



ปีการศึกษา 2540

การศึกษาไมโครคอนโทรลเลอร์ 32 บิตเพื่อประยุกต์ใช้งานอินเวอร์เตอร์

LEARNING ABOUT 32 BIT MICROCONTROLLER FOR INVERTER APPLICATION

โดย

1. นายชนวรรณ นาคะวิโร
2. นายธีระศักดิ์ หล้าวิรัช
3. นายนที กิติกานันท์
4. นางสาวนันทิยา ชัยบุตร

วัน เดือน ปี.....-5.คค.2541  
เลขทะเบียน.....038584  
เลขเรียกหนังสือ.....T.400๓๖1554

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. คุณิต สุขสวัสดิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี **038584**


ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2540

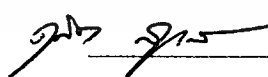
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 32 บิต

ผู้จัดทำ

- 
1. นายธนวรรณ นาคะวิโร
  2. นายธีระศักดิ์ หล้าวิรัช
  3. นายนที กิติกานันท์
  4. นางสาวนันทิยา ชัยบุตร

 อาจารย์ที่ปรึกษา  
( อ. คุสิต สุขสวัสดิ์ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาไมโครคอนโทรลเลอร์ 32 บิต เพื่อประยุกต์ใช้งานอินเวอร์เตอร์

นายธนวรรณ นาคะวิโร

นายธีระศักดิ์ หล้าวิรัช

นายนที กิติกานันท์

นางสาวนันทิยา ชัยบุตร

อ.คุณิต สุขสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2540

**บทคัดย่อ**

ปริญญาบัตรฉบับนี้กล่าวถึงการศึกษาการประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 32 บิตในการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งได้ทำการออกแบบและสร้างระบบควบคุมความเร็วโดยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยตรงโดยอาศัยหลักการของสเปซเวกเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ซึ่งอยู่กับที่ ผลการทดสอบการควบคุมวงรอบเปิด V/F แสดงให้เห็นความสามารถในการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุม และ การศึกษาถึงแนวทางการสร้างระบบควบคุมแบบเวกเตอร์เพื่อใช้ในการควบคุมมอเตอร์ต่อไป

LEARNING ABOUT 32 BIT MICROCONTROLLER FOR INVERTER APPLICATION

Tanawat Nakaviro

Teerasak Luewirat

Nathee Kitiknan

Nuntiya Chaiyabut

Dusit Suksawat Advisor

1997

ABSTRACT

This report presents a study for a study for 32 bit Microcontroller application in speed control of Induction Motor. Implementation is done by using microcontroller to directly generate the pulse-width modulation pattern based on the voltage space vector expressed in the stationary stator reference frame. Experimental results according to the constant V/F method verify the ability of the microcontroller application. The study results verify the approach of the implementation by using vector control method.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญภาพ	III
สารบัญตาราง	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเบื้องต้น	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตและขั้นตอนการดำเนินงาน	1
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น	2
2.1 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีแบบเวกเตอร์	2
2.2 อินเวอร์เตอร์แบบเวกเตอร์แรงดัน	8
2.3 ทฤษฎีวงจรถ้าตั้ง	13
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	23
3.1 ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์	23
3.2 ส่วนวงจรถ้าตั้ง	28
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	34
4.1 การจำลองระบบ	34
4.2 สัญญาณจากการทดลอง	43
บทที่ 5 บทวิจารณ์และบทสรุป	53
5.1 ข้อดีที่ได้จากการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ทดสอบ	57
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในช่วงการทำโครงงาน	57
5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป	58
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูป 2.1 แสดงกรอบอ้างอิงของโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	2
รูป 2.2 แสดงแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำในเชิงแรงดัน(V-Control)	4
รูป 2.3 แสดงแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำในเชิงกระแส(I-Control)	5
รูป 2.4 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำในเชิงกระแสที่ลดรูปด้วยสมการ (2.4)และ(2.5)	5
รูป 2.5 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำในเชิงแรงดันที่ลดรูปด้วยสมการ (2.4)และ(2.5)	6
รูป 2.6 แบบจำลองเชิงแรงดันที่อาศัยสมการ(2.7)และ(2.9)ช่วยลดรูป	6
รูป 2.7 แบบจำลองของระบบควบคุมแบบควบคุมแรงดัน	7
รูป 2.8 แบบจำลองของระบบควบคุมแบบควบคุมกระแส	7
รูป 2.9 (ก) แบบจำลองชุดอินเวอร์เตอร์	8
(ข) เวกเตอร์แรงดันของชุดอินเวอร์เตอร์	8
รูป 2.10 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน แบบแยกการควบคุมให้มีอิสระต่อกัน	9
รูป 2.11 แผนภาพวิธีการหาเซกเตอร์ของเวกเตอร์แรงดัน	10
รูป 2.12 ส่วนประกอบของเวกเตอร์แรงดัน	12
รูป 2.13 เวกเตอร์แรงดันบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์(d-q)	13
รูป 2.14 แผนผังเวลารูปแบบการสวิตช์	13
รูป 2.15 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์	14
รูป 2.16 วิธีการสร้าง ไฟสลับ	15
รูป 2.17 คลื่นไฟสลับความถี่ 1 Hz	15
รูป 2.18 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสพื้นฐาน	16
รูป 2.19 การสร้างไฟสลับ 3 เฟส	16
รูป 2.20 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ไอจีบีทีเป็นตัวสวิตช์	16
รูป 2.21 สัญลักษณ์ของ ไอจีบีที	17
รูป 2.22 วงจรภายในของคอนเวอร์เตอร์	18
รูป 2.23 หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ซึ่งแปลงไฟสลับเฟสเดียวเป็นไฟตรง	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูป 2.24 วงจรจำกัดขนาดกระแสอินรีช	19
รูป 2.25 กระแสอินรีช	19
รูป 2.26 รูปแสดงวงจรขับเกท	20
รูป 2.27 คีคป์ลิงคาปาซิเตอร์	21
รูป 3.1 บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบ	24
รูป 3.2 โครงสร้างของระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์	25
รูป 3.3 ไดอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์	26
รูป 3.4 โฟลวชาร์ทการทำงานของซอฟต์แวร์	27
รูป 3.5 โหมคการสร้างสัญญาณ PWM ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์	28
รูป 3.6 การต่อวงจรของชุดขับเกท	30
รูป 3.7 วงจรป้องกันกระแสเกินของชุดขับและ ไอจีบีที	31
รูป 3.8 วงจรป้องกันกระแสอินรีช	32
รูป 3.9 วงจรป้องกันทั้งหมด	33
รูป 4.1 ระบบจำลองของการควบคุมมอเตอร์แบบเวกเตอร์	34
รูป 4.2 ส่วนคำนวณการควบคุมแบบแยกอิสระ	34
รูป 4.3 ส่วนคำนวณความถี่ฟลักซ์	35
รูป 4.4 ส่วนแปลงค่าแรงดัน	35
รูป 4.5 แสดงส่วนแปลงค่าแรงดันเป็น $V_\alpha$ และ $V_\beta$	35
รูป 4.6 แสดงส่วนแปลงค่าแรงดันจาก $V_\alpha, V_\beta$ เป็น $V_u, V_v, V_w$	36
รูป 4.7 แสดงส่วนของตัวควบคุมแบบ PI	36
รูป 4.8 แสดงส่วนของโมเมนต์ความเฉื่อยและ โหลดจำลอง	36
รูป 4.9 แสดงส่วนจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ	37
รูป 4.10 กราฟแสดงกระแส $i_\alpha$ ที่ความเร็วที่ 50 Hz ขณะ ไร้ภาระ	38
รูป 4.11 ผลการจำลองการเร่งความเร็วมอเตอร์ตั้งแต่เริ่มหมุนจนถึงความเร็วที่ 50 Hz	38
รูป 4.12 ผลการจำลองการเร่งความเร็วมอเตอร์ที่ความเร็วที่ 50 Hz และใส่โหลด 3 N-m ที่เวลา 1.2 วินาที	39
รูป 4.13 ผลการจำลองการกักทางหมุนจากความเร็ว 50 Hz เป็น -50 Hz	42
รูป 4.14 สัญญาณ PWM จาก CPU ที่ความถี่ 20 Hz	43
รูป 4.15 สัญญาณ PWM จาก CPU ที่ความถี่ 50 Hz	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูป 4.16 สัญญาณ PWM จาก CPU ที่ความถี่ 99 Hz	44
รูป 4.17 สัญญาณ PWM จากชุดขับเกท	44
รูป 4.18 คาบประวิงเวลาของสัญญาณ PWM ของชุดขับเกท	45
รูป 4.19 สัญญาณ PWM จากชุดขับเกทที่ความถี่ 10 Hz	45
รูป 4.20 สัญญาณ PWM จากชุดขับเกทที่ความถี่ 50 Hz	46
รูป 4.21 สัญญาณ PWM จากชุดขับเกทที่ความถี่ 99 Hz	46
รูป 4.22 สัญญาณลูกคลื่นกระแสขณะขับมอเตอร์ที่ความถี่ 30 Hz	47
รูป 4.23 สัญญาณลูกคลื่นกระแสขณะขับมอเตอร์ที่ความถี่ 20 Hz	47
รูป 4.24 สัญญาณลูกคลื่นกระแสขณะขับมอเตอร์ที่ความถี่ 50 Hz	48
รูป 4.25 สัญญาณลูกคลื่นกระแสขณะขับมอเตอร์ที่ความถี่ 80 Hz	48
รูป 4.26 สัญญาณลูกคลื่นแรงดันระหว่างเฟสที่ความถี่ 20 Hz	49
รูป 4.27 สัญญาณลูกคลื่นแรงดันระหว่างเฟสที่ความถี่ 50 Hz	49
รูป 4.28 สัญญาณลูกคลื่นแรงดันระหว่างเฟสที่ความถี่ 70 Hz	50
รูป 4.29 สัญญาณลูกคลื่นกระแสที่ความถี่ 50 Hz	50
รูป 4.30 สเปกตรัมแสดของฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 50 Hz	51
รูป 4.31 ค่ากระแสและ %THD ที่ความถี่ 50 Hz	51
รูป 4.32 จำนวนสัญญาณ PWM ที่ 0.02 cycle ความถี่ 20 Hz	52
รูป 4.33 จำนวนสัญญาณ PWM ที่ 0.02 cycle ความถี่ 50 Hz	52
รูป 4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความถี่	53
รูป 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วที่ 30Hz	55
รูป 4.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วที่ 40Hz	55
รูป 4.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วที่ 50Hz	55
รูป 4.38 แสดงชิ้นงาน	56
รูป 4.39 แสดงมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ	56
รูป 5.1 บล็อกไดอะแกรมของการซคเซชการประวิงเวลา	58

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและความถี่	53
ตาราง 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วมอเตอร์ที่ความถี่ 30Hz	54
ตาราง 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วมอเตอร์ที่ความถี่ 40Hz	54
ตาราง 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วมอเตอร์ที่ความถี่ 50Hz	54



## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความเบื้องต้น

มอเตอร์มีบทบาทในงานอุตสาหกรรมปัจจุบัน โดยเป็นส่วนประกอบสำคัญของเครื่องจักรและในส่วนต่าง ๆ ของกระบวนการผลิต มอเตอร์ทำหน้าที่เป็นเครื่องจักรต้นกำลังเพื่อขับเคลื่อนภาระที่เป็นเครื่องจักรประเภทต่าง ๆ ด้วยการขับโดยตรง ผ่านชุดเฟืองทดหรือสายพาน เป็นต้น ในระบบขับเคลื่อนงานอุตสาหกรรมอาจจำแนกตามการควบคุมความเร็วได้เป็น 2 ประเภท คือ เครื่องจักรที่มีความเร็วในการขับเคลื่อนคงที่และเครื่องจักรที่สามารถปรับความเร็วได้ตามต้องการ

ในปัจจุบันระบบซึ่งต้องการควบคุมการปรับความเร็วรอบได้นำมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ามาใช้งานแทนมอเตอร์กระแสตรงกันมากขึ้น เนื่องจากข้อดีของมอเตอร์กระแสตรงหลายประการ การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำอาจแบ่งคร่าว ๆ เป็นการควบคุมวงรอบเปิดและการควบคุมวงรอบปิด

จากการพัฒนาเทคโนโลยีไมโครโปรเซสเซอร์และอิเล็กทรอนิกส์ทำให้ไมโครโปรเซสเซอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ามามีบทบาทสำคัญในกระบวนการควบคุมต่าง ๆ มากยิ่งขึ้น ดังนั้นโครงการนี้จึงทำการศึกษานำไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้งานในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการควบคุมแบบต่าง ๆ ซึ่งผลการดำเนินการจะได้กล่าวถึงต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษา ค้นคว้า ออกแบบและสร้างระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

### 1.3 ขอบเขตและขั้นตอนการดำเนินการ

- ศึกษาทฤษฎีของอินเวอร์เตอร์และทฤษฎีการควบคุม
- หาค่าพารามิเตอร์ของระบบและทำการจำลองระบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป
- ศึกษารายละเอียดของไมโครคอนโทรลเลอร์ 32 บิต
- ศึกษา,ออกแบบและสร้างส่วนวงจรกำลังและส่วนป้องกัน
- เขียนโปรแกรมจากอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้
- ประกอบระบบส่วนฮาร์ดแวร์และส่วนซอฟต์แวร์เข้าด้วยกัน
- ทำการทดสอบระบบและแก้ไขปรับปรุงการทำงานของระบบ
- สรุปผลการทดสอบ

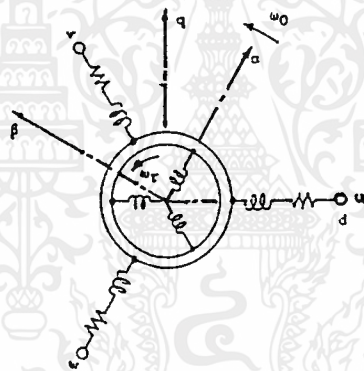
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2  
ทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีแบบเวกเตอร์

2.1.1 บทนำ

การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีแบบเวกเตอร์โดยการควบคุมความถี่สลิปนั้นมีการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมบางประเภทซึ่งต้องการการตอบสนองแรงบิดอย่างรวดเร็ว และสามารถกำจัดสภาวะแรงบิดชั่วขณะที่ไม่ต้องการ (Unnecessary torque transient) ออกไปได้เพื่อให้ได้ผลของการควบคุมตามที่ต้องการ ในเบื้องต้นจะต้องทำให้กระแสกระตุ้น (exciting current,  $i_{1\alpha}$ ) และกระแสสร้างแรงบิด (torque current,  $i_{1\beta}$ ) เป็นอิสระต่อกันภายใต้กรอบอ้างอิงของโรเตอร์ ( $\alpha$ - $\beta$ ) ที่หมุนตามความถี่ของแหล่งจ่ายไฟสลับซึ่งป้อนอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงกรอบอ้างอิงของโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งเงื่อนไขของการควบคุมแรงบิดอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ฟลักซ์แม่เหล็ก (secondary flux) ต้องถูกควบคุมให้คงที่ ซึ่งคือ การควบคุมให้กระแสกระตุ้นคงที่นั่นเอง โดยที่เงื่อนไขนี้จำเป็นและมีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะทำให้ระบบมีการแยกจากกันของกระแสสร้างแรงบิดกับฟลักซ์แม่เหล็กอย่างอิสระ
- 2) ความถี่ไฟสลับ ( $\omega_0$ ) จะพิจารณาจาก

$$\omega_0 = \omega_r + (R_2/L_2 * i_{1\alpha}) i_{1\beta} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\omega_r$  = ความถี่ของโรเตอร์ที่หมุนอยู่

$i_{1\alpha}$  = กระแสกระตุ้น

$i_{1\beta}$  = กระแสสร้างแรงบิด

$R_2$  = ความต้านทานของโรเตอร์

$L_2$  = ความเหนี่ยวนำของโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) กระแสสร้างฟลักซ์และกระแสสร้างแรงบิดที่ป้อนให้ระบบต้องถูกป้อนอย่างถูกต้องและทันทีทันใด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นอ้างอิง ( $i_{1\alpha}^*$ ) และกระแสสร้างแรงบิดอ้างอิง ( $i_{1\beta}^*$ ) เมื่อได้ครบทั้ง 3 เงื่อนไขอย่างสมบูรณ์แล้ว จะสามารถพิจารณาได้ว่า

เวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กจะวางตัวในแนวแกนอัลฟาและเวกเตอร์ของกระแสสร้างแรงบิดจะวางตัวในแนวแกนเบต้า นั่นคือจะไม่มีการกระทำกันระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กกับกระแสสร้างแรงบิด สำหรับการควบคุมให้เกิดการตอบสนองของแรงบิดอย่างรวดเร็วโดยปราศจากแรงบิดช่วงที่ไม่ต้องการทำได้โดยการปรับค่ากระแสสร้างแรงบิด  $i_{1\beta}$  ในขณะที่รักษาฟลักซ์แม่เหล็กให้คงที่เสมอ

## 2.1.2 หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์

### 2.1.2.1) การควบคุมกระแส (Current Control หรือ I-type Control)

เป็นวิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ในยุคแรก (Conventional Vector Control) ซึ่งอาศัยพื้นฐานจากแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนด้วยแหล่งจ่ายกระแสซึ่งสามารถควบคุมได้ (The model of the controlled current-source-fed induction motor) โดยวิธีนี้จะต้องมีการป้อนสัญญาณกลับของกระแสเพื่อควบคุมให้ได้กระแสตามที่ต้องการ ซึ่งการควบคุมด้วยวิธีนี้มีข้อเสียที่สำคัญ 2 ประการคือ

ก) หากความเร็วในการตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสไม่สูงพอจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างกระแสสร้างฟลักซ์และกระแสสร้างแรงบิด[3] ซึ่งผิดเงื่อนไขเบื้องต้นของการควบคุมแบบเวกเตอร์ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

ข) ระบบควบคุมแบบควบคุมกระแสมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์สูง เช่น การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานของโรเตอร์เนื่องจากความร้อนจะทำให้การควบคุมเกิดความผิดพลาดขึ้น(ดังแสดงในภาคผนวก ก ) ดังนั้นจึงต้องมีการแก้ไขซึ่งสามารถทำได้โดยเพิ่มอัตราขยายของวงรอบป้อนกลับของกระแสให้มีค่าสูงชันมากที่สุด เพื่อจะได้ทำให้ตัวแปรผันพลังจ่ายกระแสได้อย่างอุดมคติ ซึ่งจะต้องใช้ความถี่ในการสวิตซ์สูงมากอันเป็นขีดจำกัดของการใช้งานในระบบขนาดใหญ่

จากข้อเสียและขีดจำกัดในการแก้ไขของระบบควบคุมแบบกระแสทำให้มีการพัฒนาระบบควบคุมแบบแรงดันขึ้นมาใช้งานทดแทน

### 2.1.2.2) แบบควบคุมแรงดัน (Voltage Control หรือ V-type Control)

เป็นการควบคุมแรงดันขาออกของตัวอินเวอร์เตอร์ โดยอาศัยการแยกกระแสสร้างฟลักซ์และกระแสสร้างแรงบิดให้เป็นอิสระจากกัน ซึ่งนอกจากจะแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในแบบควบคุมกระแสได้แล้วยังให้ข้อดีในด้านการสร้างสัญญาณพัลส์ (Pulse-Width Modulation, PWM) สามารถทำได้จากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์โดยตรงอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การสร้างแบบจำลองของการควบคุมแบบเวกเตอร์

แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

รูปแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำพื้นฐาน สามารถพิจารณาได้ดังสมการ

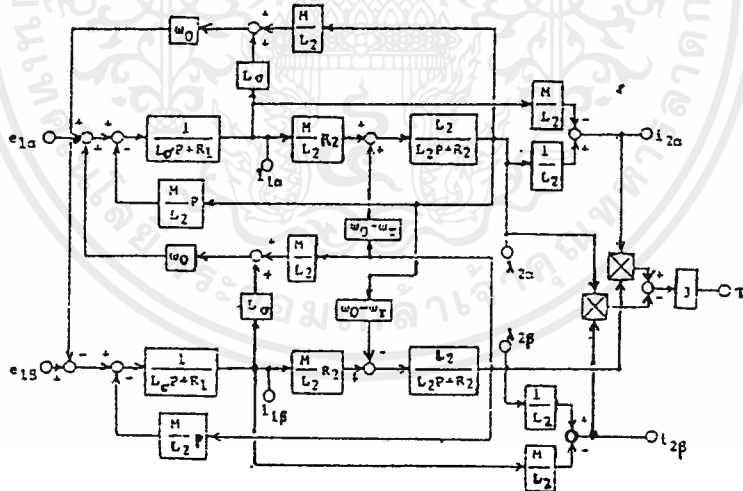
$$\begin{bmatrix} e_{1\alpha} \\ e_{1\beta} \\ e_{2\alpha} \\ e_{2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + L\rho P & -L\rho\omega_0 & \frac{M}{L_2}P & -\frac{M}{L_2}\omega_0 \\ L\rho\omega_0 & R_1 + L\rho P & \frac{M}{L_2}\omega_0 & \frac{M}{L_2}P \\ -\frac{M}{L_2}R_2 & 0 & \frac{R_2}{L_2} + P & -(\omega_0 + \omega_r) \\ 0 & -\frac{M}{L_2}R_2 & \omega_0 + \omega_r & \frac{R_2}{L_2} + P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \\ i_{2\alpha} \\ i_{2\beta} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

และแรงบิดที่สร้างขึ้นโดยมอเตอร์ (Generated Torque) คือ

$$T = 3(\lambda_{2\beta} * i_{2\alpha} - \lambda_{2\alpha} * i_{2\beta}) \quad (2.3)$$

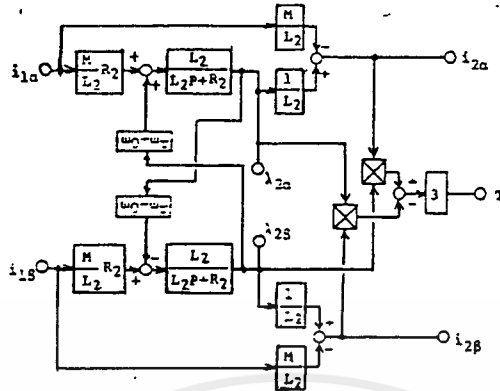
จากทั้งสมการ(2.2)และ(2.3)ทำให้ได้แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำในเชิงแรงดัน(V-Control)

ซึ่งแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 2.2 แสดงแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำในเชิงแรงดัน (V-Control)

และเมื่อสมมติให้มอเตอร์เหนี่ยวนำได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายกระแสที่ควบคุมได้จะได้แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำในเชิงกระแส(I-Control) ดังรูป



