulation ตรงตามที่ต้องการทุกประการ และทางผู้จัดทำก็ได้ทำการเขียน โปรแกรม Assembly ตาม โปรแกรม Simulation ทุกอย่าง

### แนวทางในการพัฒนาต่อ

1. เมื่อแก้ปัญหาดตรงส่วน โปรแกรม Assembly ได้แล้ว ก็จะทำให้สามารถใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ในย่านความเร็วตามที่ต้องการ และมีประสิทธิภาพในการใช้งานสูงกว่าแบบอื่น
2. ทำการพัฒนาต่อในส่วนของวงจรป้องกัน เนื่องจากตอนเปิดเครื่อง จะมีสถานะของกระแสกระชากขึ้น ซึ่งอาจสร้างความเสียหายให้แก่ระบบได้
3. ทำการพัฒนาในส่วนของระบบป้อนกลับ เพื่อให้ได้ความเร็วรอบเหนี่ยวนำที่มีค่าแน่นอน ทำให้เสถียรภาพของระบบดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.  
ข้อมูลเบื้องต้นของบอร์ดคอนโทรลเลอร์  
80C196KB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

โครงสร้าง การทำงานของซีพียู และส่วนควบคุมที่สำคัญ ของ 80c196kb

- ส่วนประมวลผลกลาง ( CPU ) ประกอบด้วย รีจิสเตอร์ไฟล์ และ หน่วยเลขคณิตรีจิสเตอร์ (RALU) ทั้งนี้การติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกทำงานได้โดยตรงผ่านรีจิสเตอร์เฉพาะ (SFR) หรือผ่านชุดควบคุม หน่วยความจำ
- RALU ไม่ใช่แอดคิวิตูเลเตอร์ การคำนวณต่างๆสามารถใช้รีจิสเตอร์ไฟล์ และรีจิสเตอร์เฉพาะเป็นตัวแปรในชุดคำสั่งได้โดยตรง การที่ไม่ต้องอ้างอิงข้อมูลผ่านตัวกลาง ทำให้การเปลี่ยนแปลงแก้ไขข้อมูลทำได้ทันทีส่งผลให้ การออกแบบโปรแกรม การเขียนโปรแกรม จะง่ายขึ้น การติดต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น อุปกรณ์ต่อพ่วง ที่มีอยู่บนโปรเซสเซอร์ หรืออุปกรณ์ที่ต่อเพิ่มเติมภายนอก จะทำได้สะดวก รวดเร็ว เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของโปรแกรมโดยอัตโนมัติ
- CPU ของ 80c196kb ใช้บิตภายในขนาด 16 บิตในการติดต่อกับส่วนควบคุมหน่วยความจำ และหน่วยควบคุมอินเทอร์รัปต์ รวมถึง อุปกรณ์ภายใน โดยมีบิตขนาด 8 บิต สำหรับการอ่านข้อมูลชุดคำสั่งจากหน่วยความจำ

ส่วนควบคุมหน่วยความจำ ( Memory Controller)

- RALU จะติดต่อกับหน่วยความจำผ่านชุดควบคุมหน่วยความจำ ( RALU ติดต่อรีจิสเตอร์ไฟล์ และรีจิสเตอร์เฉพาะได้โดยตรง)
- ภายในส่วนควบคุมหน่วยความจำจะประกอบด้วย ชุดควบคุมบัส ชุดอ่านคำสั่งล่วงหน้า 4 ไบต์ (คิว) และตัวนับโปรแกรมชุดสอง (slave program counter : SPC)
- หน่วยความจำ ROM/EPROM ที่อยู่ภายใน หรือหน่วยความจำที่อยู่ภายนอก จะถูกควบคุมจากชุดควบคุมบัส การขอติดต่อกับหน่วยความจำอาจจะมาจาก RALU หรือ คิว ก็ได้ โดยที่การขอจาก คิว จะมีอันดับความสำคัญ (priority) สูงกว่า การขอติดต่อกับส่วนควบคุมหน่วยความจำจาก คิว จะอ้างอิงตำแหน่งของโปรแกรมกับ SPCเท่านั้น
- การอ่านชุดคำสั่งของซีพียู จะทำงานผ่าน SPC เท่านั้น ซึ่งโครงสร้างนี้ช่วยให้ซีพียูประหยัดเวลาและทำงานเร็วขึ้น ทั้งนี้ คิว จะอ่านคำสั่ง เข้ามาคอยไว้ล่วงหน้าก่อน 4 ไบต์ การติดต่อกันเองภายในชิป จะ รวดเร็วกว่า การติดต่อผ่านส่วนควบคุมหน่วยความจำ ที่อาจจะติดต่ออ่านข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

Interrupt Call หรือ Return ตัวนับโปรแกรมชุดสอง จะเก็บค่าตำแหน่งใหม่ ข้อมูลใน คิว จะเปลี่ยนเป็นข้อมูลล่วงหน้า จากตำแหน่งใหม่นั้น โปรแกรมจะต่อเนื้อได้ทันที

- เนื่องจากผลของคิว การตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมจึง ต้องทำความเข้าใจให้ดีว่าชุดคำสั่งนั้นทำงานจริงหรือไม่ เพราะการถูกอ่านเข้าไปเป็นการอ่านล่วงหน้า ซึ่งอาจจะไม่ได้ถูกอ่าน หากซีพียูไปทำงานเพราะผลของเงื่อนไขของคำสั่งก่อน ทำให้ คิว ต้องอ่านคำสั่งใหม่

### การควบคุมในซีพียู

- ชุด Micro Code Engine เป็นชุดที่ควบคุมการทำงานของ วรวิพียู ซึ่งสามารถจัดรูปแบบการทำงานของซีพียู เป็น 8/16 หรือ 32 บิต ได้จากพื้นที่ของ รีจิสเตอร์ฟิลด์ (000-0FFH) โปรแกรมเชอร์ มีความจำข้อมูลภายใน 512 ไบต์ พื้นที่ส่วนบน (100-1FFH) เป็นได้ทั้งความจำข้อมูล และ จัดรูปแบบเป็น รีจิสเตอร์ฟิลด์ ทำได้ด้วยวินโดว์ทางตั้ง จะทำให้ มีรีจิสเตอร์เป็นฐานในการทำงานของ ชุดคำสั่ง รวมทั้งหมด 488 ไบต์
- ชุดคำสั่งที่ซีพียูอ่านมาจาก คิว จะถูกเก็บไว้ชั่วคราวที่รีจิสเตอร์คำสั่ง หลังจากนั้นจะเป็นหน้าที่ของชุด Micro Code Engine ที่จะถอดรหัส และ สร้างขั้นตอน การทำงานที่ถูกต้องแก่ RALU

### หน่วยเลขคณิตรีจิสเตอร์ (RALU)

- การทำงานของคำสั่งงานส่วนใหญ่ จะทำงานที่ RALU หน่วยเลขคณิตด้วยรีจิสเตอร์ ประกอบด้วย หน่วยเลขคณิตขนาด 17 บิต สถานะของโปรแกรม ( Program Status Word : PSW) ตัวนับโปรแกรม (Program Counter : PC) ตัวนับรอบ (Loop Counter) และรีจิสเตอร์ชั่วคราว 3 ตัว รีจิสเตอร์ทุกตัว จะมีขนาด 16 บิต หรือ เป็น 17 บิต เมื่อมีเครื่องหมาย และ รีจิสเตอร์บางตัวยังสามารถทำงานง่าย ๆ ได้เองเป็นการลดภาระงานที่ ALU และทำให้เพิ่มประสิทธิภาพทางเวลาได้มากขึ้น
- ตัวเพิ่มค่า (Incrementor) ที่แยกออกมาต่างหากนั้น ใช้งานเฉพาะกับตัวนับโปรแกรม (PC) ที่มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่อ่านตัวแปร (Operands) แต่การเปลี่ยนแปลงข้อมูลของ PC เนื่องจากการทำงานกระโดด จะต้องผ่าน ALU เท่านั้น
- รีจิสเตอร์ชั่วคราวที่มีนั้น มี 2 ตัวที่มีระบบการเลื่อน (Shift Logic) ข้อมูลในตัวเอง ซึ่งจะใช้ในการทำงานของตัวแปรที่ต้องเลื่อนข้อมูล รวมถึง การทำงาน คูณหาร และ การปรับค่า (Normalize : MORML instruction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สำหรับ คำล่าง ( Lower word) และคำบน (Upper word) ใช้ประกอบกัน เพื่อการทำงานขนาด 32 บิต ในกรณีอื่น ใช้เป็นรีจิสเตอร์ชั่วคราวของหลายๆคำสั่ง ตัวนับรอบขนาด 6 บิต (Loop Counter) มีไว้เพื่อการใช้งานเฉพาะกับการเลื่อน ข้อมูลที่ซ้ำๆกัน
- รีจิสเตอร์ชั่วคราว ตัวที่ 3 จะใช้เป็นที่เก็บ ตัวแปรตัวที่ 2 (second operand) ของคำสั่งที่มี 2 ตัวแปรรวมถึงเป็นที่เก็บ ตัวคูณ ของการคูณ เก็บตัวหาร ระหว่างการด้วย และในการทำงาน การลบ ข้อมูลที่รีจิสเตอร์ยังสามารถ กลับเลข (complement ) ได้ก่อนที่จะเข้าส่วน B ของหน่วย เลข ค ฅ
- นอกจากนี้ยังมีค่าคงที่ ที่ต้องใช้บ่อยๆ หลาย ๆตัว เช่น 0, 1, 2 ถูกเก็บไว้ ที่หน่วยเลขคณิต เพื่อ เพิ่ม ความเร็วในการทำงาน
- การทำงานตรวจสอบบิตนั้น จะทำงานภายในรีจิสเตอร์ค่าคงที่ โดยอาศัย รีจิสเตอร์ขนาด 3 บิต เพื่อการเลือก

#### เวลาอ้างอิงภายใน ( Internal Timing )

- โปรเซสเซอร์ 80c196kb มี ON - Chip Oscillator จึงต้องการอุปกรณ์ภายนอก เพียง 3 ตัว ในการสร้าง สัญญาณเวลาอ้างอิง คือ ตัวผลิตความถี่ (Crystal) และคาแพซิเตอร์อีก 2 ตัว
- วงจรการทำงานภายในของโปรเซสเซอร์ 1 รอบ จะใช้การเปลี่ยนแปลงสัญญาณของความถี่ สัญญาณ เวลาอ้างอิง นั้น 4 ขอบ (Edge) ( ขึ้น 2 ลง 2) หรือเท่ากับ 2 คาบเวลา ซึ่งต่อไปจะ เรียกค่า 2 คาบเวลาอ้างอิง นี้ว่า 1 ช่วงนับ ( 1 State Time)
- ที่ ความถี่ 16 เมกกะเฮิร์ต 1 ช่วงนับจะมีค่า เท่ากับ 125 นาโนวินาที
- สัญญาณออก ที่ขาสัญญาณ CLKOUT เป็นสัญญาณที่ตรงกันกับช่วงนับของการทำงานภายใน ใช้เป็นตัวบ่งชี้ ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมได้