รูปที่ 2.3 แสดงแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำในเชิงกระแส (I-control)

ในการควบคุมแบบควบคุมกระแส จะมีข้อกำหนดคือ

$$i_{1\alpha} = \text{ค่าคงที่} \tag{2.4}$$

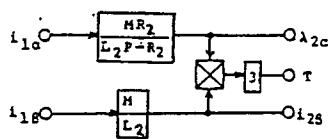
$$\omega_o = \omega_r + (R_2/L_2 * i_{1\alpha})i_{1\beta} \tag{2.5}$$

จากเงื่อนไขทั้งสองจะทำให้รูปที่ 2.3 ลดรูปลงเป็นรูปที่ 2.4 และจากสมการ(2.3)และ(2.4)ทำให้ได้สมการแรงบิดเป็น

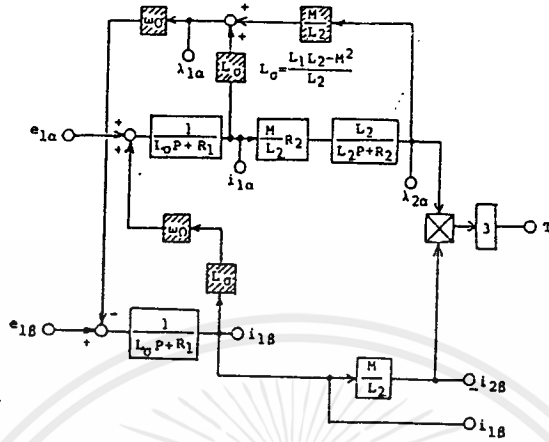
$$T = 3(M^2/L_2)i_{1\alpha}i_{1\beta} \tag{2.6}$$

จากสมการ(2.4)และ(2.5)แสดงให้เห็นว่า แรงบิดสามารถควบคุมได้โดยกระแสสร้างแรงบิด ( $i_{1\beta}$ ) โดยที่ควบคุมกระแสสร้างฟลักซ์ให้คงที่ ( $i_{1\alpha} = \text{ค่าคงที่}$ )

ในการควบคุมแบบควบคุมแรงดัน เมื่อสมการ(2.4)และ(2.5)เป็นจริงแล้ว รูปที่ 2.2 สามารถลดรูปได้เป็นรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำในเชิงกระแสที่ลดรูปด้วยสมการ(2.4)และ(2.5)



รูปที่ 2.5 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงแรงดันที่ลดรูปด้วยสมการ(2.4)และ(2.5)

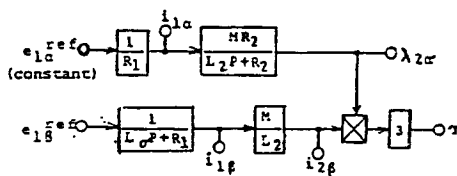
จากนั้นจึงกำหนดให้แรงดันที่สเตเตอร์สามารถควบคุมได้ดังสมการ

$$e_{1\alpha} = R_1 i_{1\alpha} - \omega_0 L \sigma i_{1\beta} \tag{2.7}$$

$$e_{1\beta} = R_1 i_{1\beta} + \omega_0 \{ [(L_1 L_2 - M^2)P + L_1 R_2] / L_2 P + R_2 \} i_{1\alpha} \tag{2.8}$$

$$= R_1 i_{1\beta} + \omega_0 L_1 i_{1\alpha} \quad (i_{1\alpha} = \text{ค่าคงที่}) \tag{2.9}$$

จากสมการ(2.7)และ(2.9)จะเห็นได้ว่า กระแสสร้างฟลักซ์และกระแสสร้างแรงบิดสามารถแยกอิสระออกจากกันได้ ทำให้สามารถลดรูปที่ 2.5 ได้เป็นรูปที่ 2.6

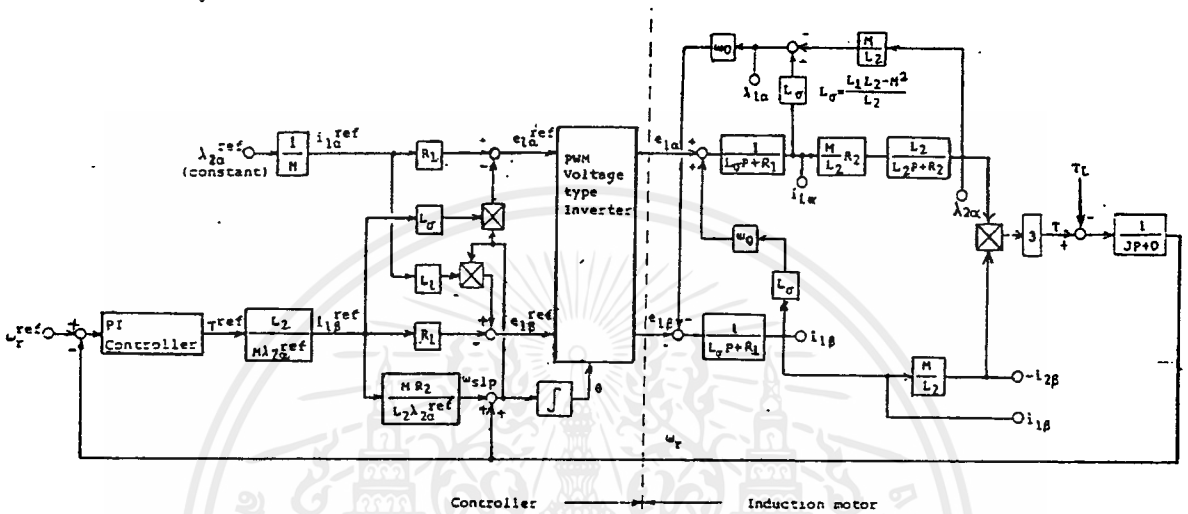


รูปที่ 2.6 แบบจำลองเชิงแรงดันที่อาศัยสมการ(2.7)และ(2.9)ช่วยลดรูป

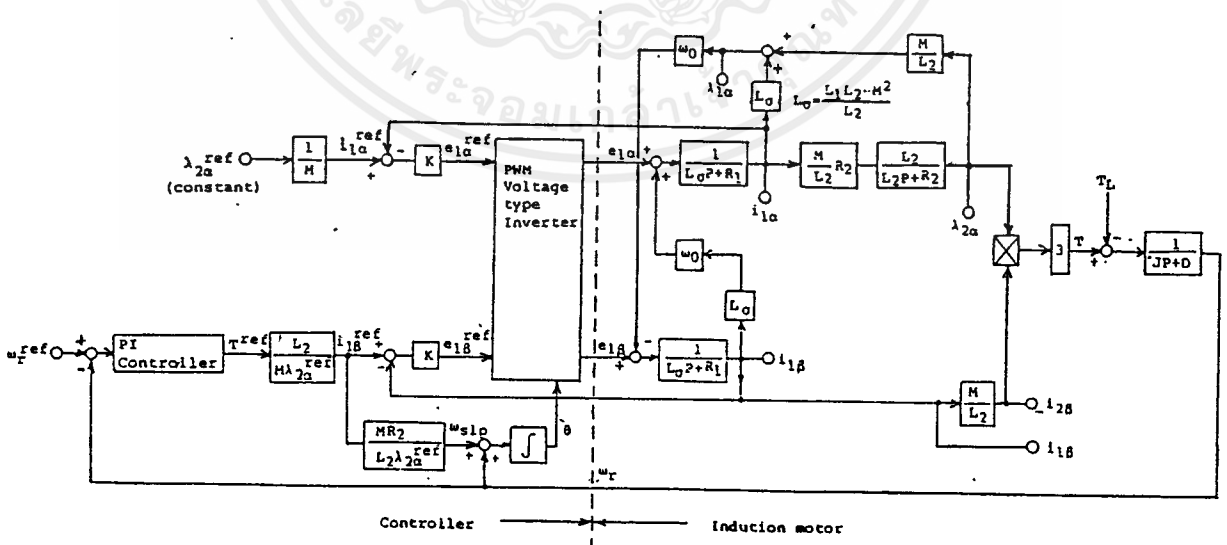
จากการควบคุมให้อิสระต่อกัน ถ้าสามารถควบคุมตามสมการ(2.3),(2.4),(2.5)และ(2.6)ได้อย่างถูกต้องก็สามารถควบคุมแรงบิดฉับพลัน (Instantaneous torque) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้เช่นเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับมอเตอร์กระแสตรง โดยการควบคุมแรงดันที่สเตเตอร์ ดังรูปที่ 2.7 แทนการควบคุมแบบกระแส ซึ่งต้องมีการป้อนกลับของกระแสดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 แบบจำลองของระบบควบคุมแบบควบคุมแรงดัน



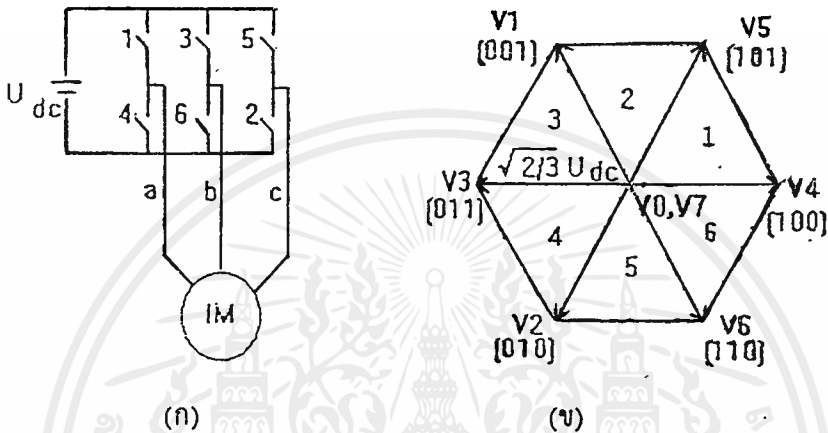
รูปที่ 2.8 แบบจำลองของระบบควบคุมแบบควบคุมกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 อินเวอร์เตอร์แบบเวกเตอร์แรงดัน

### 2.2.1 บทนำ

การสร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) สามารถทำได้โดยอาศัยสเปซเวกเตอร์ของแรงดัน (Voltage Space Vector) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.9 (ก) แบบจำลองชุดอินเวอร์เตอร์

(ข) เวกเตอร์แรงดันของชุดอินเวอร์เตอร์

จากรูป 2.9 (ก) เป็นแบบจำลองของชุดอินเวอร์เตอร์ที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟตรงและสวิตช์กำลัง 6 ตัวซึ่งสามารถสร้างแรงดันได้ 8 แบบดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) โดยอาศัยการสวิตช์ที่แตกต่างกัน 8 ครั้ง จะได้เวกเตอร์ศูนย์ คือ  $V_0, V_7$  และเวกเตอร์ขนาด  $\sqrt{2/3} * U_{dc}$  คือเวกเตอร์  $V_1$  ถึง  $V_6$  ดังนั้นเราจึงไม่สามารถสร้างเวกเตอร์แรงดันให้มีขนาดตามต้องการได้โดยตรงแต่ต้องอาศัยการสร้างแรงดันที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับแรงดันที่ต้องการแทนด้วยการสร้างเวกเตอร์ศูนย์และเวกเตอร์ที่อยู่ข้างเคียงกัน เช่น  $V_4$  และ  $V_5$  เป็นต้น

### 2.2.2 หลักการเลือกเซกเตอร์

จากรูป 2.9 (ข) บริเวณที่อยู่ระหว่างเวกเตอร์แรงดันที่มีขนาด ( $V_1$  ถึง  $V_6$ ) จะถูกเรียกเป็น เซกเตอร์ต่าง ๆ กันออกไป เช่น ระหว่าง  $V_4$  และ  $V_5$  จะถูกเรียกเป็นเซกเตอร์ 1 เป็นต้น สาเหตุที่ต้องมีการกำหนดเซกเตอร์เนื่องจาก หลังจากการทำงานของระบบที่มีโครงสร้างตามรูป 2.10 แล้วเราจะได้ค่า  $V_\alpha$  และ  $V_\beta$  และมุมระหว่างกรอบอ้างอิงของโรเตอร์ ( $\alpha - \beta$ ) กับกรอบอ้างอิงของ สเตเตอร์ (d-q)

### ป้อนให้แก่ส่วนอินเวอร์เตอร์

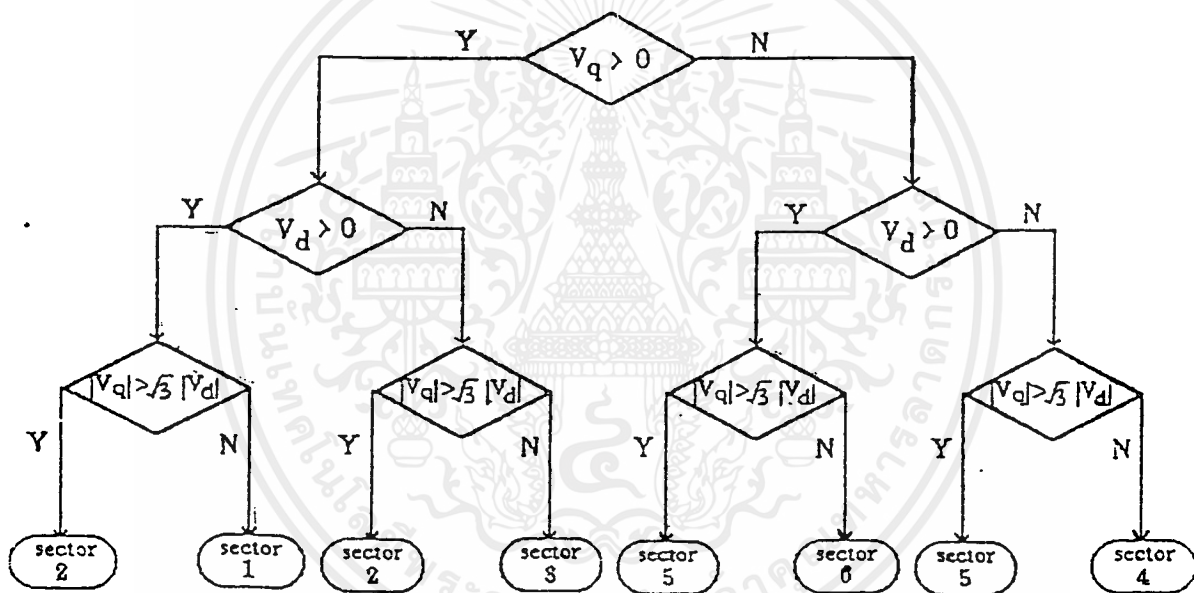
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ดังนั้นเราต้องแปลงแรงดันในกรอบอ้างอิงของโรเตอร์ให้อยู่ในรูปแรงดันในกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์ตามสมการดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \rho & -\sin \rho \\ \sin \rho & \cos \rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

เมื่อ  $\rho$  คือ มุมระหว่างกรอบอ้างอิงของโรเตอร์และกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์ จะเห็นว่าเราจำเป็นต้องคำนวณมุมของเวกเตอร์  $d$  และเวกเตอร์  $q$  ซึ่งถ้าใช้การหา  $\arctan(V_q/V_d)$  จะยุ่งยากและมีค่าผิดพลาดสูงในช่วงมุมเข้าใกล้ 90 องศา ดังนั้นอาศัยหลักการการหาเซกเตอร์ของเวกเตอร์แรงดันโดยไม่ต้องคำนวณค่ามุมของเวกเตอร์ ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนภาพวิธีการหาเซกเตอร์ของเวกเตอร์แรงดัน

### 2.2.3 หลักการสร้างสัญญาณ PWM แบบเวกเตอร์แรงดัน

เมื่อเราทราบขนาดของเวกเตอร์ประกอบในกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ ( $V_q, V_d$ ) และทราบว่าเวกเตอร์แรงดันนั้นอยู่ในเซกเตอร์ใดแล้ว เราสามารถคำนวณช่วงเวลาการสวิตช์เพื่อให้ได้เวกเตอร์ตามต้องการได้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างขนาด  $V_q$  และ  $V_d$  กับเวลาของเซกเตอร์ต่างๆ ดังนี้

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

$$\bar{v} = \bar{v}_x + \bar{v}_y = x + jy = \left( \frac{1}{2}|v_4| - \frac{1}{2}|v_1| \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2}(|v_5 + v_1|)$$

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

เซกเตอร์ที่ 3

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

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

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

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

$$|v_6| = x - \frac{y}{\sqrt{3}}; |v_2| = -x - \frac{2y}{\sqrt{3}}$$

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 2.13

หลังจากได้ค่าองค์ประกอบของเวกเตอร์แรงดันในแต่ละเซกเตอร์แล้ว สามารถหาช่วงเวลาการสวิตช์ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$t_x = \frac{|V_x|}{V_y} * T_s$$

$$t_y = \frac{|V_y|}{V_y} * T_s$$

$$t_0 = T_s - t_x - t_y$$

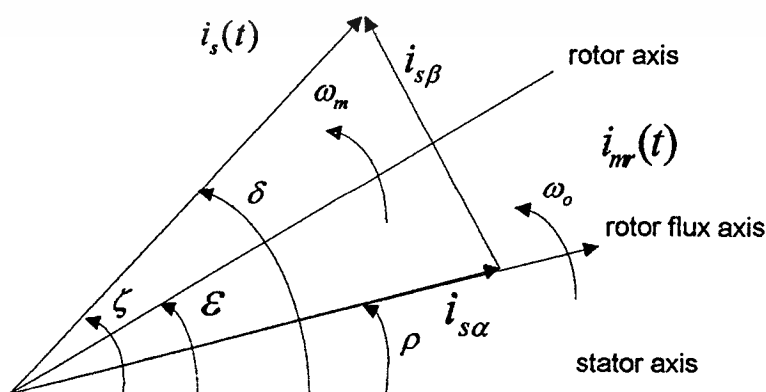
เมื่อ  $V_x$  และ  $V_y$  คือ ขนาดสูงสุดของเวกเตอร์แรงดันในแนวแกน X และแกน Y ของแต่ละเซกเตอร์

$|V_x|$  และ  $|V_y|$  คือ ขนาดของเวกเตอร์ประกอบในแนวแกน X และแกน Y ของแต่ละเซกเตอร์

$t_x$  และ  $t_y$  คือ ช่วงเวลาในการสวิตช์ให้เกิดเวกเตอร์ X และ Y ตามลำดับ

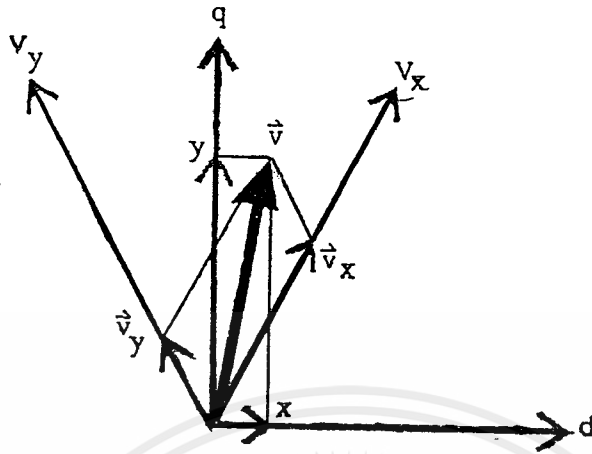
$t_0$  คือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการสวิตช์ให้เกิดเวกเตอร์  $V_0$  และ  $V_7$

$T_s$  คือ คาบเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการสวิตช์



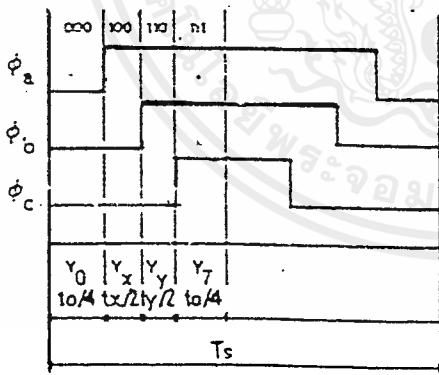
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมต่าง ๆ ของเวกเตอร์ของกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 เวกเตอร์แรงดันบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ (d-q)

ถึงแม้ว่าเราจะคำนวณช่วงเวลา  $t_x, t_y$  และ  $t_0$  ของเวกเตอร์แรงดันได้แล้วก็ตาม เรายังสามารถกำหนดรูปแบบในการสวิตช์ได้อย่างอิสระ แต่ในรายงานนี้เราจะกำหนดรูปแบบการสวิตช์ตามรูปที่ 2.14 อันจะทำให้เกิดการมอดูเลตแบบขอบเขตคู่ (double edge) ซึ่งมีลักษณะสมมาตรและมีคุณสมบัติในด้านการกระจายฮาร์โมนิกที่ดี



$\phi_a$  = สัญญาณขั้วนำเกทเฟส a  
 $\phi_b$  = สัญญาณขั้วนำเกทเฟส b  
 $\phi_c$  = สัญญาณขั้วนำเกทเฟส c

รูปที่ 2.14 แผนผังเวลารูปแบบการสวิตช์

### 2.3 ทฤษฎีวงจรกำลัง

ในบทนี้จะกล่าวถึงระบบวงจรกำลังที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นเป็นระบบซึ่งประกอบด้วยวงจรหลักๆ ดังต่อไปนี้

#### 1) วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

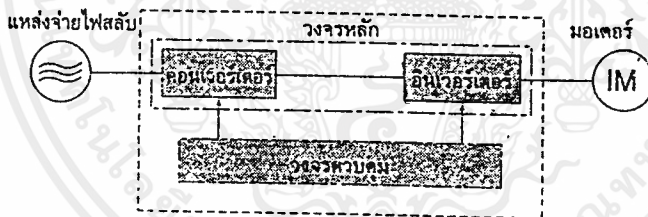
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) วงจรคอนเวอร์เตอร์
- 3) วงจรขับเคลื่อน
- 4) วงจรป้องกัน

### 2.3.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงไฟสลับที่มีความถี่และแรงดันคงที่ไปเป็นไฟสลับที่มีความถี่และแรงดันขนาดต่างๆ แหล่งจ่ายไฟที่ป้อนเป็นอินพุทของอินเวอร์เตอร์จะเป็นแหล่งจ่ายไฟสลับทั่วไปที่มีรูปคลื่นไซน์ (Sine) แต่เอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์จะมีรูปคลื่นแตกต่างจากรูปไซน์

รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ อินพุทของอินเวอร์เตอร์เป็นไฟสลับจากแหล่งจ่ายไฟ (50Hzหรือ60Hz) ไฟสลับนี้จะถูกแปลงเป็นไฟตรงโดยวงจรคอนเวอร์เตอร์ (CONVERTER) จากนั้นไฟตรงจะถูกแปลงเป็นไฟสลับที่สามารถแปรขนาดแรงดันและความถี่ได้โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ (INVERTER) วงจรทั้งสองส่วนนี้เป็นวงจรหลักที่ทำหน้าที่แปรรูปคลื่น และผ่านพลังงานของอินเวอร์เตอร์นอกจากนี้ยังมีวงจรควบคุมสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรทั้งสองนั้น

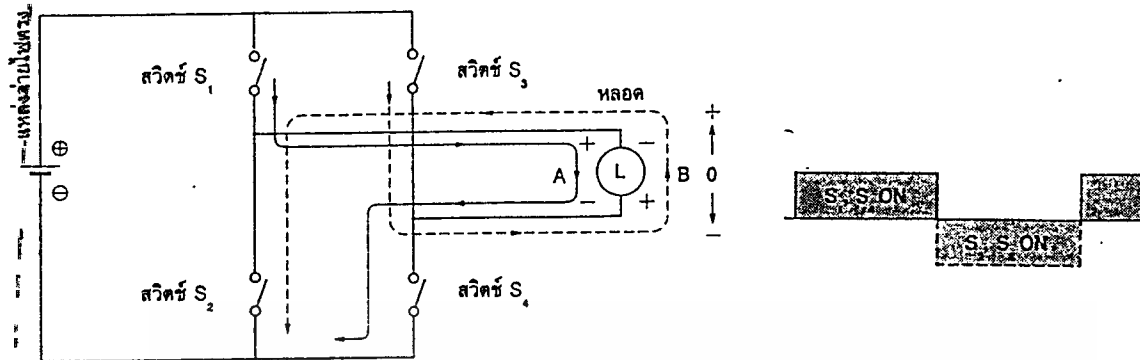


รูปที่ 2.15 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์

### 2.3.2 หลักการทำงานของภาคอินเวอร์เตอร์

#### 1) วิธีสร้างไฟสลับจากไฟตรง

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ผลิตไฟสลับได้จากแหล่งจ่ายไฟตรง เพื่อจ่ายต่อการทำความเข้าใจ จะศึกษาหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่สร้างไฟสลับเฟสเดียวก่อน โดยเปลี่ยนโพลดจากมอเตอร์มาเป็นหลอดไฟ ดังรูป 2.16



รูปที่ 2.16 วิธีการสร้าง ไฟสลับ

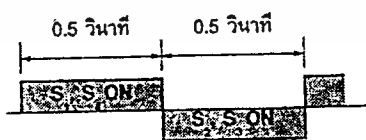
สวิทช์ 4 ตัว S1, S2, S3, S4 ซึ่งต่ออยู่ระหว่างแหล่งจ่ายไฟตรงและโหลด จะเปิดปิดสลับกันเป็นจังหวะเพื่อสร้างไฟสลับจ่ายแก่โหลดไฟ

เมื่อสวิทช์ S1 และ S4 ปิด จะมีกระแสวิ่งผ่านโหลดไฟและสวิทช์ตามทิศทาง A

เมื่อสวิทช์ S2 และ S3 ปิด จะมีกระแสไหลผ่านโหลดไฟ และสวิทช์ตามทิศทาง ซึ่งย้อนทางกับทิศทาง A ดังนั้นถ้าทำให้สวิทช์ S1 และ S4 เปิด, ปิด สลับกับสวิทช์ S2 และ S3 ก็จะทำให้เกิดกระแสไหลไปที่โหลดกลับทิศทางกัน สลับไปมาเป็นไฟสลับ

2) วิธีการแปรความถี่

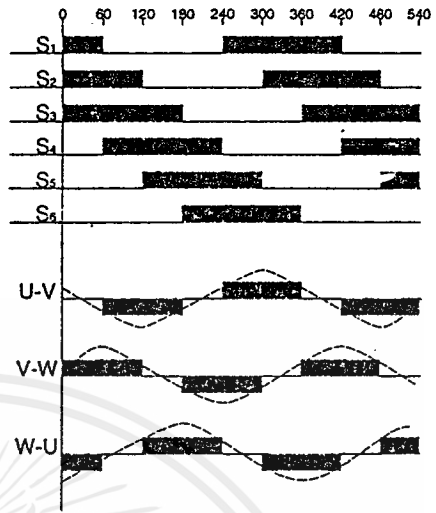
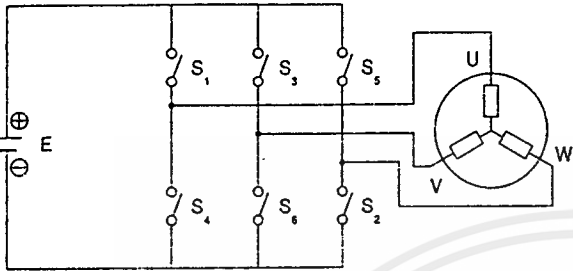
ถ้าควบคุมเวลาที่เปิดสวิทช์ S1-S4 ได้ ก็สามารถแปรความถี่ของไฟสลับได้ ตัวอย่างเช่น ให้สวิทช์ S1 และ S4 ปิด 0.5 วินาที ต่อมา สวิทช์ S2 และ S3 ปิด 0.5 วินาที และทำการเปิดปิดสลับกันเช่นนี้เรื่อยไป ดังนั้นใน 1 วินาที ไฟสลับจะวิ่งไปครบ 1 รอบ (1 cycle) ไฟสลับนี้จึงมีความถี่ครบ 1 Hz



รูปที่ 2.17 คลื่นไฟสลับความถี่ 1 Hz

3) การสร้างไฟสลับ 3 เฟส

แหล่งจ่ายไฟ



รูป 2.18 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส พื้นฐาน

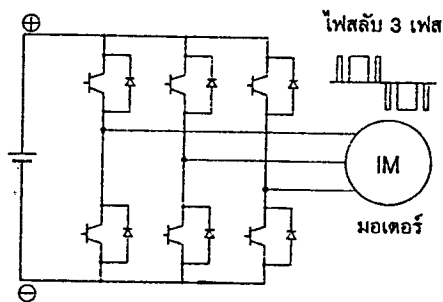
รูป 2.19 การสร้างไฟสลับ 3 เฟส

ถ้าให้สวิทช์ S1 ถึง S6 ในวงจรเปิด-ปิดตามจังหวะที่แสดงในรูป 2.19 ก็จะมีกระแสไหลผ่านขั้ว U-V, V-W และ W-U ของมอเตอร์ ตามรูปคลื่นที่แสดงในรูป 2.19 รูปคลื่นของกระแสนี้จะทำให้ความกว้างของไฟสลับและช่วงห่างระหว่างคลื่นเท่ากัน ถ้าเปลี่ยนช่วงเวลาของการเปิดปิดสวิทช์เหล่านี้ ก็จะทำให้ความถี่ของกระแสสลับเปลี่ยนไปได้ และถ้าเปลี่ยนขนาดของแรงดันไฟตรงก็จะทำให้ขนาดของแรงดันไฟสลับของรูปคลื่นเปลี่ยนไปได้เช่นกัน

4) โครงสร้างส่วนที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์

สำหรับโครงงานนี้ อินเวอร์เตอร์ จะใช้ ไอจี บี ที (INSUALATED GATE BIPOLAR TRANSISTER) เป็นอุปกรณ์ในการสวิทช์แทนสวิทช์ทั้ง 6 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.20

เมื่อต่อเอาท์พุทกับมอเตอร์ 3 เฟส และควบคุมให้ ไอจี บี ที เปิด-ปิด ตามจังหวะในรูปที่ 2.19 ก็จะทำให้มอเตอร์หมุนได้ และถ้าเปลี่ยนลำดับการ เปิด-ปิด ของ ไอจี บี ที ก็สามารถบังคับให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทางได้

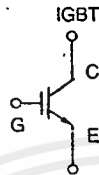


รูปที่ 2.20 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ ไอจี บี ที เป็นตัวสวิทช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่เลือกใช้ไอจีบีทีเป็นอุปกรณ์ในการสวิตช์แทนทรานซิสเตอร์ เนื่องจาก ไอจีบีที มีความสามารถใช้งานที่ความถี่ค่อนข้างสูงได้คือ กล่าวคือ มีความเร็วในการสวิตช์ซึ่งได้ดีกว่า สามารถรับกระแสได้สูงๆและช่วยลดเสียงรบกวนที่เกิดจากการสวิตช์ซึ่งได้ เนื่องจากถี่ที่ใช้อยู่ในช่วง 15~20kHz ซึ่งสูงเกินกว่าที่มนุษย์สามารถได้ยิน

### 5) การทำงานของไอจีบีที



รูปที่ 2.21 สัญลักษณ์ของ ไอจีบีที

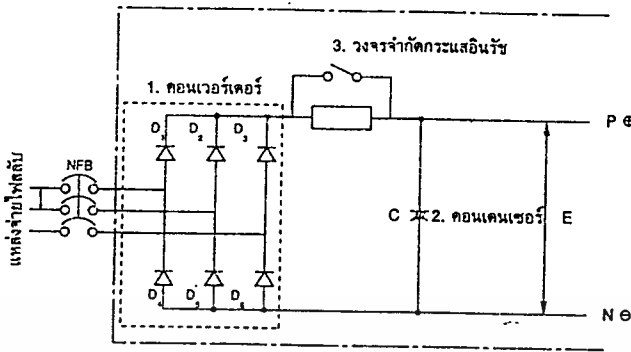
ไอจีบีที มี 3 ขาเหมือนทรานซิสเตอร์คือ คอลเลคเตอร์( Collector, C ) อิมิตเตอร์ ( Emitter, E ) แต่จะมีขาเกต(Gate, G ) แทนขาเบส เมื่อไม่จ่ายกระแสให้ขาเกต ระหว่างคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์ จะไม่นำกระแส มีสถานะเหมือนกับสวิตช์เปิด(OFF) แต่ถ้าจ่ายกระแสให้ที่ขาเกต กระแสจะไหล ระหว่างคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์ซึ่งเหมือนกับสวิตช์ปิด(ON) ซึ่งการ เปิด-ปิด ของไอจีบีที สามารถทำได้รวดเร็วกว่าทรานซิสเตอร์มาก

อนึ่ง การที่เราเลือกใช้ความถี่สูงในการสวิตช์ซึ่งเนื่องมาจากว่า ยิ่งใช้ความถี่ในการเปิดปิดสวิตช์ มากเท่าใด ก็สามารถแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเลียนแบบกราฟไซน์(Sine waveform)ได้ใกล้เคียงและละเอียดมากเท่านั้น ซึ่งเป็นผลดีต่อมอเตอร์ในด้านการควบคุมความเร็ว และแรงบิด ความไม่ละเอียดในการสร้างคลื่นเลียนแบบไซน์ ยิ่งหยาบมากจะทำให้ขณะที่หมุน ช้าๆนั้นมอเตอร์จะหมุนได้ไม่เรียบ จะเกิดการสะดุดตลอดเวลาตามลักษณะของแรงดันที่เรา ผลิตออกมา

### 2.3.3 การทำงานของภาคคอนเวอร์เตอร์

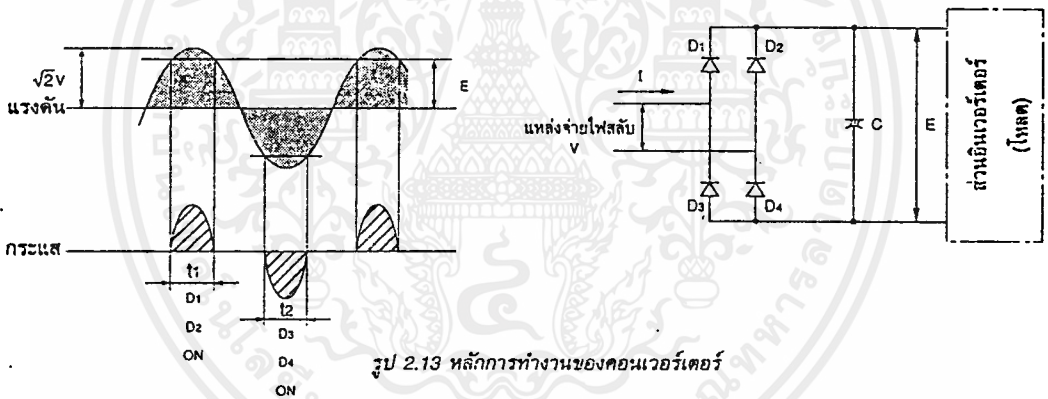
ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าแหล่งจ่ายไฟตรงที่ป้อนเป็นอินพุทของอินเวอร์เตอร์นั้นผลิตมาจาก คอนเวอร์เตอร์ วงจรส่วนนี้จะทำหน้าที่แปลงไฟกระแสสลับเป็นไฟกระแสตรง ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญคือ

1. ส่วนคอนเวอร์เตอร์
2. ส่วนคอนเดนเซอร์
3. วงจรจำกัดกระแสอินรัช(INRUSH CURRENT SUPPRESSION)



รูปที่ 2.22 วงจรภายในของคอนเวอร์เตอร์

1) หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์



รูป 2.13 หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์

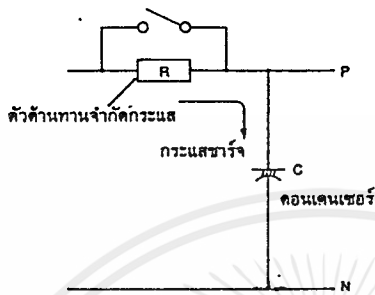
รูปที่ 2.23 หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ซึ่งแปลงไฟสลับเฟสเดียวเป็นไฟตรง อธิบายถึงรูปคลื่นของกระแสไฟสลับขาเข้าได้ว่า

- อินพุตของคอนเวอร์เตอร์เป็นไฟสลับรูปซายน์ ซึ่งมีค่า  $RMS=V$  (ค่ายอด= $\sqrt{2}V$ ) ถ้าให้แรงดันขาออกของคอนเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ  $E$  จากรูป 2.23 จะเห็นว่ามีส่วนแรงดันไฟสลับที่มีแรงดันสูงกว่าระดับ  $E$  ส่วนนี้มีช่วงเวลาเท่ากับ  $t_1$  เป็นช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่านไดโอด  $D_1$  และไหลกลับทาง  $D_4$
- แรงดันไฟสลับส่วนที่เป็นลบ ช่วงเวลาที่แรงดันต่ำกว่าระดับ  $-E$  คือช่วงเวลา  $t_2$  ช่วงเวลานี้กระแสจะไหลเข้าทางไดโอด  $D_2$  และไหลกลับทาง  $D_3$  ดังรูปที่ 2.23

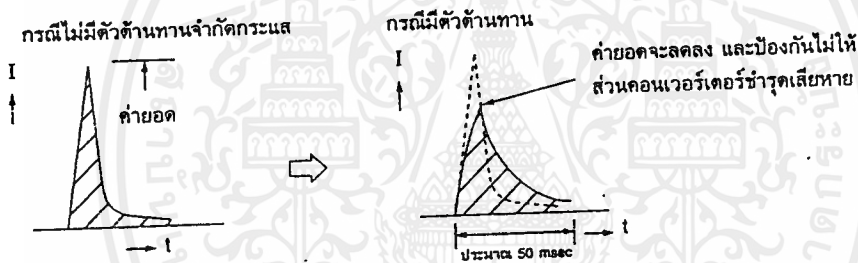
สำหรับโครงการนี้เราเลือกใช้ บริดจ์เรกติไฟเออร์ (BRIDGE RECTIFIER) 1 เฟส ทำหน้าที่แปลงแรงดันกระแสสลับเป็นกระแสตรงและมีตัวเก็บประจุในการกรองแรงดัน

2) กระแสขาเข้าเมื่อเปิดสวิตช์

เมื่อเปิดสวิตช์ครั้งแรกจะต้องมีการชาร์จ (Charge) ประจุให้แก่คอนเดนเซอร์ จึงมีกระแสนาคใหญ่ไหลเข้ามาในวงจร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการจำกัดของกระแสในรัชนี โดยใช้วงจรตามที่แสดงในรูป 2.24



รูปที่ 2.24 วงจรจำกัดขนาดของกระแสในรัชนี



รูปที่ 2.25 กระแสในรัชนี

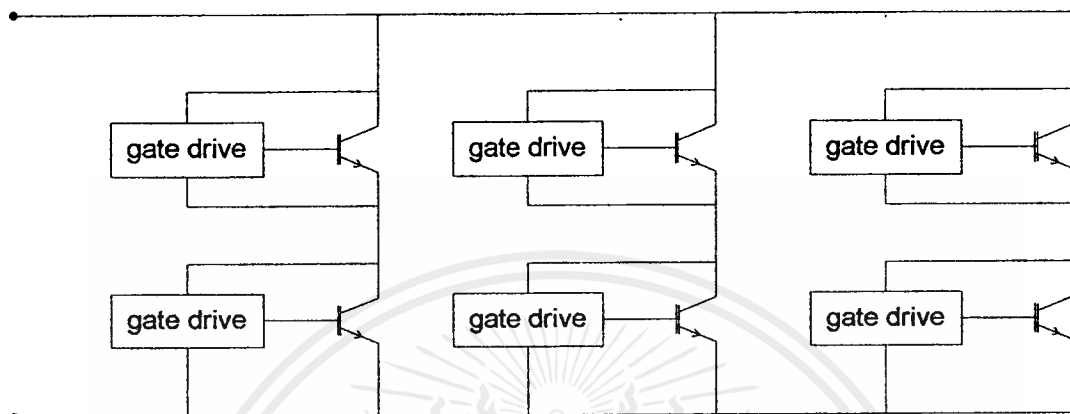
เมื่อกระแสประจุคอนเดนเซอร์จนเต็มแล้ว จึงใช้หน้าสัมผัสของรีเลย์ลัดวงจรตัวต้านทานจำกัดกระแสในเวลาไม่ต่ำกว่า 50 มิลลิวินาที

ถ้าค้อนหน้าสัมผัส (Contactor) เปิดปิดไฟเข้า อินเวอร์เตอร์ ทุกครั้งที่เปิดจะมีกระแสไหลเข้าคอนเวอเตอร์ ถ้าเปิดปิดบ่อย ๆ จะทำให้อายุการใช้งานของคอนเวอเตอร์สั้นลงและประสิทธิภาพของวงจรจำกัดกระแสจะลดลงด้วย ดังนั้นไม่ควรเปิดปิดบ่อย ๆ เนื่องจากคอน-เวอเตอร์จะมีหน้าที่สร้างแรงดันไฟตรงเท่านั้น การสคาร์ทมอเตอร์เป็นหน้าที่ของอินเวอร์เตอร์

2.3.4 วงจรขับเคลื่อน

หลังจากที่ได้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่จะ ไบแอส ไอจีบีทีแต่ละตัวสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม แต่ละตัวจะต้องถูกนำมาขยายจนสามารถที่จะจ่ายแรงดันที่คร่อมขาเบสและอิมิเตอร์ให้ได้เพียงพอซึ่งจะทำให้ไอจีบีทีสามารถทำงานได้ จากการศึกษาพบว่าค่าแรงดันนี้จะอยู่ในย่าน 18-20 โวลต์ ซึ่งในชุดของวงจรขับเคลื่อนนี้จะต้องทำชุดจ่ายไฟเลี้ยงแยกออกจากกัน ดังรูปที่ 2.26

ถ้าชุดวงจรขับเกทแต่ละชุดไม่ได้ทำการแยกกราวด์ จะพบว่าที่ขาเอมิเตอร์ของ ไอจีบีทีจะเป็นจุดเดียวกัน ซึ่งจะทำให้ทางเดินของกระแสจะไม่ไหลผ่าน โหลดและ ไอจีบีทีที่ตัวล่าง แต่จะลัดผ่าน ไอจีบีทีที่ตัวล่างลงกราวด์ โดยผ่านทางกราวด์ของวงจรขับเกทชุดบน



รูปที่ 2.26 รูปแสดงวงจรขับเกท

### 2.3.5 วงจรป้องกัน

ในโครงการนี้กำหนดให้มีฟังก์ชันการป้องกันอยู่หลายอย่าง เพื่อเป็นการป้องกันอินเวอร์เตอร์ให้มีโอกาสเสียหายได้ยาก ซึ่งแบ่งเป็นวงจรหลัก ๆ ได้ดังนี้

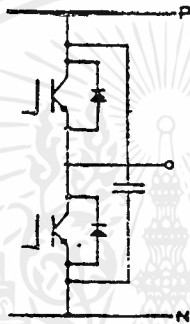
#### 1) วงจร snubber (SNUBBER)

วงจร snubber นำมาใช้ป้องกัน ไอจีบีที จากการเปิดปิดอย่างรวดเร็วทำให้เกิดแรงดันทรานเซียน (Voltage Transient) พลังงานจากสเตรย์อินดักแตนซ์ (Stray Inductance) จะแพร่ผ่าน ไอจีบีทีซึ่งทำให้เกิด โวลต์เดจโอเวอร์ชูท (Voltage Overshoot) ผ่านอุปกรณ์ ขนาดของแรงดันทรานเซียนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสเตรย์อินดักแตนซ์ และอัตราการลดลงของกระแสขณะที่มีการปิด ไอจีบีที การสวิตช์กระแสสูงๆ ในช่วงเวลาสั้นๆ ก่อให้เกิดความเสียหายจากแรงดันทรานเซียน สำหรับชุด อินเวอร์เตอร์ที่ใช้กระแสสูงๆ จะประกอบด้วย ไอจีบีทีหลายตัวต่อขนานกัน กระแสโหลดจะแบ่งผ่าน ไอจีบีทีที่ต่อขนานเท่า ๆ กัน ทำให้กระแสโหลดที่ผ่าน ไอจีบีทีแต่ละตัวลดลง อัตรา  $di/dt$  ก็ลดลง อัตรา  $di/dt$  มีขนาดเป็น 2-3000 Amp/ms ดังนั้นการใส่ใจในจุดนี้จะช่วยป้องกันอุปกรณ์ไม่ให้เกิดความเสียหายได้

มีการใช้วิธีป้องกันหลายวิธี ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะ ดีคัปปลิงคาปาซิเตอร์ (Decoupling capacitor) เพราะเหมาะสมกับกระแสนกลางที่ใช้

### ดีคัปปลิงคาปาซิเตอร์

จากที่กล่าวมาแล้วในขั้นต้นขนาดของแรงดันทรานเซียน ขึ้นอยู่กับพลังงานในรูป สเตรย์ อินดักแตนซ์หรือเรียกว่า คิซีลูปอินดักแตนซ์ (“DC Loop” inductance),  $L_s$  การป้องกันนี้จะต้องปรับปรุงการจับวางวงจร การใช้แผ่นทองแดงบางทำให้ลดขนาดของคิซีลูป การเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำเป็นวิธีที่ทำให้ สเตรย์อินดักแตนซ์ต่ำลง ใช้ตัวเก็บประจุต่อที่ที่เทอร์มินอลดังในรูป 2.27 ซึ่งจะพบว่าเป็นประโยชน์สำหรับการใช้กระแสต่ำๆถึงปานกลาง (High-frequency polypropylene film capacitors ถูกออกแบบให้ใช้กับ ไอจีบีที ที่ต่อในระยะเวลาที่เหมาะสมกับการต่อโดยตรง) อินดักแตนซ์ภายในจะมีผลน้อยมาก