#### พื้นที่หน่วยความจำ ( MEMORY SPACE)

- หน่วยความจำมาตรฐานของ 80c196kb ใช้แอดเดรส 16 เส้น ทำให้อ้างอิงตำแหน่งข้อมูลได้ 64 กิโลไบต์ ทั้งนี้สามารถใช้งานเป็นโปรแกรม หรือเก็บข้อมูลได้เกือบทั้งหมด
- ตำแหน่งที่เป็นพื้นที่เฉพาะ คือ 0000h - 00FFh , 1FFEh - 1FFFh และ 2000h - 207Fh ตำแหน่งนอกเหนือจากนี้ สามารถใช้งานได้ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 • การจัดโครงสร้างพื้นที่ หน่วยความจำ แลดังได้ตั้งนี้  
 'ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6000H-FFFFH	พื้นที่หน่วยความจำภายนอก
2080H-5FFFFH	พื้นที่หน่วยความจำภายใน ( ROM/EPROM ) หรือ ภายนอก
205EH-207FH	พื้นที่สงวนให้ไลซ์ข้อมูล 0FFH
2040H-205DH	PTS Vector
2030H-203FH	อินเตอร์รัปต์เวกเตอร์ ส่วนบน ( Upper Interrupt Vectors )
2020H-202FH	ROM/EPROM Security key
201AH-201FH	0FFH
2019H	20H
2018H	CCB : Chip Configuration Byte สำหรับกำหนดโครงสร้างของไมโครเซตเซอร์
2014H-2017H	0FFH
2000H-2013H	อินเตอร์รัปต์เวกเตอร์ ส่วนล่าง ( Lower Interrupt Vectors )
1FFEh-1FFFH	พอร์ต 3-4
0200H-1FFDH	หน่วยความจำภายนอก
0100H-01FFH	พื้นที่เก็บข้อมูลภายใน ( Internal RAM )
0000H-00FFH	รีจิสเตอร์ไฟล์

ตารางแสดงการจัดโครงสร้างพื้นที่ หน่วยความจำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดคำสั่ง 80c196kb ( Instruction Set )

- ชุดคำสั่งที่มี 112 คำสั่ง ครอบคลุมไปด้วย คำสั่งพื้นฐานที่จำเป็น สำหรับการคำนวณตัวเลขและ การตัดสินใจ ขนาด 8 -16 และ 32 บิต
- แม้ว่าจะไม่มีคำสั่งเลขจำนวนจริง สนับสนุนโดยตรง การประกอบกันของคำสั่งที่มี และเทคนิค การเขียนโปรแกรมอีกเล็กน้อย สามารถสร้างการคำนวณ จำนวนจริง ได้โดยง่าย

Mnemonic	Operands	Operation (Note 1)	Flags						Notes
			Z	N	C	V	VT	ST	
ADD/ADD8	2	$D \leftarrow D + A$	✓	✓	✓	✓	↑	-	
ADD/ADD8	3	$D \leftarrow B + A$	✓	✓	✓	✓	↑	-	
ADDC/ADDC8	2	$D \leftarrow D + A + C$	✓	✓	✓	✓	↑	-	
SUB/SUB8	2	$D \leftarrow D - A$	✓	✓	✓	✓	↑	-	
SUB/SUB8	3	$D \leftarrow B - A$	✓	✓	✓	✓	↑	-	
SUSC/SUSC8	2	$D \leftarrow D - A - C - 1$	✓	✓	✓	✓	↑	-	
CMP/CMP8	2	$D - A$	✓	✓	✓	✓	↑	-	
MUL/MULU	2	$D, D - 2 \leftarrow D * A$	-	-	-	-	-	-	2
MUL/MULU	3	$D, D - 2 \leftarrow B * A$	-	-	-	-	-	-	2
MULS/MULU8	2	$D, D - 1 \leftarrow D * A$	-	-	-	-	-	-	3
MULS/MULU8	3	$D, D - 1 \leftarrow B * A$	-	-	-	-	-	-	3
DIVU	2	$Q \leftarrow (D, D - 2) / A, D - 2 \leftarrow \text{remainder}$	-	-	-	✓	↑	-	2
DIVU8	2	$D \leftarrow (D, D - 1) / A, D - 1 \leftarrow \text{remainder}$	-	-	-	✓	↑	-	3
DIV	2	$D \leftarrow (D, D - 2) / A, D - 2 \leftarrow \text{remainder}$	-	-	-	✓	↑	-	
DIV8	2	$D \leftarrow (D, D - 1) / A, D - 1 \leftarrow \text{remainder}$	-	-	-	✓	↑	-	
AND/AND8	2	$D \leftarrow D \text{ AND } A$	✓	✓	0	0	-	-	
AND/AND8	3	$D \leftarrow B \text{ AND } A$	✓	✓	0	0	-	-	
OR/ORB	2	$D \leftarrow D \text{ OR } A$	✓	✓	0	0	-	-	
XOR/XORB	2	$D \leftarrow D \text{ (excl. or) } A$	✓	✓	0	0	-	-	
LD/LDB	2	$D \leftarrow A$	-	-	-	-	-	-	
ST/STB	2	$A \leftarrow D$	-	-	-	-	-	-	
XCH/XCH8	2	$D \leftarrow A, A \leftarrow D$	-	-	-	-	-	-	
LDBSE	2	$D \leftarrow A; D - 1 \leftarrow \text{SIGN}(A)$	-	-	-	-	-	-	3,4
LDBZE	2	$D \leftarrow A; D - 1 \leftarrow 0$	-	-	-	-	-	-	3,4
PUSH	1	$SP \leftarrow SP - 2; (SP) \leftarrow A$	-	-	-	-	-	-	
POP	1	$A \leftarrow (SP); SP + 2$	-	-	-	-	-	-	
PUSHF	0	$SP \leftarrow SP - 2; (SP) \leftarrow \text{PSW};$ $\text{PSW} \leftarrow 0000H; I \leftarrow 0$	0	0	0	0	0	0	
POPF	0	$\text{PSW} \leftarrow (SP); SP \leftarrow SP - 2; I \leftarrow \text{PSW}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
SJMP	1	$PC \leftarrow PC + 11\text{-bit offset}$	-	-	-	-	-	-	5
LJMP	1	$PC \leftarrow PC + 16\text{-bit offset}$	-	-	-	-	-	-	5
BR(indirect)	1	$PC \leftarrow (A)$	-	-	-	-	-	-	
TIJMP	3	$PC \leftarrow (A) - 2 * ((B) \text{ AND } C)$	-	-	-	-	-	-	
SCALL	1	$SP \leftarrow SP - 2;$ $(SP) \leftarrow PC; PC \leftarrow PC + 11\text{-bit offset}$	-	-	-	-	-	-	5
LCALL	1	$SP \leftarrow SP - 2; (SP) \leftarrow PC;$ $PC \leftarrow PC + 16\text{-bit offset}$	-	-	-	-	-	-	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (SP) ← PC; PC ← PC + 11-bit offset ไม่นอนค่าใด ๆ ให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่เอกสารนี้ออกมาโดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างอ้อมถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mnemonic	Operands	Operation (Note 1)	Flags							Notes
			Z	N	C	V	VT	ST		
RET	0	PC ← (SP); SP ← SP - 2	-	-	-	-	-	-	-	
J (conditional)	1	PC ← PC + 8-bit offset (if taken)	-	-	-	-	-	-	-	5
JC	1	Jump if C = 1	-	-	-	-	-	-	-	5
JNC	1	Jump if C = 0	-	-	-	-	-	-	-	5
JE	1	Jump if Z = 1	-	-	-	-	-	-	-	5
JNE	1	Jump if Z = 0	-	-	-	-	-	-	-	5
JGE	1	Jump if N = 0	-	-	-	-	-	-	-	5
JLT	1	Jump if N = 1	-	-	-	-	-	-	-	5
JGT	1	Jump if N = 0 and Z = 0	-	-	-	-	-	-	-	5
JLE	1	Jump if N = 1 or Z = 1	-	-	-	-	-	-	-	5
JH	1	Jump if C = 1 and Z = 0	-	-	-	-	-	-	-	5
JNH	1	Jump if C = 0 or Z = 1	-	-	-	-	-	-	-	5
JV	1	Jump if V = 0	-	-	-	-	-	-	-	5
JNV	1	Jump if V = 1	-	-	-	-	-	-	-	5
JVT	1	Jump if VT = 1; Clear VT	-	-	-	-	0	-	-	5
JNVT	1	Jump if VT = 0; Clear VT	-	-	-	-	0	-	-	5
JST	1	Jump if ST = 1	-	-	-	-	-	-	-	5
JNST	1	Jump if ST = 0	-	-	-	-	-	-	-	5
JBS	3	Jump if Specified Bit = 1	-	-	-	-	-	-	-	5,6
JBC	3	Jump if Specified Bit = 0	-	-	-	-	-	-	-	5,6
DJNZ/ DJNZW	1	D ← D - 1; If D = 0 then PC ← PC + 8-bit offset	-	-	-	-	-	-	-	5
DEC/DEC8	1	D ← D - 1	/	/	/	/	/	↑	-	
NEG/NEG8	1	D ← 0 - D	/	/	/	/	/	↑	-	
INC/INC8	1	D ← D + 1	/	/	/	/	/	↑	-	
EXT	1	D ← D; D + 2 ← Sign (D)	/	/	0	0	-	-	-	2
EXTB	1	D ← D; D + 1 ← Sign (D)	/	/	0	0	-	-	-	3
NOT/NOT8	1	D ← Logical Not (D)	/	/	0	0	-	-	-	
CLR/CLRB	1	D ← 0	1	0	0	0	-	-	-	
SHL/SHLB/SHLL	2	C ← msb; ...; lsb ← 0	/	/	/	/	↑	-	-	7
SHR/SHRB/SHRL	2	0 → msb; ...; lsb → C	/	/	/	0	-	/	-	7
SHRA/SHRAB/SHRAL	2	msb → msb; ...; lsb → C	/	/	/	0	-	/	-	7
SETC	0	C ← 1	-	-	1	-	-	-	-	
CLRC	0	C ← 0	-	-	0	-	-	-	-	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mnemonic	Operands	Operation (Note 1)	Flags						Notes
			Z	N	C	V	VT	ST	
CLRVT	0	VT ← 0	-	-	-	-	0	-	
RST	0	PC ← 2080H	0	0	0	0	0	0	8
DI	0	Disable All Interrupts (I ← 0)	-	-	-	-	-	-	
EI	0	Enable All Interrupts (I ← 1)	-	-	-	-	-	-	
DPTS	0	Disable all PTS Cycles (PSE = 0)	-	-	-	-	-	-	
EPTS	0	Enable all PTS Cycles (PSE = 1)	-	-	-	-	-	-	
INC	0	PC ← PC + 1	-	-	-	-	-	-	
SKIP	0	PC ← PC + 2	-	-	-	-	-	-	
NORML	2	Left shift till msb = 1; D ← shift count	✓	✓	0	-	-	-	7
TRAP	0	SP ← SP - 2; (SP) ← PC; PC ← (2010H)	-	-	-	-	-	-	9
PUSHA	1	SP ← SP - 2; (SP) ← PSW; PSW ← 0000H; SP ← SP - 2; (SP) ← IMASK1/WSR; IMASK1 ← 00H	0	0	0	0	0	0	
POPA	1	IMASK1/WSR ← (SP); SP ← SP - 2; PSW ← (SP); SP ← SP - 2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
IDLPD	1	IDLE MODE IF KEY = 1; POWERDOWN MODE IF KEY = 2; CHIP RESET OTHERWISE	-	-	-	-	-	-	
CMPL	2	D ← A	✓	✓	✓	✓	✓	-	
BMOV, BMOVL	2	(PTR_HI) ← (PTR_LOW) ← ; UNTIL COUNT = 0	-	-	-	-	-	-	