รูปที่ 2.27 ดีคัปปลิงคาปาซิเตอร์

เนื่องจากอันตรายจากการทำลายอุปกรณ์โดย แรงดันเกิน (Over Voltage) ความเร็วของการเปิดของ ไอจีบีทีถูกจำกัดโดยการใช้ความต้านทานขากเกต (Gate Resistor) ที่มีค่าสูงขึ้น เมื่อใช้ดีคัปปลิงข้อจำกัดนี้จะหมดไป ค่าของตัวต้านทานขากเกต สามารถลดค่าให้ต่ำลงได้ ดังนั้นจะทำให้ไอจีบีทีเปิดได้เร็วกว่า และลดค่าการสูญเสียในสวิตช์ทั้งหมด

ค่าสแนบเบอร์คาปาซิเตอร์ (Snubber capacitor) สามารถหาได้จากค่าอินดักแตนซ์ของวงจร,  $L_s$  ค่ากระแสสวิตช์ซิ่ง,  $I_o$  DC rail voltage,  $V_{cc}$  และค่าที่ยอดแรงดัน (peak voltage) ที่ยอมรับได้,  $V_{pk}$

$$C_{SN} = L_s * I_o^2 / (V_{pk} - V_{cc})^2 \quad (2.11)$$

ที่ความถี่สูง ๆ และกระแสสูง ๆ อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดความร้อนในคาปาซิเตอร์ควรเลือกคาปาซิเตอร์ โดยพิจารณาค่าที่ได้จากสมการและสำหรับโหลดที่มีกระแสถึง 150 A และการสวิตช์ที่ความถี่ไม่มาก ดีคัปปลิงคาปาซิเตอร์จะเหมาะสมที่ใช้ในการป้องกันทรานเซียนที่เกิดจากการสวิตช์โดยปกติ

### 2) วงจรป้องกันกระแสอินรัช

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่แล้ว เพื่อเป็นการป้องกันกระแสกระชากขณะเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์ เนื่องจากผลของอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่ตัวเก็บประจุนั้นประจุอย่างรวดเร็ว จาก 0 V เป็นพิคค์ใช้งาน 310V กระแสตรง ดังนั้นเราจึงใส่ตัวต้านทานเพิ่มเข้าไปในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หว่างบริดจ์เรกติไฟเออร์กับตัวเก็บประจุ เพื่อทำการลดกระแสกระชากนี้ลง เมื่อมีการประจุตัวเก็บประจุจนเต็มแล้ว จากนั้นจะทำการลัดวงจรเพื่อตัดตัวต้านทานออกจากวงจร โดยอาศัยแมกเนติก คอนแทคเตอร์ ซึ่งจะทำการลัดวงจรตลอดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ จนกว่าจะมีการปิดและทำการเปิดเครื่องขึ้นมาใหม่อีกครั้ง ดังแสดงในรูป 2.24

### 3) ฟิลเตอร์คาปาซิเตอร์

เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการกรองแรงดันให้เรียบขึ้น โดยสามารถหาได้จากสมการ

$$\%r = V_{r(p-p)}/2\sqrt{2} * V_{dc} \quad (2.12)$$

$$C = I_0/F_r V_r \quad (2.13)$$

โดยที่  $\%r$  คือ เปอร์เซนต์รีปเปลที่ยอมรับได้

$I_0$  คือ กระแสพิคคัมมอเตอร์

$F_r$  คือ ความถี่

$V_r$  คือ แรงดันรีปเปล

### 4) วงจรป้องกันภายในตัวอินเวอร์เตอร์

กำหนดให้มีการป้องกันภายในตัวอินเวอร์เตอร์ซึ่งประกอบไปด้วย การป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกิน ,การป้องกันแรงดัน ไฟฟ้าตกและการป้องกันกระแสเกิน ซึ่งใช้หลักการการแบ่งแรงดันเป็นค่าต่างๆ ตามที่ต้องการเพื่อเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงที่ได้ตั้งไว้ในการส่งสัญญาณเมื่อเกิดการผิดปกติ

## บทที่ 3

## การคำนวณและการสร้าง

อินเวอร์เตอร์ที่ทำการออกแบบ สามารถแบ่งการทำงานได้เป็น 2 ส่วนคือ

- ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์
- ส่วนวงจรกำลัง

ซึ่งบล็อกไดอะแกรมของระบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 สามารถอธิบายการทำงานในแต่ละส่วนของระบบได้ดังนี้

### 3.1 ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้แบบ 32 บิต ทำงานควบคุมอินเวอร์เตอร์โดยอาศัยทฤษฎีการควบคุมแบบเวกเตอร์ ควบคุมการสร้างแรงดันผ่านหลักการสร้างสัญญาณ PWM แบบสเปซเวกเตอร์(space vector)เพื่อให้วงจรกำลังสร้างสัญญาณตามที่คำนวณต่อไป

โครงสร้างของระบบควบคุมแบบเวกเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งสามารถอธิบายลำดับการทำงานของโปรแกรมระบบควบคุมมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

**ขั้นตอนที่ 1** โหลดค่าเริ่มต้นและกำหนดค่าโหมคการใช้งานต่าง ๆ

ในส่วนนี้เป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรและกำหนดค่าในรีจิสเตอร์ต่าง ๆ เพื่อกำหนดโหมคการทำงานของ A/D และไทม์เมอร์(Timer)

**ขั้นตอนที่ 2** รับค่าความเร็วอ้างอิง(Get speed command)

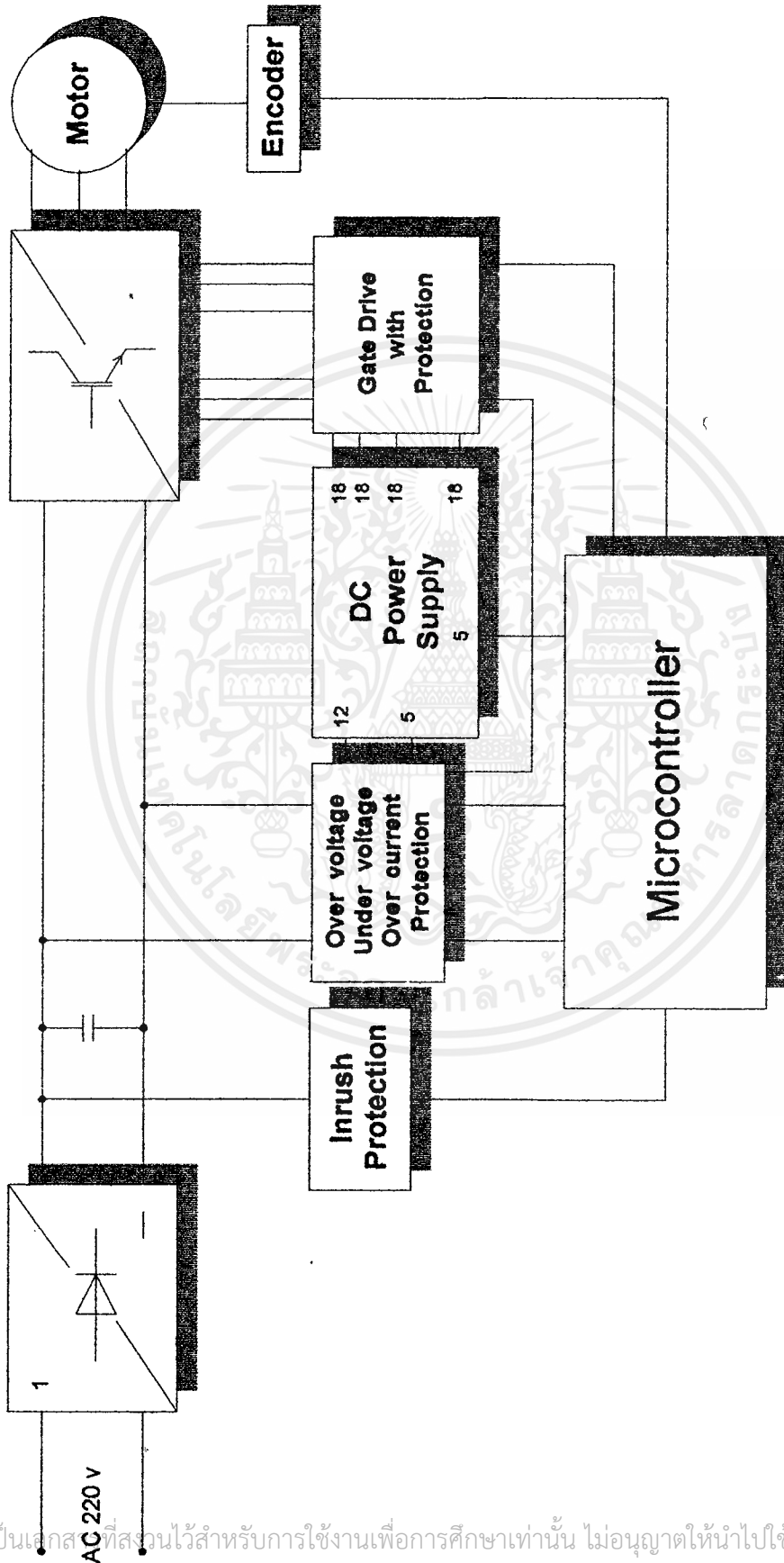
ในส่วนนี้ผู้ใช้สามารถส่งความเร็วอ้างอิงได้ในรูปความถี่(เฮิร์ต)ผ่านความต้านทานปรับค่าได้ โดยโปรแกรมจะทำการแปลงค่าความถี่ให้เป็นความเร็วอ้างอิงในหน่วย เรเดียน/วินาที

**ขั้นตอนที่ 3** รับค่าความเร็วป้อนกลับ(Detect rotor speed)

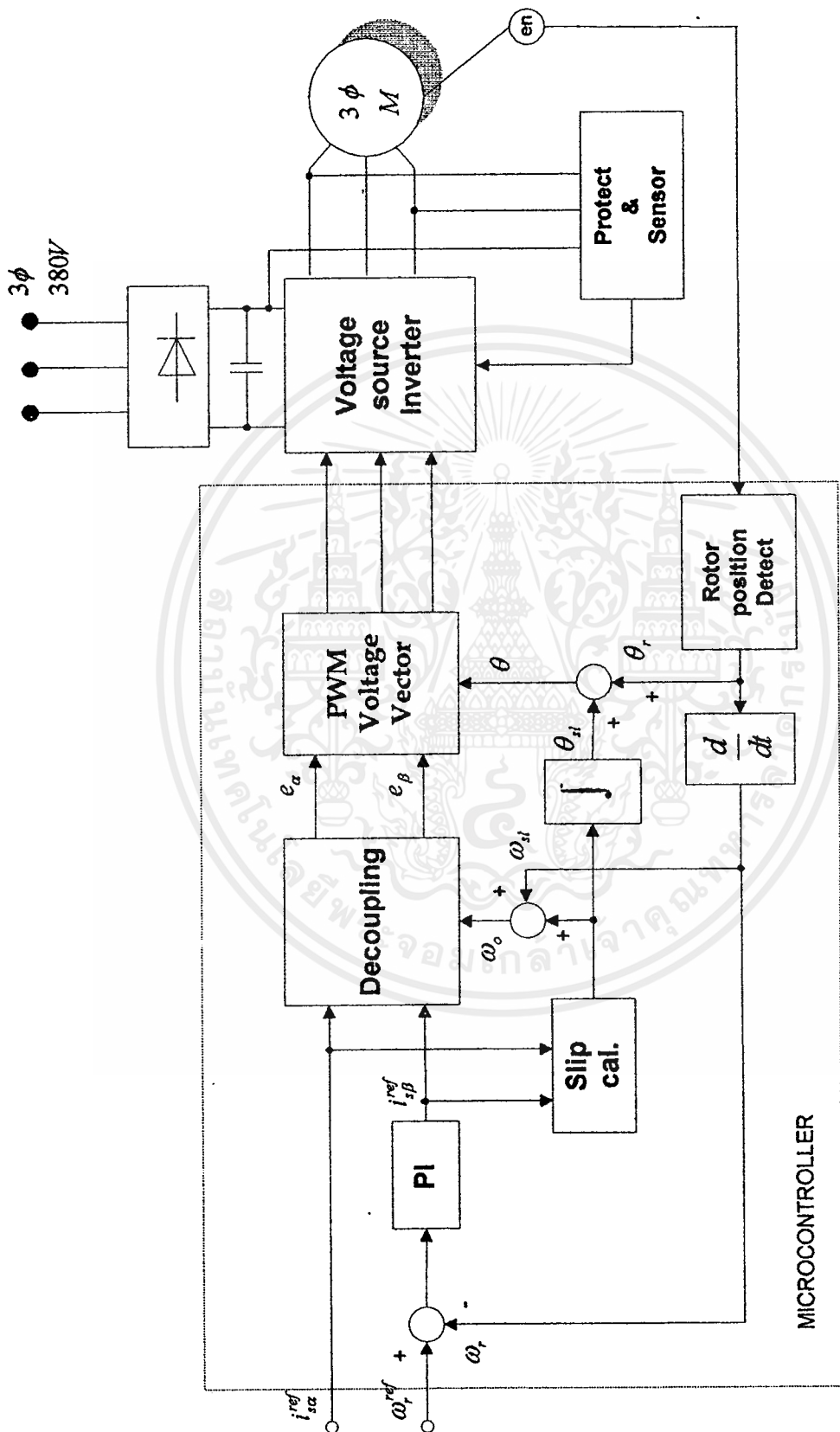
การควบคุมแบบเวกเตอร์เป็นการควบคุมวงรอบปิด ดังนั้นต้องมีการป้อนกลับความเร็วเพื่อนำมาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน โดยผ่านตัวตรวจจับตำแหน่ง(Encoder)และนำค่าที่ได้แปลงเป็นความเร็วป้อนกลับสู่การทำงานในขั้นตอนต่อไป

**ขั้นตอนที่ 4** ตัวควบคุมแบบพีไอ(PI Control)

จะรับค่าความเร็วอ้างอิงและค่าความเร็วป้อนกลับมาคำนวณหาความคลาดเคลื่อนแล้วทำการชดเชยเพื่อให้ความเร็วเข้าใกล้ความเร็วอ้างอิงมากที่สุด โดยการทำตัวควบคุมแบบพีไอจะเป็นตัวควบคุมการจ่ายกระแสสร้างแรงบิดอ้างอิง



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงระบบทั้งหมด



รูป 3.2 โครงสร้างของระบบควบคุมมอเตอร์เฟสสามแบบเวกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่าแห่งโรเตอร์ฟลักซ์

ทำได้โดยคำนวณความถี่ชดเชย ( $\omega_s$ ) จากการรับค่ากระแสสร้างแรงบิดผ่านส่วนหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง  $1/(1+sT_r)$  แล้วแปลงให้เป็นมุมโรเตอร์ฟลักซ์ที่ควรชดเชยให้ระบบ จากนั้นจะได้ค่าแห่งของโรเตอร์ฟลักซ์ใหม่ที่ระบบต้องการ

### ขั้นตอนที่ 6 คำนวณส่วนการควบคุมแยกอิสระ (Decoupling Control)

โดยการคำนวณแรงดันในแนวแกนโรเตอร์ฟลักซ์ตามสมการ

$$e_\alpha = R_s i_{s\alpha}^{ref} - \omega_0 \sigma L_s i_{s\beta}^{ref}$$

$$e_\beta = R_s i_{s\beta}^{ref} + \omega_0 L_s i_{s\alpha}^{ref}$$

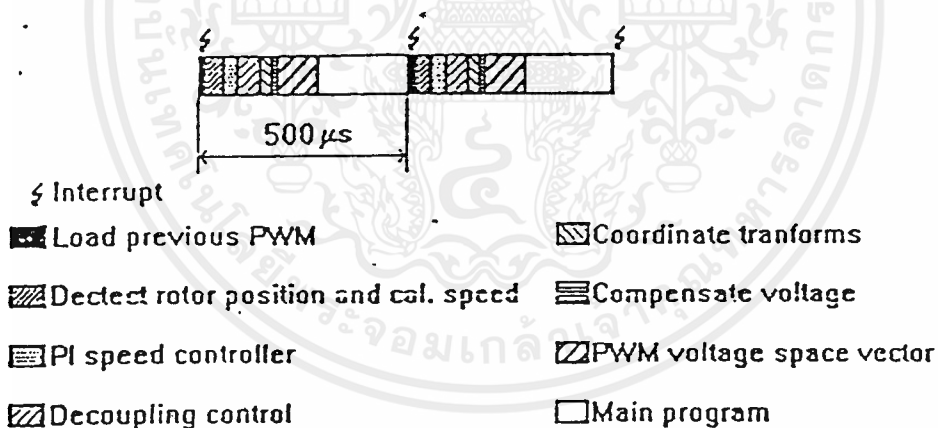
### ขั้นตอนที่ 7 คำนวณแรงดันในแนวแกนสเตเตอร์

ตามสมการ 2.10 ดังที่กล่าวไว้แล้ว

### ขั้นตอนที่ 8 ส่วนสร้างสัญญาณ PWM ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์

จากการทำงานตามขั้นตอนนี้จะได้รูปแบบเวลาการสวิทช์ส่งให้แก่วงจรกำลังต่อไป

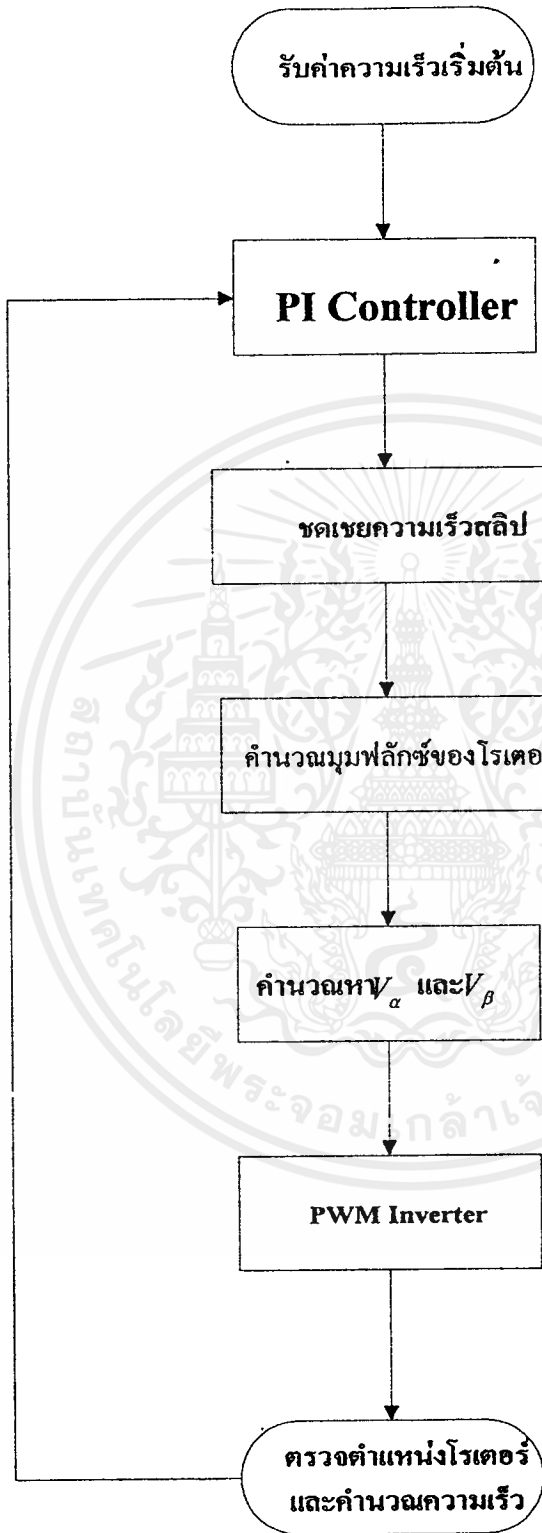
และในการคำนวณในแต่ละครั้งจะใช้เวลาอินเตอร์รัพท์ที่ทุกๆ 500 ไมโครวินาทีซึ่งแสดงโดยอะแกรมเวลาได้ดังรูป 3.3



ซึ่งมีโฟลวชาร์ทของการทำงานของซอฟต์แวร์ดังรูปที่ 3.4

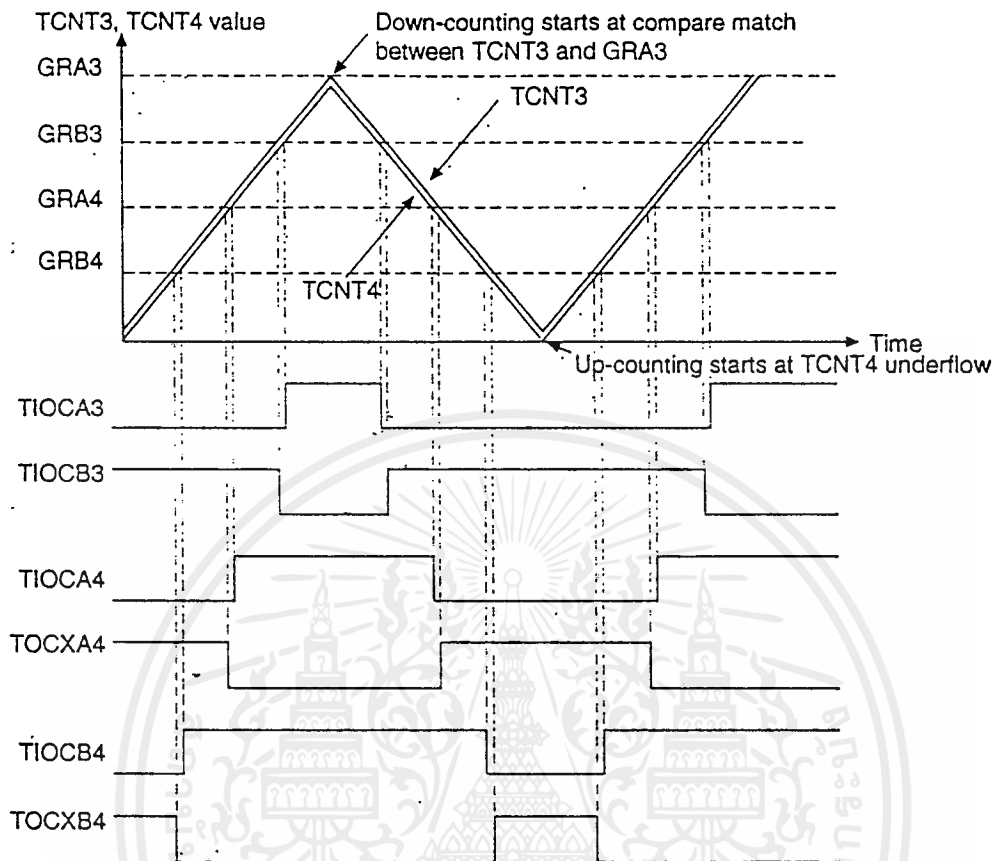
การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ในส่วนการสร้างสัญญาณ PWM