**NOTES:**

1. If the mnemonic ends in "S" a byte operation is performed, otherwise a word operation is done. Operands D, B, and A must conform to the alignment rules for the required operand type. D and B are locations in the Register File; A can be located anywhere in memory.
2. D, D + 2 are consecutive WORDS in memory; D is DOUBLE-WORD aligned.
3. D, D + 1 are consecutive BYTES in memory; D is WORD aligned.
4. Changes a byte to word.
5. Offset is a 2's complement number.
6. Specified bit is one of the 2048 bits in the register file.
7. The "L" (Long) suffix indicates double-word operation.
8. Initiates a Reset by pulling RESET low. Software should re-initialize all the necessary registers with code starting at 2080H.
9. The assembler will not accept this mnemonic.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.  
โปรแกรม simulation และชุดโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%PROGRAM CALCULATE VOLTAGE SPACE VECTOR
Ts=0.0005 ;%switching frequency
F=input('enter desired frequency');
v=4.4*F ;%constant v/f ratio
u=380 ;%vdclink
b=input('enter angle in degree '); \
a=(b)*pi/180 ;
x=v*cos(a);
y=v*sin(a);
fprintf('switching frequency 2 kHz\r')
if y>0
if x>0
if abs(y)>sqrt(3)*abs(x)
###SECTOR 2##
v5=x+y/sqrt(3);
v1=-x+y/sqrt(3);
Ty=v5*Ts/(sqrt(2/3)*u);
Tx=v1*Ts/(sqrt(2/3)*u);
T0=Ts-Tx-Ty;
% phase a
tb=T0/4+Tx/2;
m=0:0.000001:0.0005;
for k=1:length(m)
if m(k)<tb
n(k)=0;
else
if m(k)<Ts-tb
n(k)=1;
else
n(k)=0;
end
end
end
% phase b
ta=T0/4+Tx/2+Ty/2;
o=0:0.000001:0.0005;
for k=1:length(o)
if o(k)<ta
p(k)=0;
else
if o(k)<Ts-ta
p(k)=1;
else
p(k)=0;
end
end
end
% phase c
tb=T0/4;
q=0:0.000001:0.0005;
for k=1:length(o)
if q(k)<tb
r(k)=0;
else
if q(k)<Ts-tb
r(k)=1;
else
r(k)=0;
end
end
end
fprintf('degree of this figure =%f\t', b)
fprintf('degree\r')
fprintf('t0/4=%f\t',T0/4)
fprintf('sec\r')

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ไม่สามารถแก้ไข หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    fprintf('tx/2  =%f\t', Tx/2)
    fprintf('sec\r')
    fprintf('ty/2  =%f\t', Ty/2)
    fprintf('sec\r')
    l=0:0.000001:0.0005;
f=n-p;
g=p-r;
h=r-n;
subplot(611),plot(l,f)
title(b)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(612),plot(l,g)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(613),plot(l,h)
ylabel('5 V/DIV')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(614),plot(l,n)
ylabel('voltage')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(615),plot(l,p)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(616),plot(l,r)
xlabel('time(sec)')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
else
###SECTOR 1##
v4=x-y/sqrt(3);
v5=2*y/sqrt(3);
Tx=v4*Ts/( sqrt(2/3)*u);
Ty=v5*Ts/( sqrt(2/3)*u);
T0=Ts-Tx-Ty;
% phase a
tb=T0/4;
m=0:0.000001:0.0005;
for k=1:length(m)
    if m(k)<tb
        n(k)=0;
    else
        if m(k)<Ts-tb
            n(k)=1;
        else
            n(k)=0;
        end
    end
end
end
% phase b
ta=T0/4+Tx/2+Ty/2;
o=0:0.000001:0.0005;
for k=1:length(o)
    if o(k)<ta
        p(k)=0;
    else
        if o(k)<Ts-ta
            p(k)=1;
        else
            p(k)=0;
        end
    end
end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ๓ phase c มิใช่กรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