เมื่อได้รูปแบบเวลาการสวิทช์แล้ว สามารถสร้างสัญญาณ PWM ออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์ได้โดยตรงโดยผ่านโหมดการทำงานของส่วน PWM ภายใน ซึ่งอธิบายการทำงานได้ดังรูป 3.5



รูป 3.4 โฟลทชาร์ทการทำงานของซอฟต์แวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.5 แสดงโหมดการสร้างสัญญาณ PWM ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์

จากรูป 3.5 ไทม์เมอร์ช่องที่ 3 และ 4 ซึ่งมีช่วงเวลาการนับแตกต่างกันจะทำให้เกิดการสร้างส่วนประวิงเวลา(Dead Time) ในการสร้างสัญญาณสวิตช์แบบ PWM ทำได้โดยการตั้งค่ารีจิสเตอร์ GRA3 เป็นตัวกำหนดคาบเวลาการสวิตช์และการตั้งค่ารีจิสเตอร์ GRB3, GRA4 และ GRB4 จะเป็นตัวกำหนดความกว้างพัลส์ของแต่ละเฟส

### 3.2 ส่วนวงจรกำลัง

อินเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้นนี้นำมาใช้กับมอเตอร์ขนาด 1 กิโลวัตต์ 3 เฟส 220/380 โวลต์ ซึ่งมีกระแสพิคคที่ 4.32 แอมป์แปร์ ซึ่งอุปกรณ์ที่จะกล่าวถึงมีดังต่อไปนี้

1. บริดจ์เรกติไฟเออร์(Bridge Rectifier) เราเลือกใช้ขนาด 600 โวลต์ 35 แอมป์แปร์ ในการแปลงแรงดันกระแสสลับเป็นกระแสตรง

2. ฟิลเตอร์คาปาซิเตอร์(Filter Capacitor) จากสมการ 2.11 และ 2.12 จะได้ค่าตัวเก็บประจุขนาด 2040 ไมโครฟารัด ที่  $\%r=2$ , ที่ความถี่ 100 เฮิร์ต และแรงดันกระแสตรง 310 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ชุด โมดูลกำลัง (Power Module) ทำหน้าที่เปิดปิดไฟกระแสตรงที่เข้ามาจากตัวเก็บประจุ เป็นไฟกระแสสลับ ซึ่งภายในประกอบด้วยไอจีบีที 6 ตัวและมีรีคอปเวอริไดโอดต่อทุกตัวซึ่งแต่ละตัวจะทำงานตามคำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ เราเลือกใช้ชุดโมดูลนี้ขนาด 600 โวลต์ 20 แอมป์แปร์

4. วงจรขับเกท วงจรขยายสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปขับ ไอจีบีที โดยเราเลือกใช้อุปกรณ์ขับเกท EXB840 ซึ่งมีลักษณะการต่อวงจรดังรูป 3.6 จะเห็นได้ว่า ภายในตัวอุปกรณ์นี้มีการป้องกันการลัดวงจรภายในตัวมันและมีออปโตทำหน้าที่แยกกราวด์ ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของชุดขับเกททำให้ป้องกันการอินพุตกับเอาต์พุตได้

#### หลักการทํางาน

ในขณะที่ขา 15 มีค่าเป็น +5 โวลต์และมีสัญญาณพีคดับลิวเอ็มเข้ามาที่ขา 14 จะได้สัญญาณ ออกที่เอาต์พุตของชุดขับเกทในขนาดเท่ากับแหล่งจ่ายให้ซึ่งใช้ประมาณ 18 โวลต์และรูปสัญญาณจะ กลับกับทางอินพุต เมื่อเกิดการวัดวงจรขึ้นจะส่งสัญญาณออกจากขา 2 เข้าขา 5 โดยผ่านออปโตได้ภายนอกมีผลทำให้จุด X มีค่าเปลี่ยนจาก +5 โวลต์เป็น 0 โวลต์มีผลทำให้ตัดสัญญาณที่ขา 15 ของชุดขับ เกทออกทำให้ชุดขับเกทไม่ทำงานและส่งสัญญาณไปตัดการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่ง ทำงานร่วมกับวงจรป้องกันกระแสเกิน 1.7 เท่า

5. วงจรสับเบรค เป็นการป้องกันแรงดันทรานเซียนท์ผ่านไอจีบีทีขณะเปิดปิดอย่างรวดเร็ว โดยในที่นี้จะใช้วิธีตัดปลั๊กคาปาซิเตอร์ โดยอาศัยสมการที่ 2.11 โดยมี

$$L_s = 1\mu\text{H/m (ความยาวสาย 0.27 m)}$$

$$I_0 = \text{กระแสสวิทช์ซิ่ง (40 A)}$$

$$V_{pk} = \text{แรงดันที่ยอมรับได้ (360 V)}$$

$$V_{\infty} = \text{แรงดันปรกติ (310 V)}$$

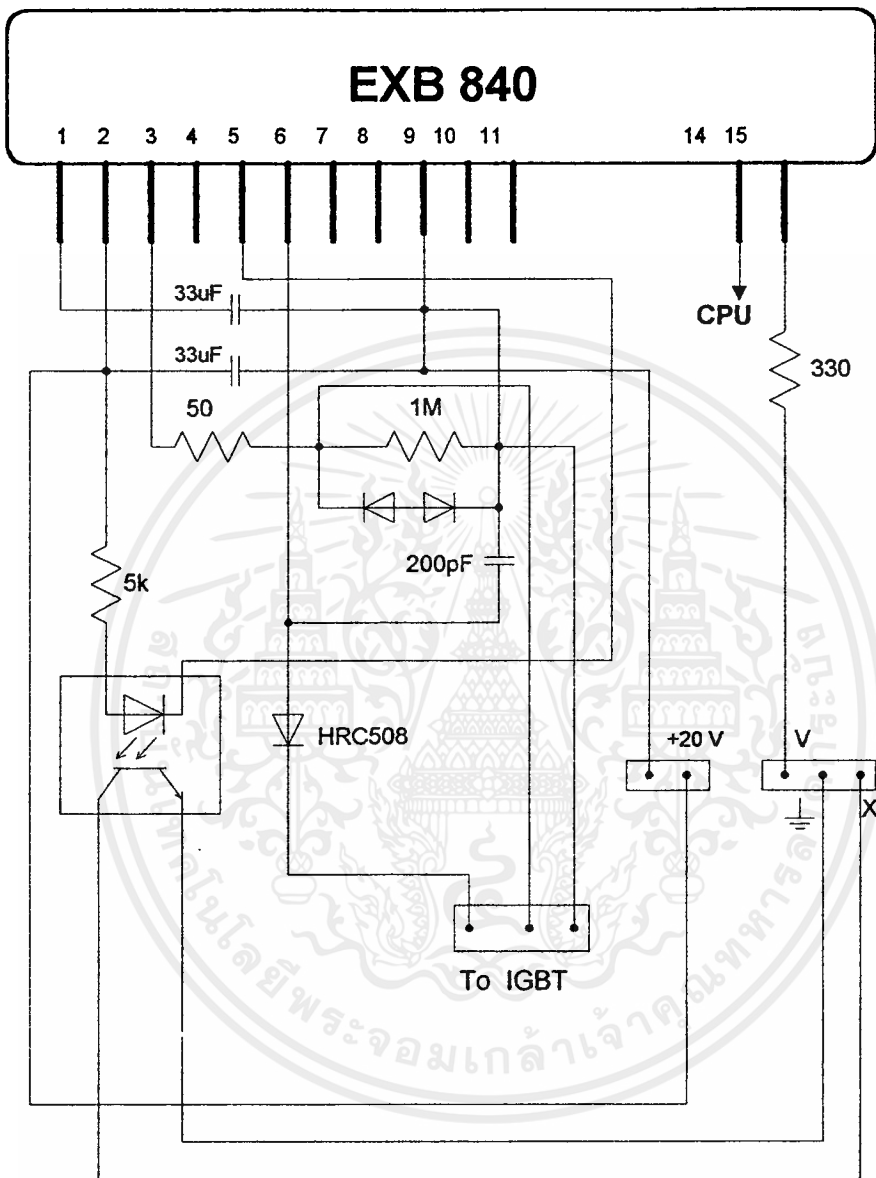
จะได้ค่าสับเบรคไม่ต่ำกว่า 0.17  $\mu\text{F}$

6. วงจรป้องกันกระแสอินรัช เราเลือกใช้ความต้านทาน 30 W 30  $\Omega$  เป็นตัวต้านทานลด กระแสขณะเดินเครื่องและใช้แมกเนติกส์คอนแทกเตอร์ในการลัดวงจรขณะมอเตอร์ทำงาน

#### หลักการทํางาน

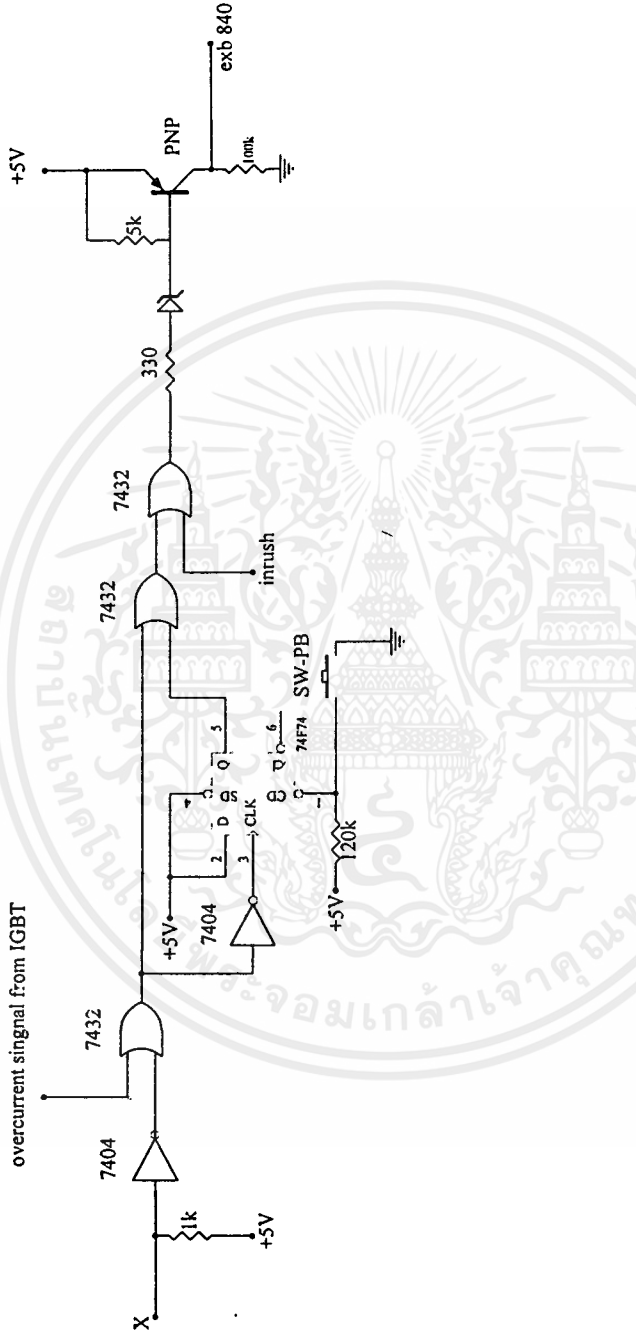
วงจรแสดงดังรูป 3.8 ขณะเริ่มเปิดเครื่องไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณ +5 โวลต์ ผ่านนอทเกตทำให้ออปโตไดโอดไม่ทำงานจนเมื่อเวลาผ่านไป 5 วินาทีสัญญาณจะเปลี่ยนเป็น 0 โวลต์ เมื่อผ่านนอทเกตแล้วทำให้ออปโตทำงาน ส่งผลให้ทรานซิสเตอร์ในวงจรทำงานซึ่งส่งแรงดัน 12 โวลต์ไปที่รีเลย์จนเมื่อรีเลย์ทำงานไฟ 220 โวลต์จะผ่านไปเลี้ยงคอยล์ของแมกเนติกคอนแทกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.6 การต่อวงจรของชุดขับเกท

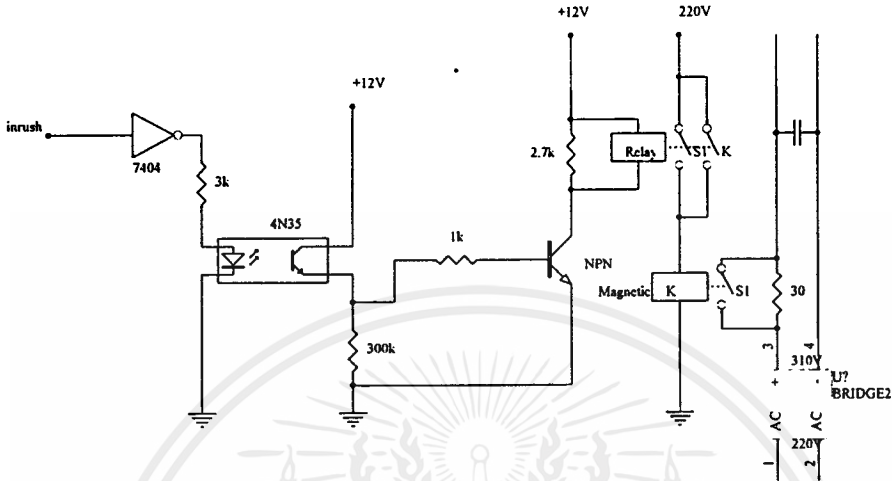
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.7 วงจรป้องกันกระแสเกินขดขั้วเก็บเกาและไอจีบีที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้แมคนตึกคอนแทรกเตอร์ทำงานลัดตัวด้านทานกระแสออกจากวงจรตลอดช่วงการทำงานของมอเตอร์



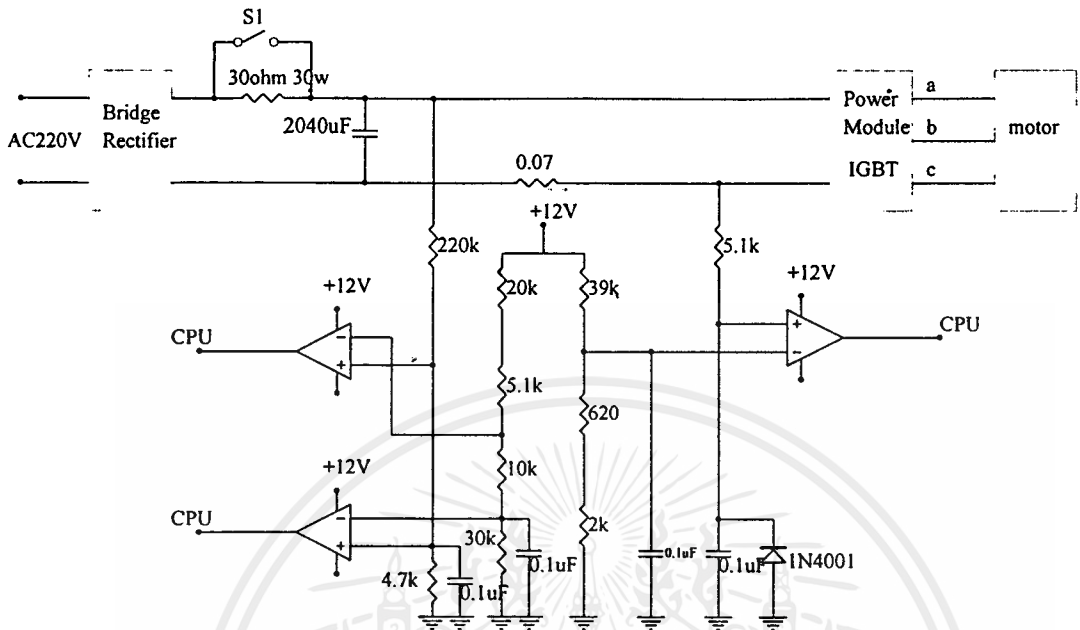
รูป 3.8 วงจรป้องกันกระแสอินรัช

7. วงจรป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกิน การทำงานของวงจรจะใช้วงจรเปรียบเทียบ โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LM339 โดยอาศัยการแบ่งแรงดันซึ่งกำหนดแรงดันอ้างอิงเป็น 375 โวลต์กระแสตรง และอีกขาอีกด้านหนึ่งใช้ตรวจจับแรงดันจริง เมื่อระดับแรงดันที่ตรวจจับได้มีค่ามากกว่าระดับแรงดันที่ขาอ้างอิงจะทำให้มีการส่งสัญญาณออกที่ระดับแรงดัน 12 โวลต์ และจะทำการส่งสัญญาณนี้ไว้ตลอดเวลากว่าระดับแรงดันที่ตรวจจับต่ำกว่าระดับแรงดันอ้างอิง สัญญาณแรงดัน 12 โวลต์นี้จะถูกส่งไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยผ่านออปโตไดโอด เพื่อแปลงแรงดันให้เป็น 5 โวลต์ก่อนดังรูป 3.9

8. วงจรป้องกันแรงดันไฟฟ้าตก ใช้หลักการเดียวกับวงจรป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกิน ระดับแรงดันไฟฟ้าตกคิดที่ 85% ของพิกัดแรงดันใช้งานซึ่งมีค่าประมาณ 263 โวลต์กระแสตรง เมื่อแรงดันที่ตรวจจับต่ำกว่าแรงดันอ้างอิง สัญญาณเอาต์พุตของไอซีจะเปลี่ยนจาก 1 เป็น 0

9. วงจรป้องกันกระแสเกิน 1.7 เท่าของพิกัด มอเตอร์ที่ใช้งานในโรงงานนี้มีกระแสที่พิกัด 4.32 แอมป์แปร์ ดังนั้นค่ากระแสที่ 1.7 เท่าของกระแสพิกัดคือ 7.344 แอมป์แปร์ เป็นค่ากระแสที่ระดับแรงดันอ้างอิง และในวงจรนี้มีตัวต้านทานตรวจจับกระแสต่อดัง รูป 3.9 ซึ่งเราจะนำค่ากระแสที่ตรวจจับได้มาเปรียบเทียบกับกระแสที่ระดับอ้างอิง ในขณะที่ใช้งานหากเกิดกระแสเกินกว่าระดับที่อ้างอิง จะส่งสัญญาณตัดการทำงานของชุดขับเคลื่อนและสั่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์หยุดส่งพัลส์ทันที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.9 วงจรป้องกันทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

## การทดลองและผลการทดลอง

## 4.1 การจำลองระบบ

ในการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ โดยการควบคุมแรงดันนี้ได้ใช้โปรแกรม Simulink ซึ่งเป็นเครื่องมือหนึ่งในโปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน 4.2 เป็นโปรแกรมช่วยในการจำลองระบบ ซึ่งโปรแกรม Simulink นี้เป็นโปรแกรมที่ใช้งานได้ง่ายด้วยการทำงานในลักษณะของบล็อกไดอะแกรมและสามารถดูผลของการจำลองระบบได้ง่าย ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์ระบบได้สะดวกขึ้น

ซึ่งค่าคงที่ของระบบที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์และค่าคงที่อื่นๆ ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก... เป็นดังนี้

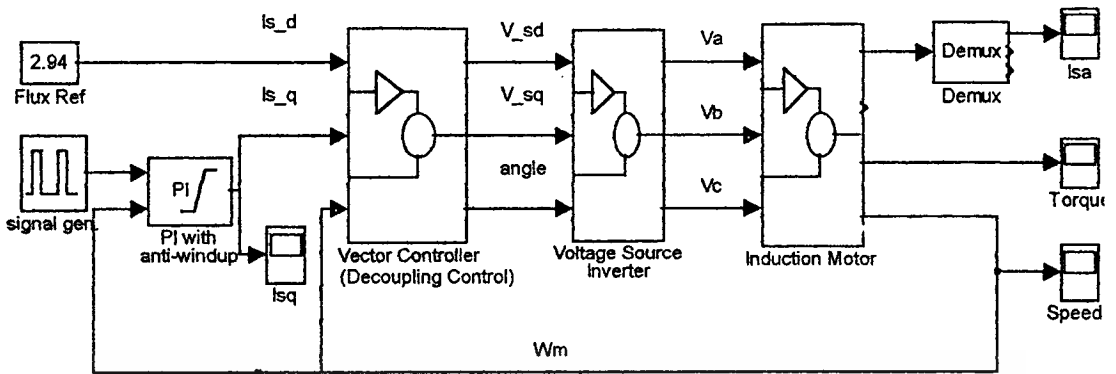
ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์

$$\begin{aligned} R_s &= 2.87 \Omega \\ R_r &= 0.71 \Omega \\ L_s &= 0.056 \text{ H} \\ \sigma L_s &= 0.006 \text{ H} \\ L_m = M = L_r &= 0.05 \text{ H} \\ J &= 0.014 \text{ Kg-m}^2 \end{aligned}$$

ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI

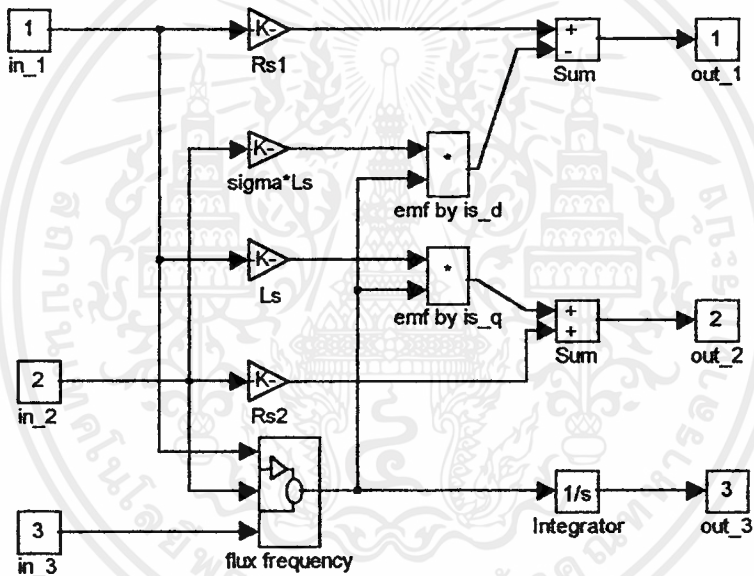
$$\begin{aligned} K &= 2 \\ T_i &= 0.03 \\ T_t &= 0.32 \\ b &= 10 \end{aligned}$$