tb=T0/4+Tx/2;
q=0:0.000001:0.0005;
for k=1:length(o)
    if q(k)<tb
        r(k)=0;
    else
        if q(k)<Ts-tb
            r(k)=1;
        else
            r(k)=0;
        end
    end
end
end
l=0:0.000001:0.0005;
f=n-p;
g=p-r;
h=r-n;
fprintf('degree of this figure =%f\t', b)
fprintf('degree\r')
fprintf('t0/4 =%f\t', T0/4)
fprintf('sec\r')
fprintf('tx/2 =%f\t', Tx/2)
fprintf('sec\r')
fprintf('ty/2 =%f\t', Ty/2)
fprintf('sec\r')
subplot(611),plot(l,f)
title(b)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(612),plot(l,g)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(613),plot(l,h)
ylabel('5 V/DIV')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(614),plot(l,n)
ylabel('voltage')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(615),plot(l,p)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(616),plot(l,r)
xlabel('time(sec)')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
end
else
if abs(y)>sqrt(3)*abs(x)
    ###SECTOR 2###
    v5=x+y/sqrt(3);
    v1=-x+y/sqrt(3);
    Ty=v5*Ts/(sqrt(2/3)*u);
    Tx=v1*Ts/(sqrt(2/3)*u);
    T0=Ts-Tx-Ty;
    % phase a
    tb=T0/4+Tx/2;
    m=0:0.000001:0.0005;
    for k=1:length(m)
        if m(k)<tb
            n(k)=0;
        else
            if m(k)<Ts-tb
                n(k)=1;
            else
                n(k)=0;
            end
        end
    end
end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รวบรวมไว้สำหรับใช้ทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        end
    end
end
end
end
% phase b
ta=T0/4+Tx/2+Ty/2;
o=0:0.000001:0.0005;
for k=1:length(o)
    if o(k)<ta
        p(k)=0;
    else
        if o(k)<Ts-ta
            p(k)=1;
        else
            p(k)=0;
        end
    end
end
end
% phase c
tb=T0/4;
q=0:0.000001:0.0005;
for k=1:length(o)
    if q(k)<tb
        r(k)=0;
    else
        if q(k)<Ts-tb
            r(k)=1;
        else
            r(k)=0;
        end
    end
end
end
l=0:0.000001:0.0005;
f=n-p;
g=p-r;
h=r-n;
fprintf('degree of this figure =%f\t', b)
fprintf('degree\r')
fprintf('t0/4 =%f\t', T0/4)
fprintf('sec\r')
fprintf('tx/2 =%f\t', Tx/2)
fprintf('sec\r')
fprintf('ty/2 =%f\t', Ty/2)
fprintf('sec\r')
subplot(611),plot(1,f)
title(b)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(612),plot(1,g)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(613),plot(1,h)
ylabel('5 V/DIV')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(614),plot(1,n)
ylabel('voltage')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(615),plot(1,p)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(616),plot(1,r)
xlabel('time(sec)')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
else

```

นี่เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ควรเผยแพร่ ห้ามนำไปใช้ ห้ามนำไปแก้ไข ห้ามนำไปดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

v3=-x-y/sqrt(3);
v1=2*y/sqrt(3);
TY=v3*Ts/(sqrt(2/3)*u);
TX=v1*Ts/(sqrt(2/3)*u);
T0=Ts-Tx-Ty;
% phase a
tb=T0/4+Tx/2+Ty/2;
m=0:0.000001:0.0005;
for k=1:length(m)
    if m(k)<tb
        n(k)=0;
    else
        if m(k)<Ts-tb
            n(k)=1;
        else
            n(k)=0;
        end
    end
end
% phase b
ta=T0/4+Tx/2;
o=0:0.000001:0.0005;
for k=1:length(o)
    if o(k)<ta
        p(k)=0;
    else
        if o(k)<Ts-ta
            p(k)=1;
        else
            p(k)=0;
        end
    end
end
% phase c
tb=T0/4;
q=0:0.000001:0.0005;
for k=1:length(q)
    if q(k)<tb
        r(k)=0;
    else
        if q(k)<Ts-tb
            r(k)=1;
        else
            r(k)=0;
        end
    end
end
end
l=0:0.000001:0.0005;
f=n-p;
g=p-r;
h=r-n;
fprintf('degree of this figure   =%f\t', b)
fprintf('degree\r')
fprintf('t0/4   =%f\t', T0/4)
fprintf('sec\r')
fprintf('tx/2   =%f\t', Tx/2)
fprintf('sec\r')
fprintf('ty/2   =%f\t', Ty/2)
fprintf('sec\r')
subplot(611),plot(l,f)
title(b)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(612),plot(l,g)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(613),plot(l,h)

```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้น ขาดกรณีขออนุญาตเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ylabel('5 V/DIV')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(614),plot(1,n)
ylabel('voltage')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(615),plot(1,p)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(616),plot(1,r)
xlabel('time(sec)')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
end
else
if x>0
if abs(y)>sqrt(3)*abs(x)
###SECTOR 5##
v6=x-y/sqrt(3);
v2=-x-y/sqrt(3);
TY=v6*Ts/(sqrt(2/3)*u);
TX=v2*Ts/(sqrt(2/3)*u);
T0=Ts-Tx-Ty;
%phase a
tb=T0/4+Tx/2;
m=0:0.000001:0.0005;
for k=1:length(m)
if m(k)<tb
n(k)=0;
else
if m(k)<Ts-tb
else
n(k)=0;
end
end
end
% phase b
ta=T0/4;
o=0:0.000001:0.0005;
for k=1:length(o)
if o(k)<ta
p(k)=0;
else
if o(k)<Ts-ta
p(k)=1;
else
p(k)=0;
end
end
end
% phase c
tb=T0/4+Tx/2+Ty/2;
q=0:0.000001:0.0005;
for k=1:length(o)
if q(k)<tb
r(k)=0;
else
if q(k)<Ts-tb
r(k)=1;
else
r(k)=0;
end
end
end
end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

l=0:0.000001:0.0005;
f=n-p;
g=p-r;
h=r-n;
fprintf('degree of this figure =%f\t', b)
fprintf('degree\r')
fprintf('t0/4 =%f\t', T0/4)
fprintf('sec\r')
fprintf('tx/2 =%f\t', Tx/2)
fprintf('sec\r')
fprintf('ty/2 =%f\t', Ty/2)
fprintf('sec\r')
subplot(611),plot(l,f)
title(b)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(612),plot(l,g)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(613),plot(l,h)
ylabel('5 V/DIV')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(614),plot(l,n)
ylabel('voltage')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(615),plot(l,p)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(616),plot(l,r)
xlabel('time(sec)')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
else
###SECTOR 6##
v4=x+y/sqrt(3);
v6=-2*y/sqrt(3);
Tx=v4*Ts/(sqrt(2/3)*u);
Ty=v6*Ts/(sqrt(2/3)*u);
T0=Ts-Tx-Ty;
% phase a
tb=T0/4;
m=0:0.000001:0.0005;
for k=1:length(m)
    if m(k)<tb
        n(k)=0;
    else
        if m(k)<Ts-tb
            n(k)=1;
        else
            n(k)=0;
        end
    end
end
% phase b
ta=T0/4+Tx/2;
o=0:0.000001:0.0005;
for k=1:length(o)
    if o(k)<ta
        p(k)=0;
    else
        if o(k)<Ts-ta
            p(k)=1;
        else
            p(k)=0;
        end
    end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สป(k)=0; รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    end
end
% phase c
tb=T0/4+Tx/2+Ty/2;
q=0:0.000001:0.0005;
for k=1:length(o)
    if q(k)<tb
        r(k)=0;
    else
        if q(k)<Ts-tb
            r(k)=1;
        else
            r(k)=0;
        end
    end
end
end
l=0:0.000001:0.0005;
f=n-p;
g=p-r;
h=r-n;
fprintf('degree of this figure. =%f\t', b)
fprintf('degree\r')
fprintf('t0/4 =%f\t', T0/4)
fprintf('sec\r')
fprintf('tx/2 =%f\t', Tx/2)
fprintf('sec\r')
fprintf('ty/2 =%f\t', Ty/2)
fprintf('sec\r')
subplot(611),plot(l,f)
title(b)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(612),plot(l,g)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(613),plot(l,h)
ylabel('5 V/DIV')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(614),plot(l,n)
ylabel('voltage')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(615),plot(l,p)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(616),plot(l,r)
xlabel('time(sec)')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
end
else
if abs(y)>sqrt(3)*abs(x)
    ###SECTOR 5##
    v6=x-y/sqrt(3);
    v2=v6-sqrt(3)*v6;
    TX=v2*Ts/(sqrt(2/3)*u);
    T0=Ts-Tx-Ty;
    %phase a
    tb=T0/4+Tx/2;
    m=0:0.000001:0.0005;
    for k=1:length(m)
        if m(k)<tb
            n(k)=0;
        else
            if m(k)<Ts-tb