จากบล็อกไดอะแกรมในรูป 2.10 สามารถสร้างแบบจำลองได้ดังนี้



Model of Vector Control With Voltage

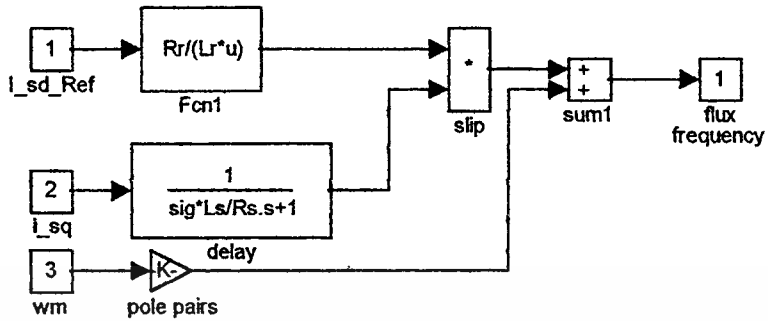
รูปที่ 4.1 แสดงระบบทั้งหมดของการควบคุมมอเตอร์แบบเวกเตอร์



Vector Controller  
(Decoupling Control)

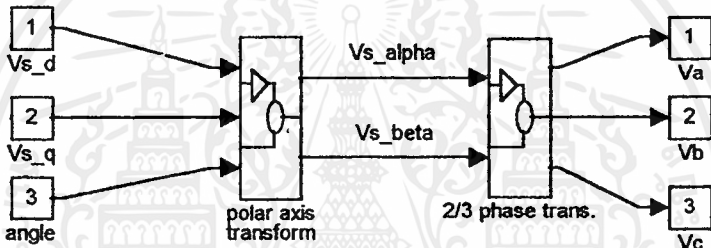
รูปที่ 4.2 แสดงส่วนคำนวณการควบคุมแบบแยก(Decoupling control)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



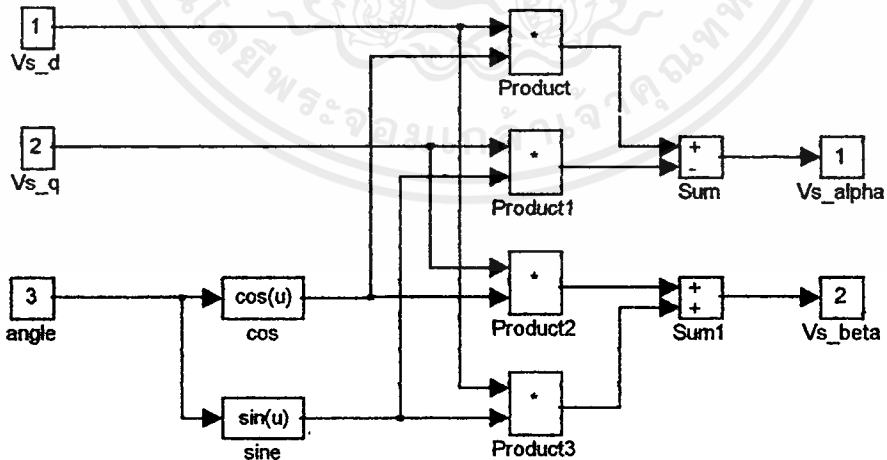
Flux frequency

รูป 4.3 แสดงส่วนคำนวณความถี่ฟลักซ์(Flux Frequency)



Voltage Source Inverter

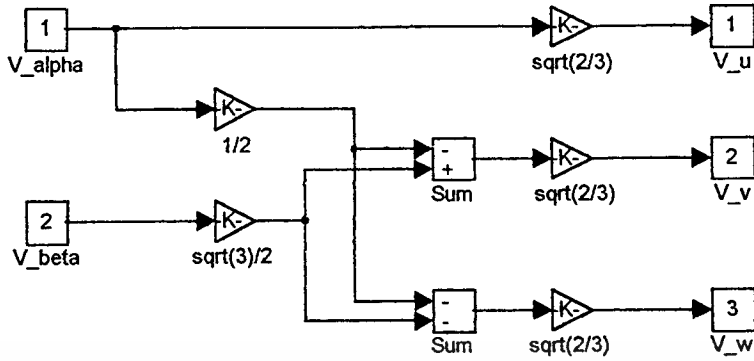
รูป 4.4 แสดงส่วน แปลงค่าแรงดัน



axis transformation using flux phase angle

รูป 4.5 แสดงส่วนที่แปลงค่าแรงดันเป็น  $V_\alpha$  และ  $V_\beta$

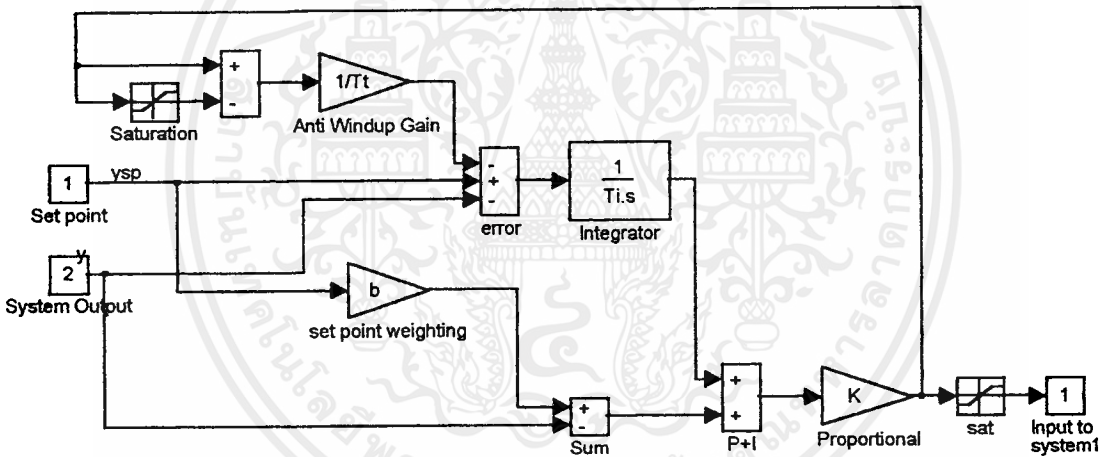
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



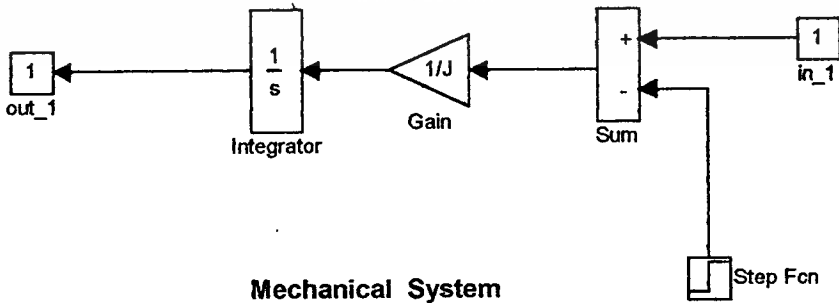
2/3 phase transform.

รูป 4.6 แสดงส่วนแปลงค่าแรงดันจาก  $V_{\alpha}$ ,  $V_{\beta}$  เป็น  $V_u$ ,  $V_v$  และ  $V_w$

PID controller with set point weighting and anti-windup.



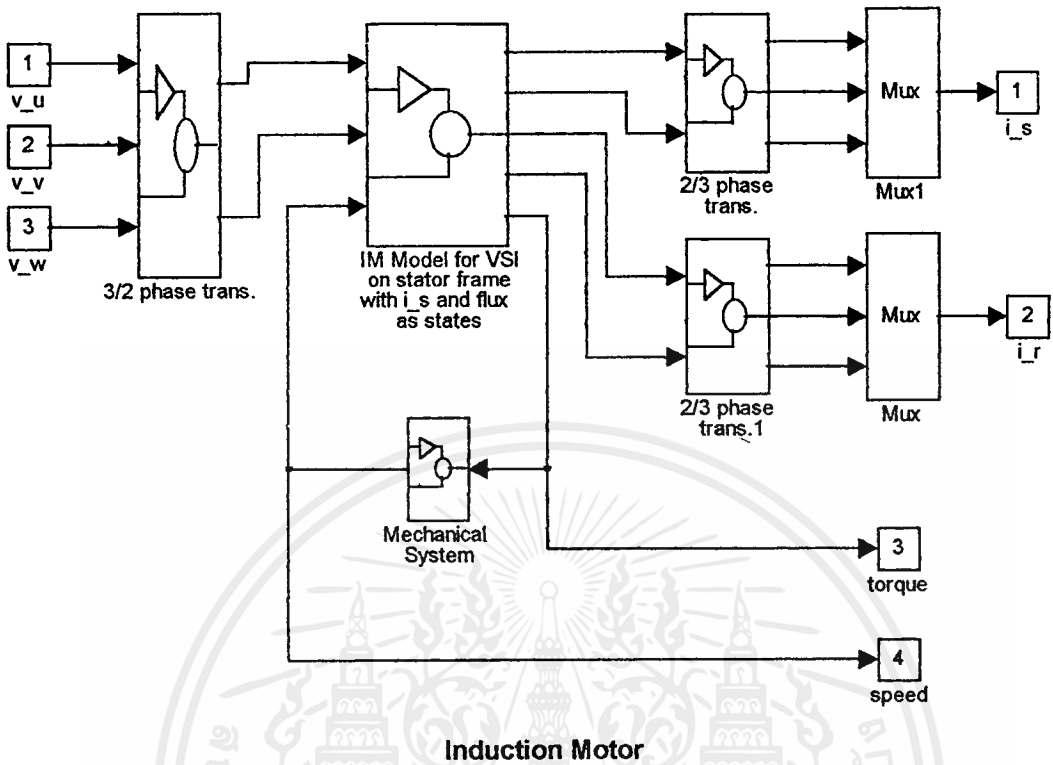
รูป 4.7 แสดงส่วนของตัวควบคุมแบบ PI



Mechanical System

รูป 4.8 แสดงส่วนของโมเมนต์ความเฉื่อยและ โหลดจำลอง

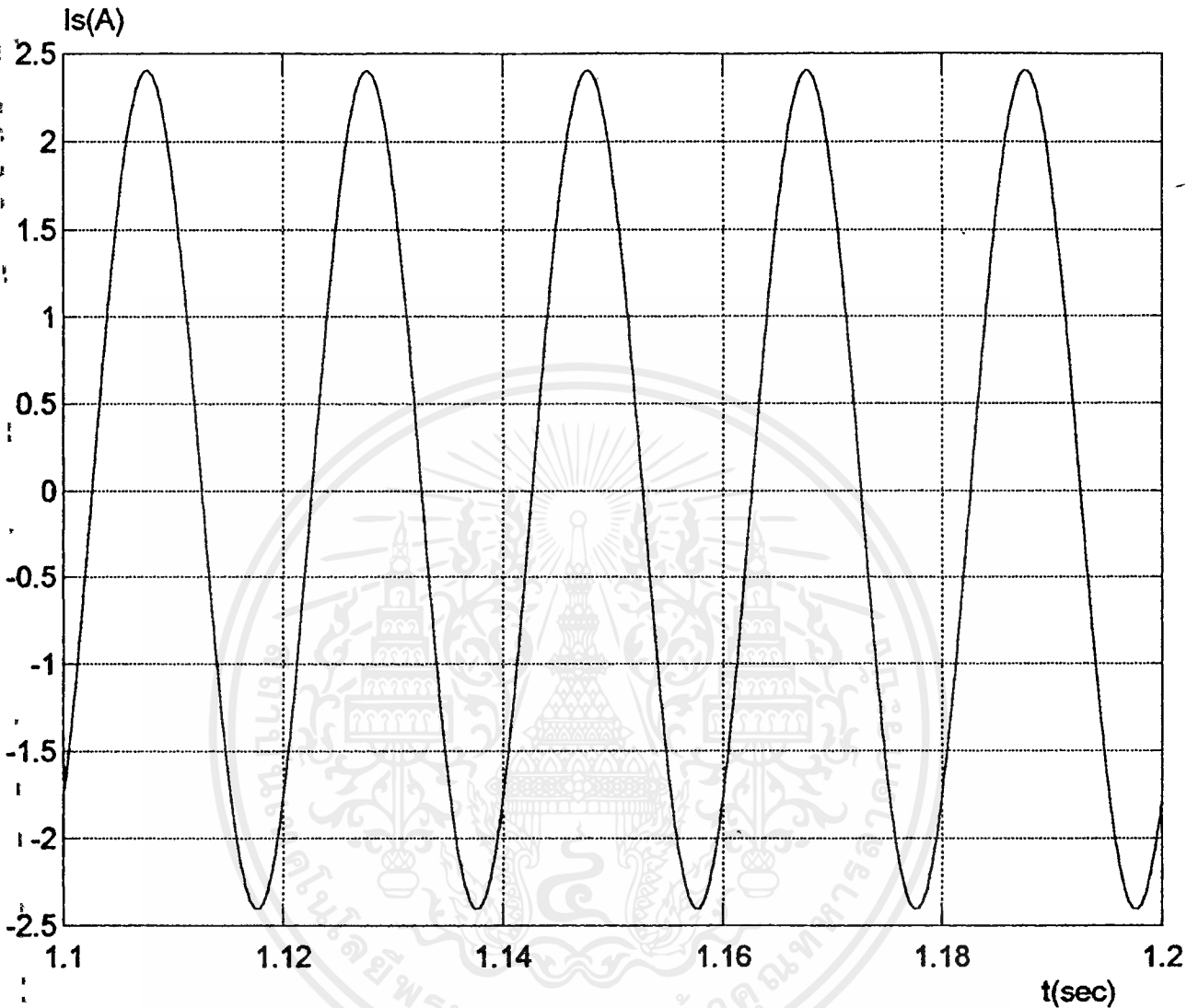
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Induction Motor

รูป 4.9 แสดงส่วนจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.10 กราฟแสดงกระแส  $i_s$  ที่ความเร็วที่  $f=50\text{Hz}$  ขณะไร้ภาระ

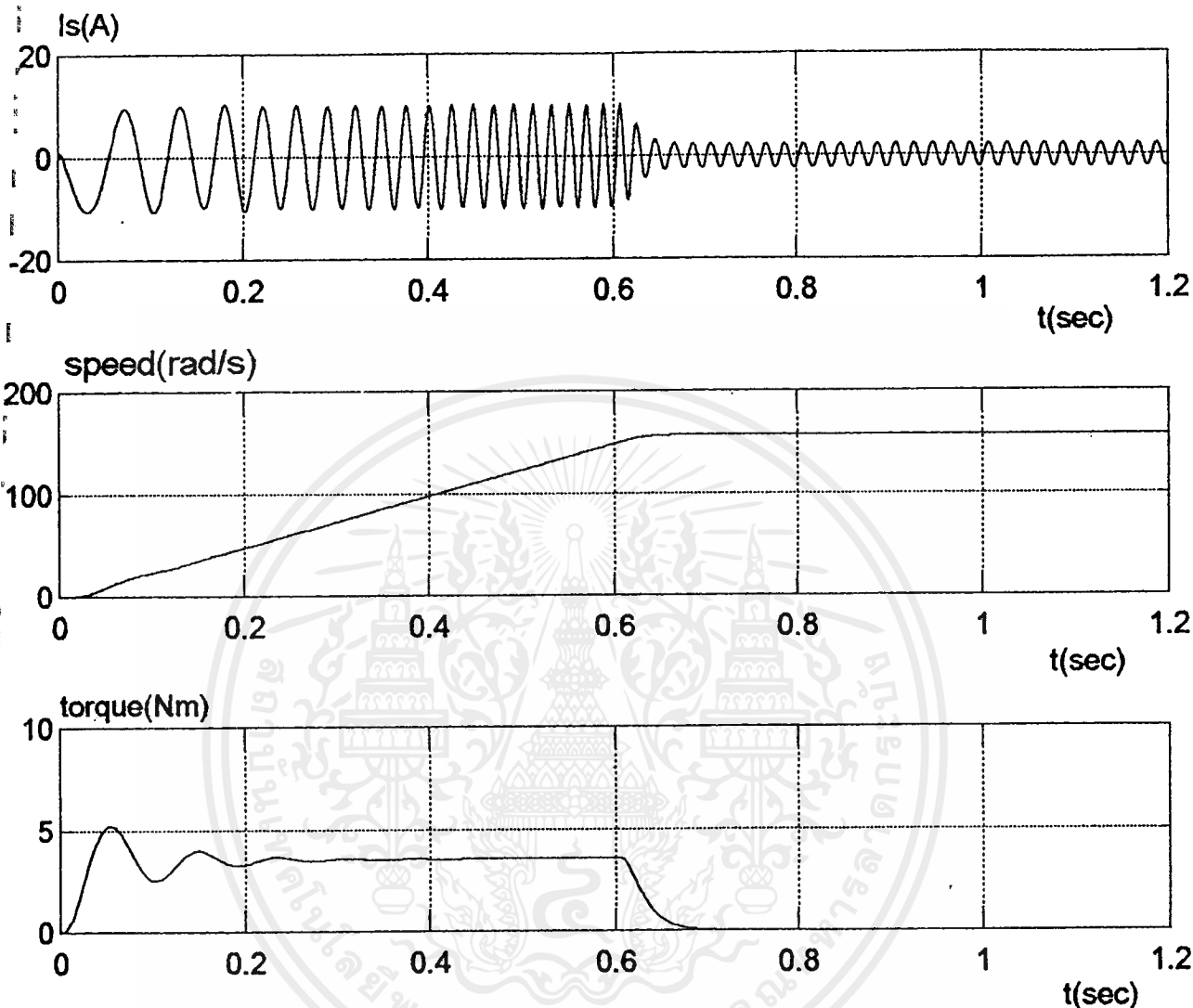
ซึ่งความถี่ 50 Hz นี้เป็นค่าความถี่ที่ใช้ในการทดสอบขณะไร้ภาระซึ่งได้ค่ากระแสเป็น 1.7 A เมื่อเปรียบเทียบกับที่ได้จากการจำลองโดยการ simulink ซึ่งได้

$$I_p = 2.4 A_{p-p}$$

$$I_{rms} = \frac{I_p}{\sqrt{2}} = 1.69 A$$

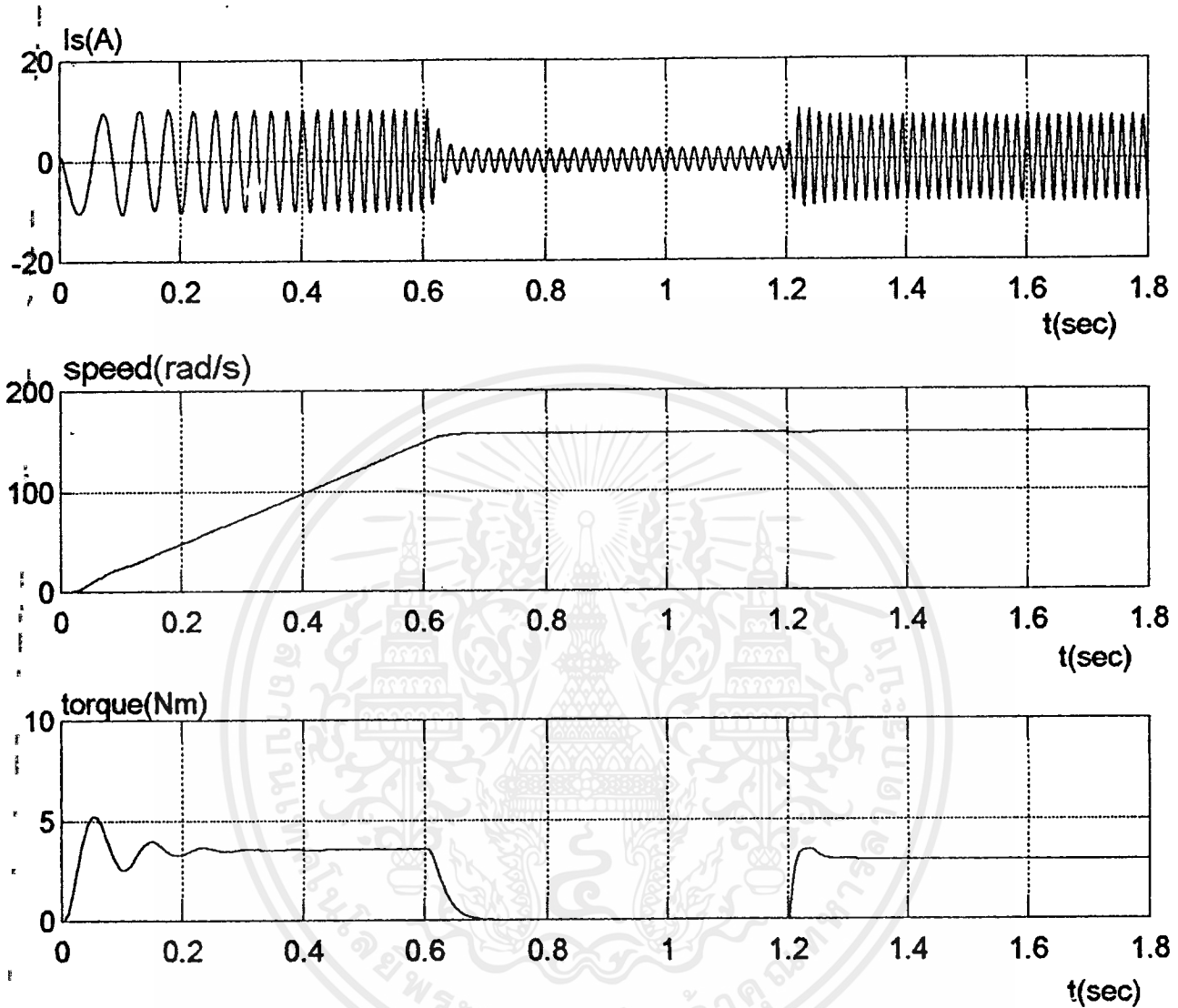
ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่ากระแสที่ได้จากการจำลองระบบมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.11 ผลการจำลองการเร่งความเร็วมอเตอร์ตั้งแต่เริ่มหมุนจนถึงความเร็วที่ 50 Hz

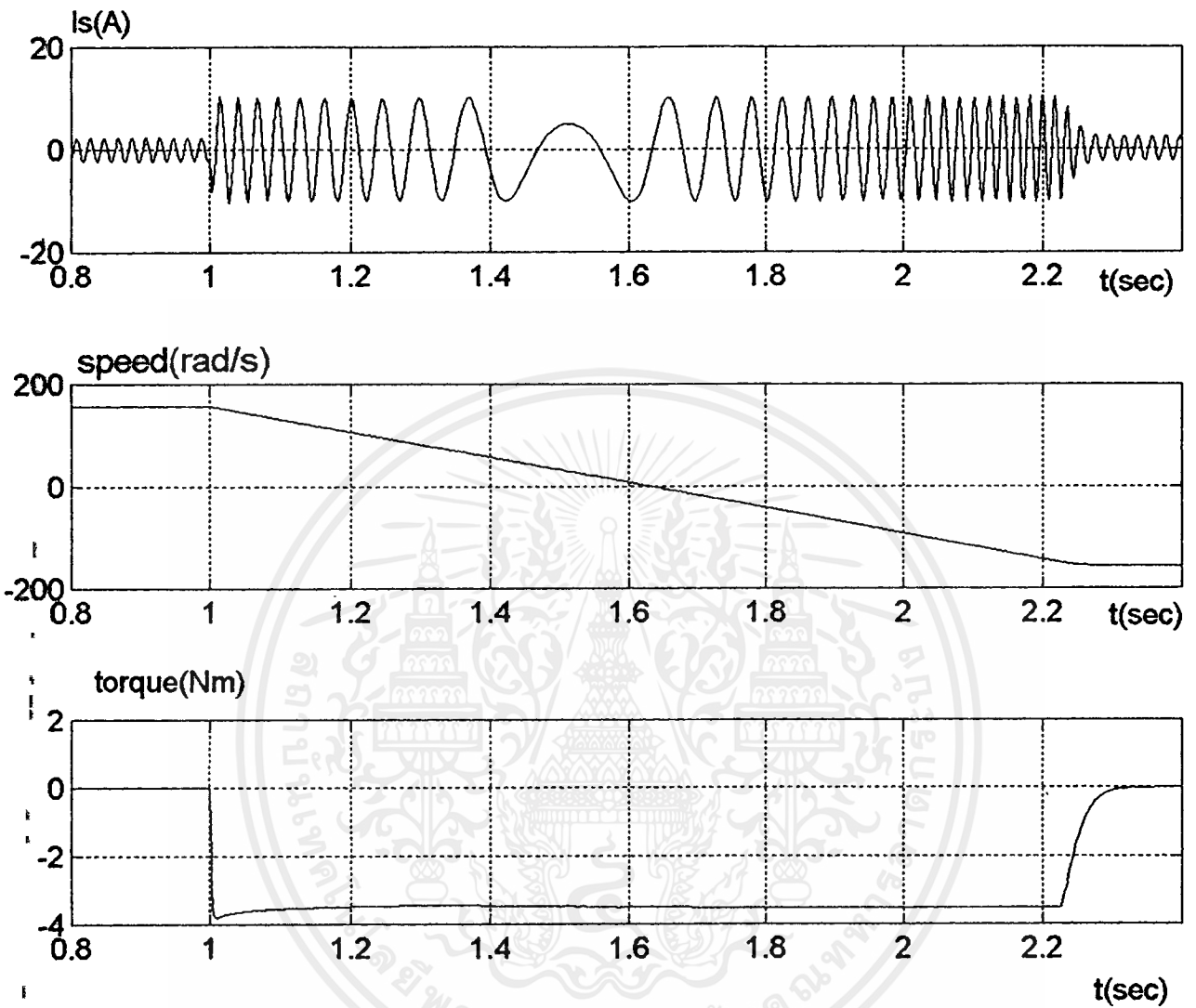
รูปแสดงกระแสเดเตอร์, ความเร็วและแรงบิด ในช่วงเวลาเริ่มสตาร์ทจนถึงความเร็วที่ 50 Hz ซึ่งใช้เวลา 0.6 วินาที ซึ่งจะเห็นว่าช่วงการเร่งความเร็ว, แรงบิดสตาร์ทและกระแสสตาร์ทที่สูงกว่ากระแสปกติ



รูปที่ 4.12 ผลการจำลองการเร่งความเร็วมอเตอร์ที่ความเร็วที่ 50 Hz

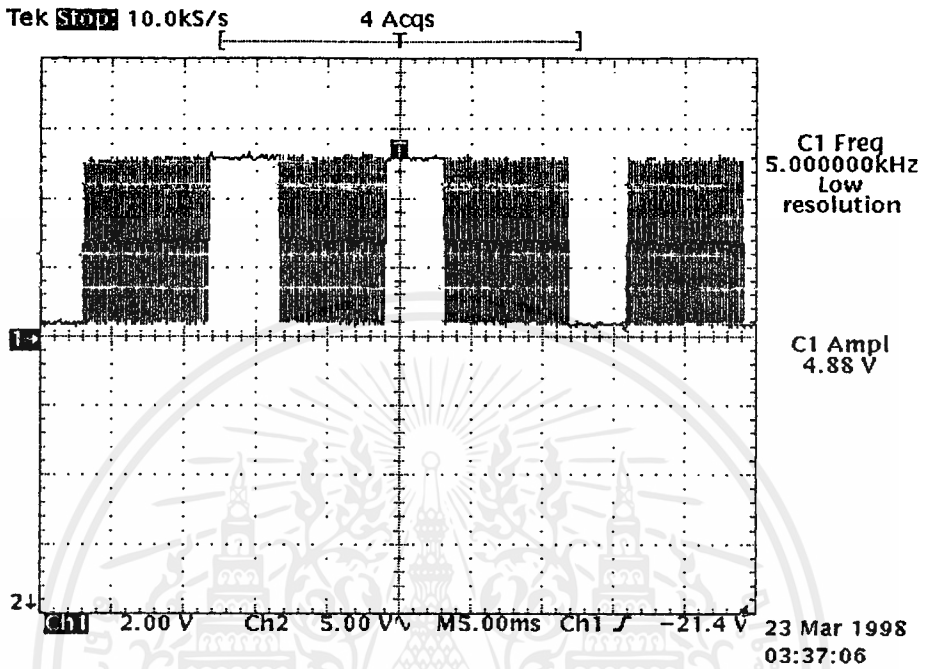
และใส่โหลด 3 N-m ที่เวลา 1.2 วินาที

จากรูปจะเห็นกระแสและแรงบิดที่เพิ่มขึ้นขณะใส่โหลด ในขณะที่ความเร็วมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยซึ่งเป็นคุณสมบัติการรักษาค่าความเร็วของระบบควบคุมวงรอบปิด

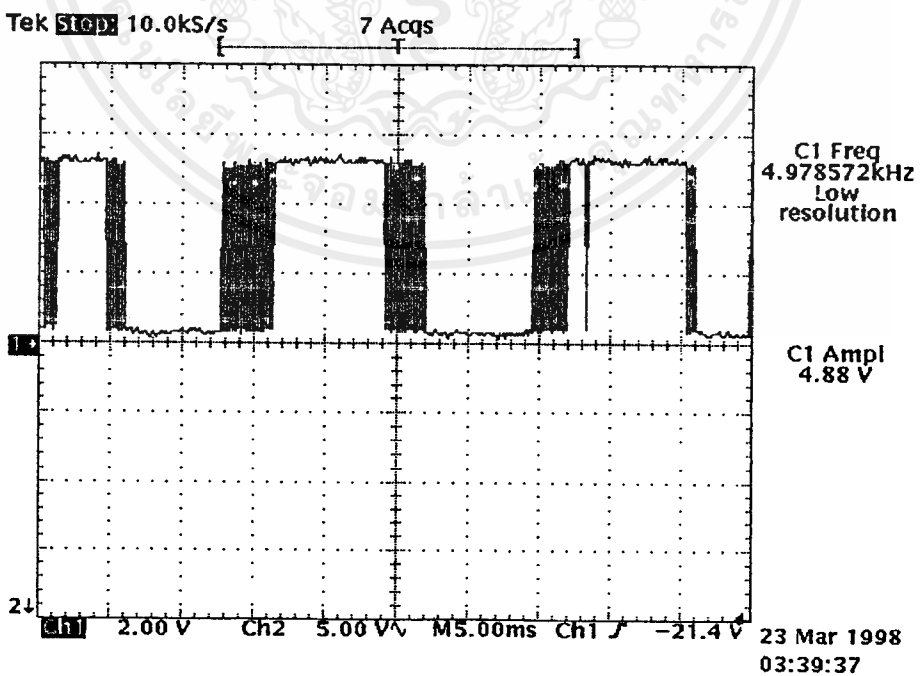


รูป 4.13 ผลการจำลองการกลับทางหมุนจากความถี่ 50 Hz เป็น -50 Hz แสดงการกลับทิศทางหมุนซึ่งจะเป็นคุณสมบัติการจำกัดกระแสให้อยู่ในช่วงปลอดภัยของการควบคุมวงรอบปิด

4.2 สัญญาณจากการทดลอง

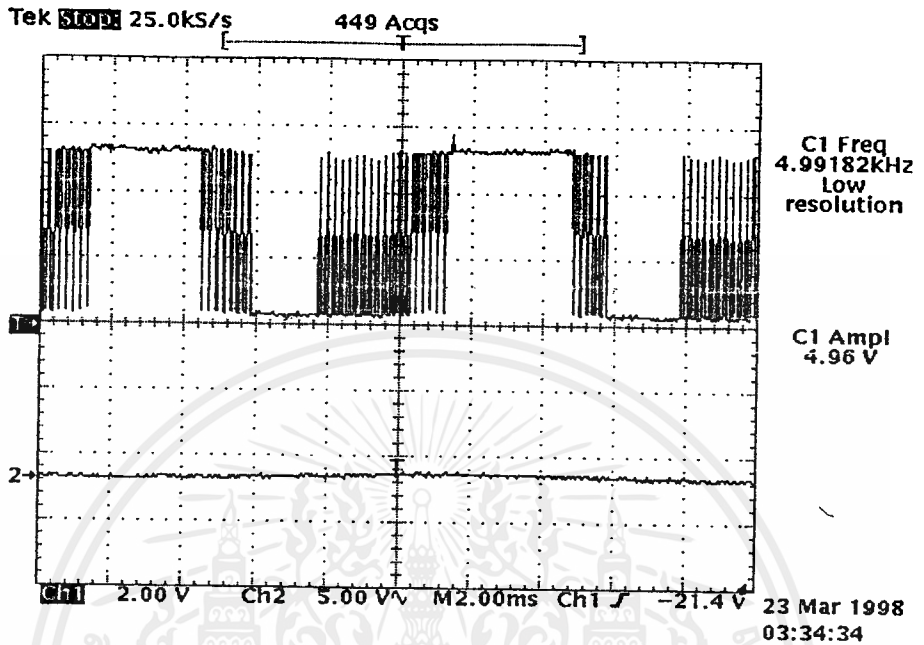


รูป 4.14 สัญญาณ PWM จาก CPU ที่ความถี่ 20 Hz

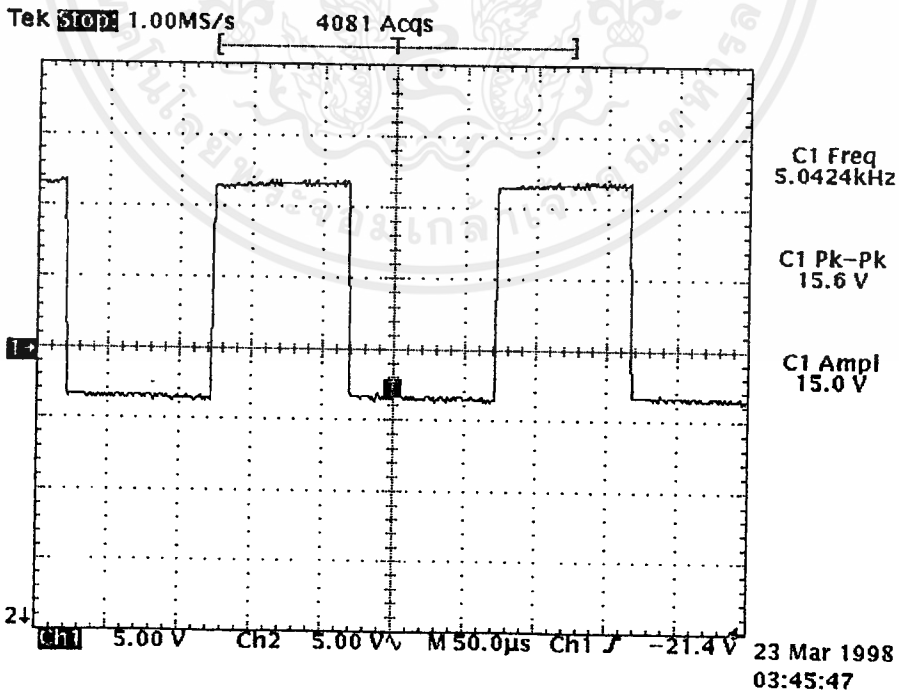


รูป 4.15 สัญญาณ PWM จาก CPU ที่ความถี่ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

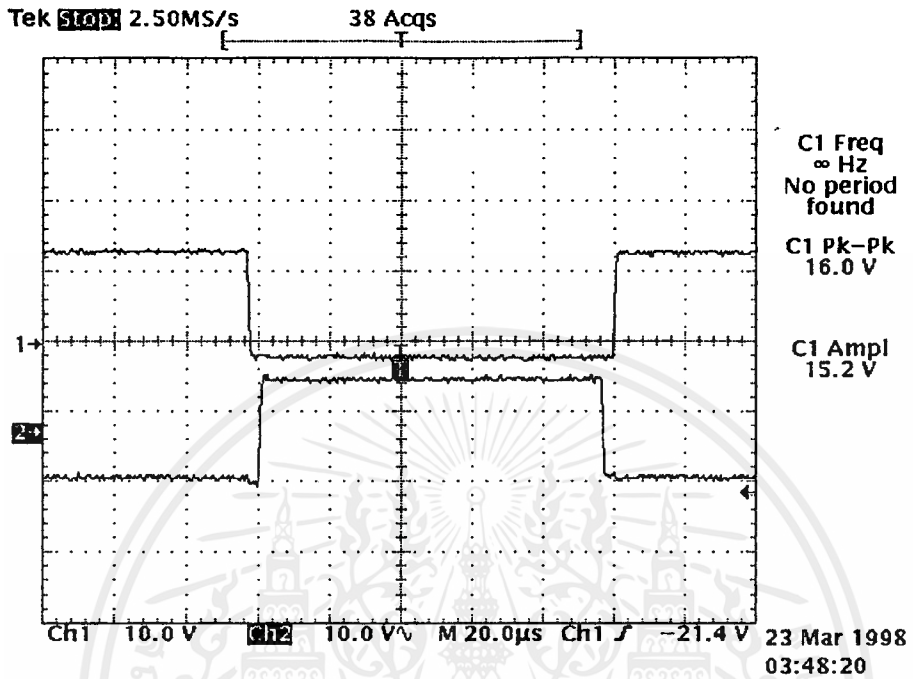


รูป 4.16 สัญญาณ PWM จาก CPU ที่ความถี่ 99 Hz

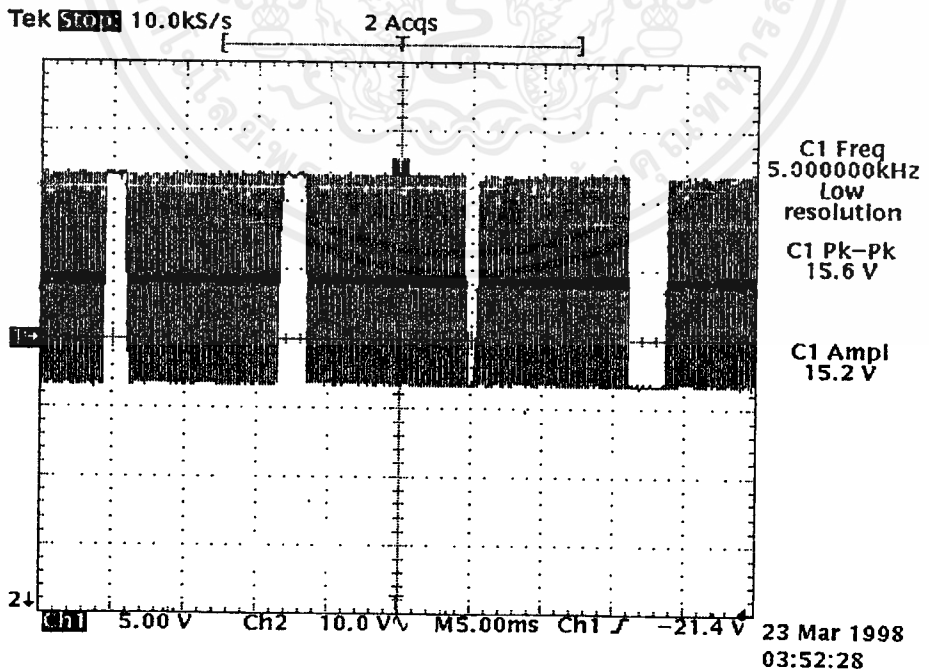


รูป 4.17 สัญญาณ PWM จากชุดขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

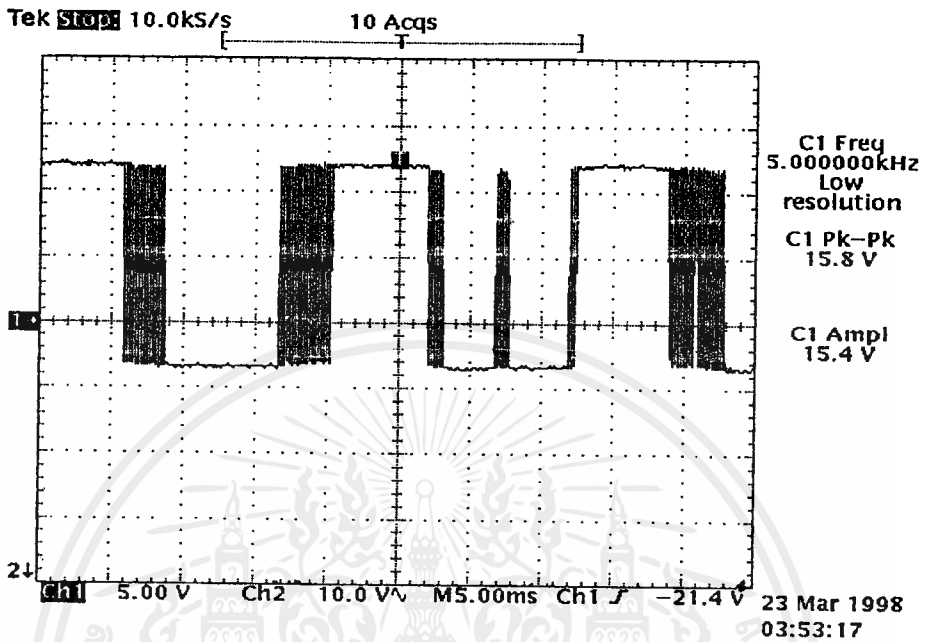


รูป 4.18 แสดงคาบประวิงเวลาของสัญญาณ PWM ของชุดขับเกท

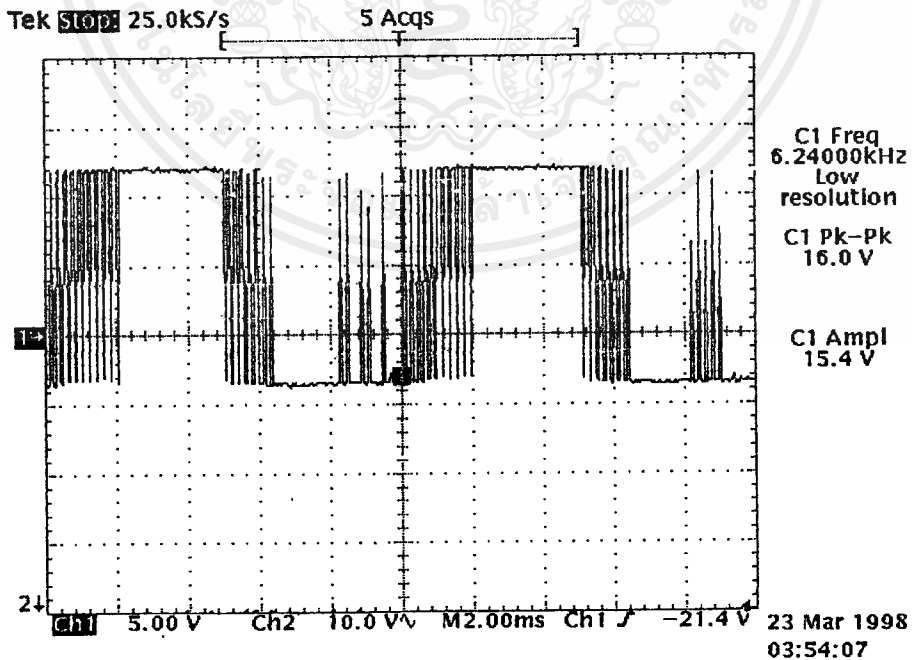


รูป 4.19 สัญญาณ PWM จากชุดขับเกทที่ความถี่ 10 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

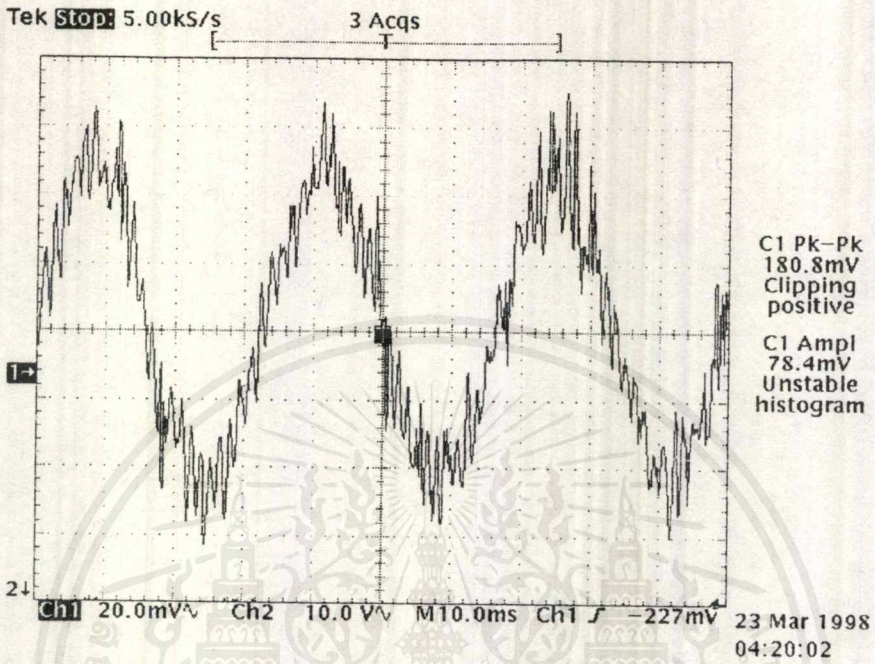


รูป 4.20 สัญญาณ PWM จากชุดขับเกทที่ความถี่ 50 Hz

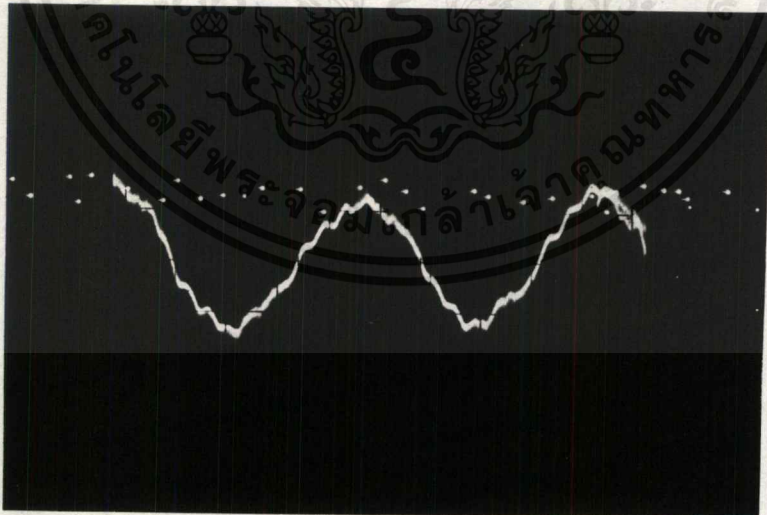


รูป 4.21 สัญญาณ PWM จากชุดขับเกทที่ความถี่ 99 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