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        n(k)=1;
    else
        n(k)=0;
    end
end
end
end
% phase b
ta=T0/4;
o=0:0.000001:0.0005;
for k=1:length(o)
    if o(k)<ta
        p(k)=0;
    else
        if o(k)<Ts-ta
            p(k)=1;
        else
            p(k)=0;
        end
    end
end
end
% phase c
tb=T0/4+Tx/2+Ty/2;
q=0:0.000001:0.0005;
for k=1:length(o)
    if q(k)<tb
        r(k)=0;
    else
        if q(k)<Ts-tb
            r(k)=1;
        else
            r(k)=0;
        end
    end
end
end
l=0:0.000001:0.0005;
f=n-p;
g=p-r;
h=r-n;
fprintf('degree of this figure =%f\t', b)
fprintf('degree\r')
fprintf('t0/4 =%f\t', T0/4)
fprintf('sec\r')
fprintf('tx/2 =%f\t', Tx/2)
fprintf('sec\r')
fprintf('ty/2 =%f\t', Ty/2)
fprintf('sec\r')
subplot(611),plot(1,f)
title(b)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(612),plot(1,g)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(613),plot(1,h)
ylabel('5 V/DIV')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(614),plot(1,n)
ylabel('voltage')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(615),plot(1,p)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(616),plot(1,r)
xlabel('time(sec)')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])

```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ไม่ควรคัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

grid
else
    %###SECTOR 4###
    v3=-x+y/sqrt(3);
    v2=-2*y/sqrt(3);
    Ty=v3*Ts/( sqrt(2/3)*u);
    Tx=v2*Ts/( sqrt(2/3)*u);
    T0=Ts-Tx-Ty;
    % phase a
    tb=T0/4+Tx/2+Ty/2;
    m=0:0.000001:0.0005;
    for k=1:length(m)
        if m(k)<tb
            n(k)=0;
        else
            if m(k)<Ts-tb
                n(k)=1;
            else
                n(k)=0;
            end
        end
    end
    % phase b
    ta=T0/4;
    o=0:0.000001:0.0005;
    for k=1:length(o)
        if o(k)<ta
            p(k)=0;
        else
            if o(k)<Ts-ta
                p(k)=1;
            else
                p(k)=0;
            end
        end
    end
    % phase c
    tb=T0/4+Tx/2;
    q=0:0.000001:0.0005;
    for k=1:length(q)
        if q(k)<tb
            r(k)=0;
        else
            if q(k)<Ts-tb
                r(k)=1;
            else
                r(k)=0;
            end
        end
    end
    end
    fprintf('degree of this figure =%f\t', b)
    fprintf('degree\r')
    fprintf('t0/4 =%f\t', T0/4)
    fprintf('sec\r')
    fprintf('tx/2 =%f\t', Tx/2)
    fprintf('sec\r')
    fprintf('ty/2 =%f\t', Ty/2)
    fprintf('sec\r')
    l=0:0.000001:0.0005;
    f=n-p;
    g=p-r;
    h=r-n;
    subplot(611),plot(l,f)
    title(b)
    axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
    grid
    subplot(612),plot(l,g)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(613),plot(1,h)
ylabel('5 V/DIV')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(614),plot(1,n)
ylabel('voltage')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(615),plot(1,p)
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
subplot(616),plot(1,r)
xlabel('time(sec)')
axis([0,0.00051,-1.1,1.1])
grid
end
end
end
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โปรแกรมสร้างสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม 3 เฟส

\$Include(80C196KC.Inc)

Rseg At 40H

Rsv: DsW 8

Period Equ 0CH

PWM0\_ST Equ 0H ; Set Time

PWM0\_CT Equ 6H ; Clear Time

PWM1\_ST Equ 4H

PWM1\_CT Equ 0AH

PWM21\_ST Equ 0H

PWM2\_CT Equ 2H

PWM22\_ST Equ 8H

Cseg At 2080H

ClrB Wsr

LdB IOC2,#11000000B

DI

Set\_0: LdB HSO\_COMMAND,#11100000B

LD HSO\_Time,#PWM0\_ST

SKIP R0

SKIP R0

Set\_1: LdB HSO\_COMMAND,#11100001B

LD HSO\_Time,#PWM1\_ST

SKIP R0

SKIP R0

Set\_21: LdB HSO\_COMMAND,#11100010B

LD HSO\_Time,#PWM21\_ST

SKIP R0

SKIP R0

Clear\_0: LdB HSO\_COMMAND,#11000000B

เอกสารนี้ LD ออก HSO\_Time,#PWM0\_CT ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Skip R0
Skip R0
Clear_1:  LdB  HSO_COMMAND,#11000001B
          LD   HSO_Time,#PWM1_CT
          Skip R0
          Skip R0
Clear_2:  LdB  HSO_COMMAND,#11000010B
          LD   HSO_Time,#PWM2_CT
          Skip R0
          Skip R0
Set_22:  LdB  HSO_COMMAND,#11100010B
          LD   HSO_Time,#PWM22_ST
          SKIP R0
          SKIP R0
Reset:  LdB  HSO_Command,#11001110B
          LD   HSO_Time,#Period
;
          Skip R0
          Ret
End

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยกำลังใจจากครอบครัวและเพื่อนๆ และขอขอบพระคุณ อาจารย์วิจิตร กิณเรศ ที่ช่วยเหลือและให้คำปรึกษาด้วยดีตลอดมา ทำให้ซาบซึ้งถึงน้ำใจอาจารย์ที่มีต่อลูกศิษย์ ขอขอบพระคุณอาจารย์สุรินทร์ คำฝอย ที่ช่วยเหลือให้คำปรึกษานักศึกษาทุกคนอย่างเอาใจใส่ ขอขอบคุณเพื่อนภาคโทรคมนาคมและภาคไฟฟ้า พี่หนึ่ง และ พี่เจี๊ยบที่คอยช่วยเหลือตลอดมาขอบคุณพี่สไตร์ภาคไฟฟ้า และที่สำคัญที่สุดขอขอบคุณภาคไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ทำให้พวกผมเป็นวิศวกร อย่างเต็มภาคภูมิ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. พิศศักดิ์ วงสุนทโรสถ, “ทฤษฎีวิเคราะห์วงจรเครื่องจักรไฟฟ้า”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. กฤษฎา วิสุทธิรานนท์, “Inverter หลักการทำงานและเทคนิคการใช้งาน”, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
3. สุธรรม ศรีเกษม, “MATLAB เพื่อการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม”, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรังสิต.
4. ชัยยา คันตีสุขารมย์, “คู่มือการใช้ 80C196KC”, หก. ตำลึงคีไซน์ แอนด์ เทคโนโลยี.
5. โสภณ สมัยรัฐ, “ระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์”, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538
6. Stephen J. Chapman, “Electronic Machinery Fundamentals”, McGraw-Hill International Edition, 1991.
7. Ned Mohan, “Power Electronics, Converter, Applications and Design”, John Wiley & Sons, Inc., 1995
8. Peter Vas, “Vector Control of ac machine”, Oxford University Press Inc., 1990.
9. H. Broeck, H. Skudelny and G. Syanke, “Analysis and Realization of Pulse Width Modulator based on Voltage Space Vectors” IEEE Transaction on Industrial Application, Vol. 82, No. 8, pp.142-150, 1988.
10. INTEL, 1995-1996 Embedded Applications, Vol. 2, AP-428
11. INTEL, 80C196KB User’s Guild
12. [Http://biosys2.me.berkeley.edu/ME235/LabFile/tips8096](http://biosys2.me.berkeley.edu/ME235/LabFile/tips8096)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้