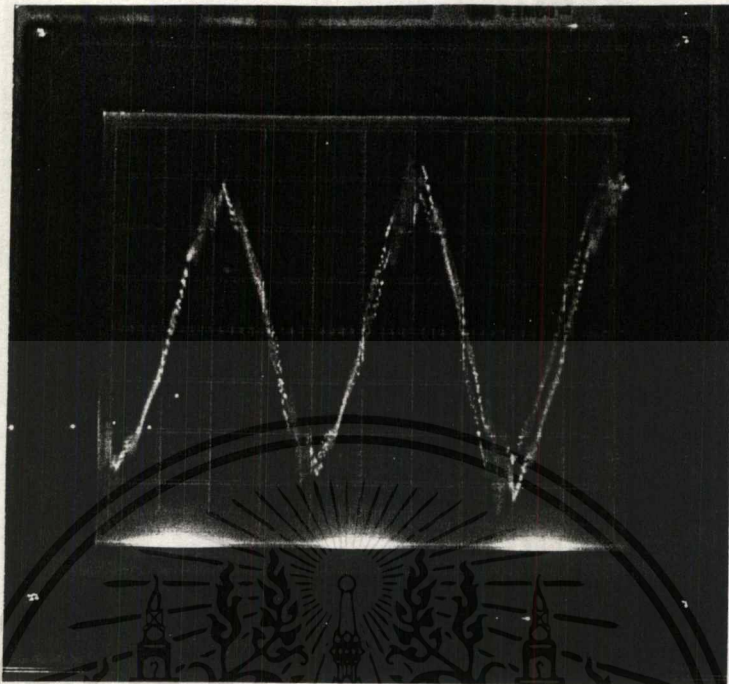
รูป 4.22 สัญญาณลูกคลื่นกระแสขณะขับมอเตอร์ที่ความถี่ 30 Hz



รูป 4.23 สัญญาณลูกคลื่นกระแสขณะขับมอเตอร์ที่ความถี่ 20 Hz

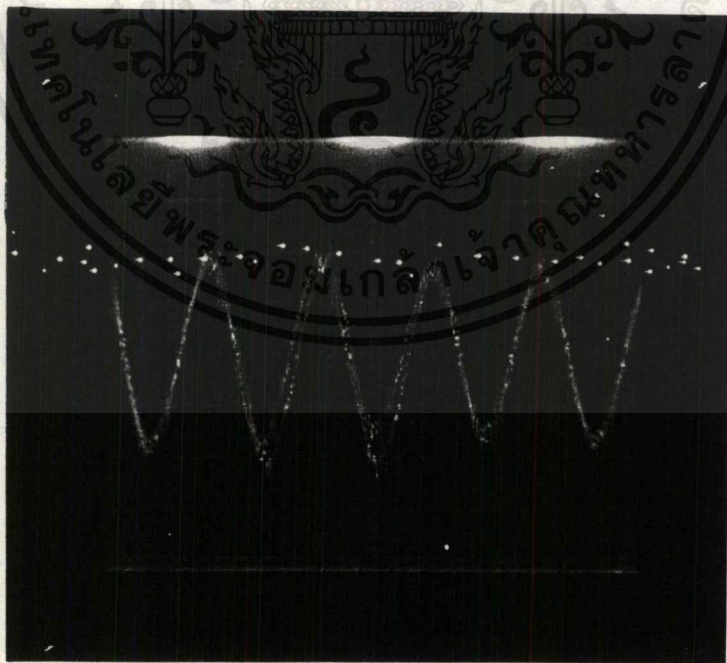
20mV/div, 5mSec/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.24 สัญญาณลูกคลื่นกระแสขณะขับมอเตอร์ที่ความถี่ 50 Hz

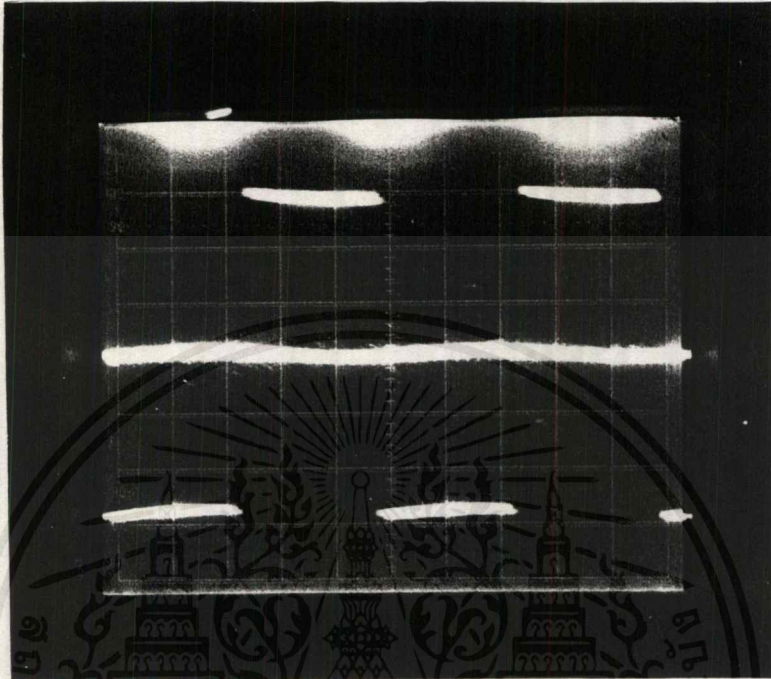
20mV/div, 5mSec/div



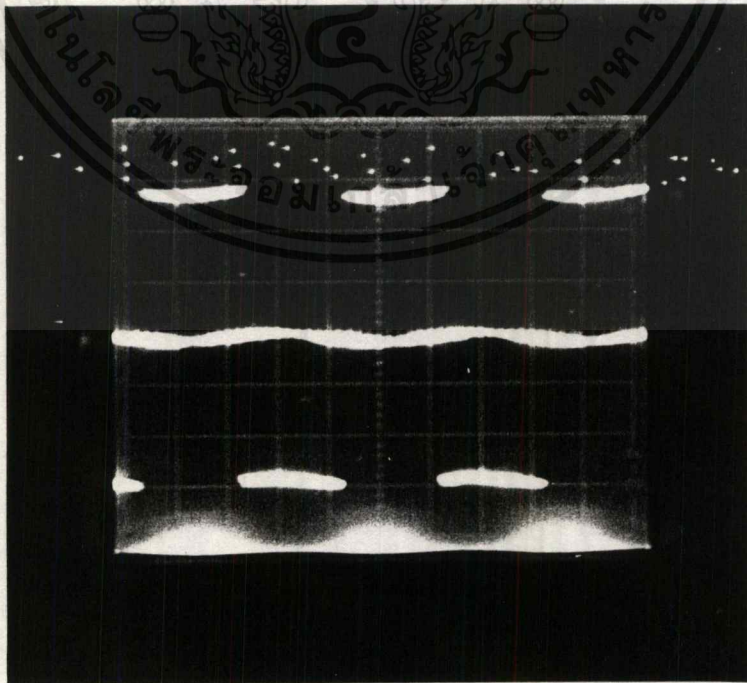
รูป 4.25 สัญญาณลูกคลื่นกระแสขณะขับมอเตอร์ที่ความถี่ 80 Hz

20mV/div, 5mSec/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



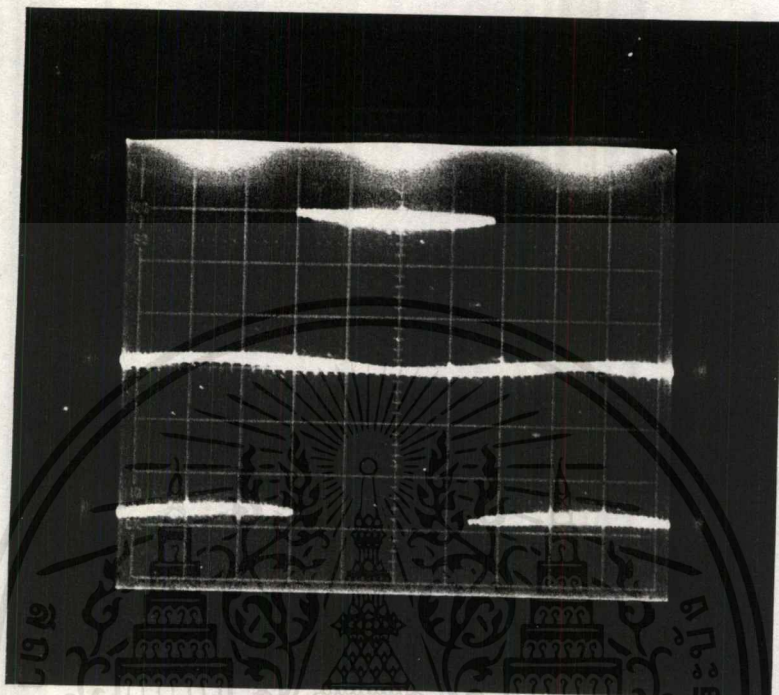
รูป 4.26 สัญญาณลูกคลื่นแรงดันระหว่างเฟสที่ความถี่ 20 Hz  
10V/div(x10), 10mSec/div



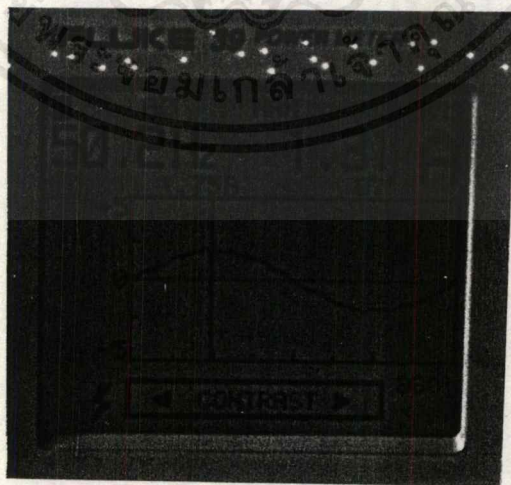
รูป 4.27 สัญญาณลูกคลื่นแรงดันระหว่างเฟสที่ความถี่ 50 Hz

10V/div(x10), 2mSec/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

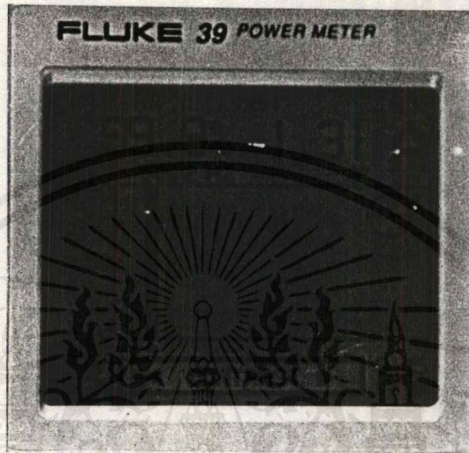


รูป 4.28 สัญญาณลูกคลื่นแรงดันระหว่างเฟสที่ความถี่ 70 Hz  
10V/div(x10).5mSec/div

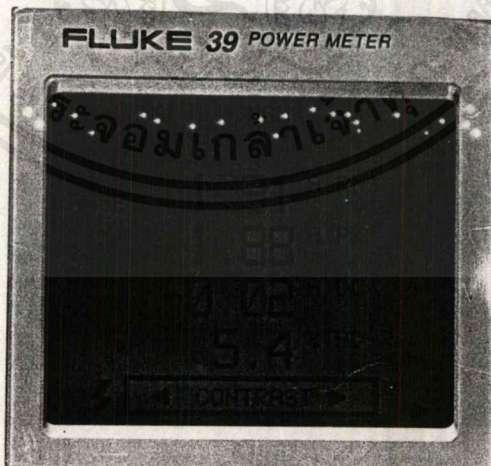


รูป 4.29 สัญญาณลูกคลื่นกระแสที่ความถี่ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

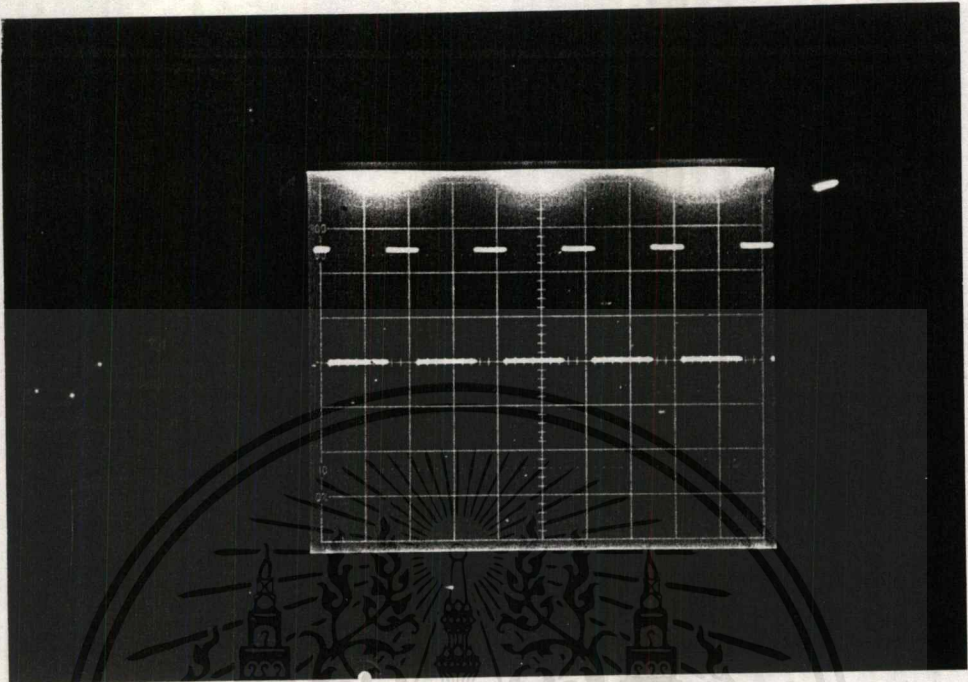


รูป 4.30 สเปกตรัมแสดงฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 50 Hz

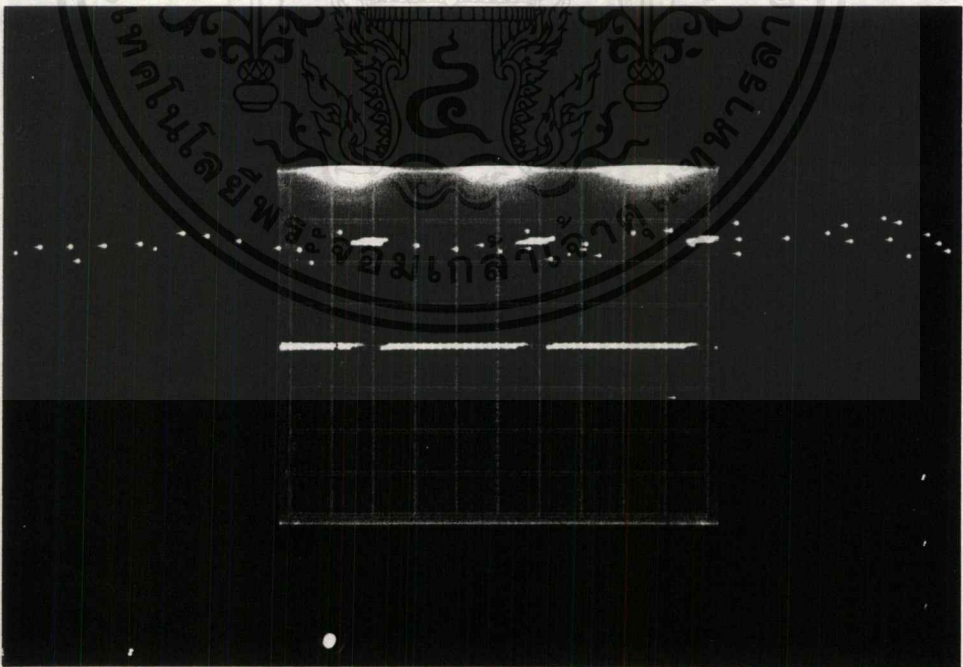


รูป 4.31 ค่ากระแสและ%THDที่ความถี่ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.32 แสดงจำนวนสัญญาณ PWM ที่ 0.02 cycle ความถี่ 20 Hz  
2V/div,0.1mSec/div



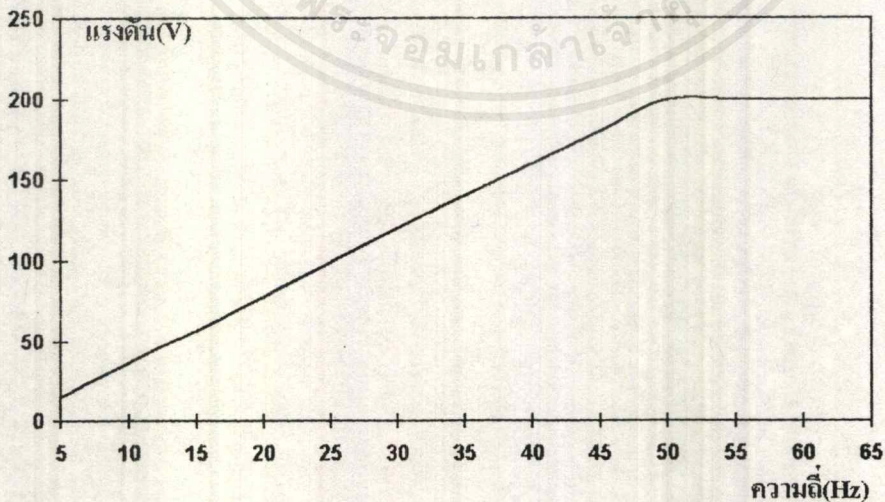
รูป 4.33 แสดงจำนวนสัญญาณ PWM ที่ 0.02 cycle ความถี่ 40 Hz  
2V/div,0.1mSec/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.32 และรูป 4.33 แสดงให้เห็นว่าจำนวนลูกคลื่นสัญญาณที่ความถี่ 20 Hz มีมากกว่าที่ความถี่ 40 Hz อยู่ 2 เท่า

ความถี่	แรงดัน	V/F
5	14.5	2.9
10	36.5	3.7
15	57.0	3.8
20	78.0	3.9
25	99.0	3.9
30	120.5	4.0
35	140.5	4.0
40	160.0	4.0
45	180.0	4.0
50	200.0	4.0
55	200.0	3.6
60	200.0	3.3
65	200.0	3.1

ตาราง 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและความถี่



รูป 4.34 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตาราง 4.2 , 4.3 และ 4.4 เป็นตารางแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วมอเตอร์ 3 เฟสขนาด 1 แรงม้า 4 โพลที่ความถี่ 30Hz , 40Hz และ 50Hz ตามลำดับและสามารถหาแรงบิดได้ตามสมการ

$$T_o = (9.8)(W_2 - W_1)\left(\frac{D}{2}\right)$$

$T_o$  = Output torque (N-m)

$W_1$  = น้ำหนักของลูกตุ้ม (kg)

$W_2$  = น้ำหนักที่อ่านจากตุ้ม (kg)

$D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของ pulley (0.15 m)

$N$  = ความเร็วของ pulley (rpm)

W2	W1	N	To
2.3	0.5	874.5	1.32
3.7	1	858	1.98
5.5	1.5	830	2.94
6.9	2	802	3.60
8.1	2.5	765	4.12

ตาราง 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วมอเตอร์ที่ความถี่ 30Hz

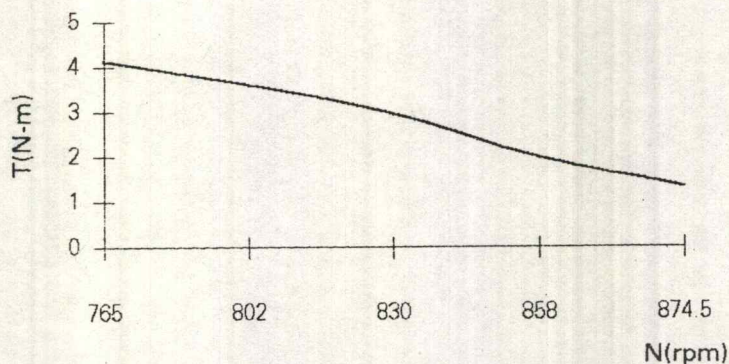
W2	W1	N	To
2.5	0.5	1175	1.47
4.3	1	1150	2.43
6.7	1.5	1113	4.92
8.9	2	1030	5.07

ตาราง 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วมอเตอร์ที่ความถี่ 40Hz

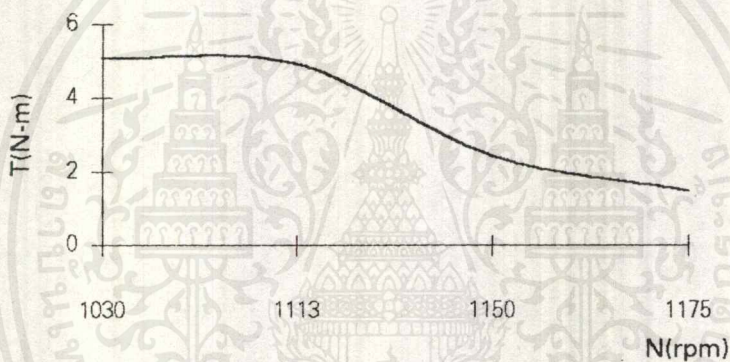
W2	W1	N	To
2.7	0.5	1473	1.62
5.7	1	1425	3.45
9.1	1.5	1380	5.59

ตาราง 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วมอเตอร์ที่ความถี่ 50Hz

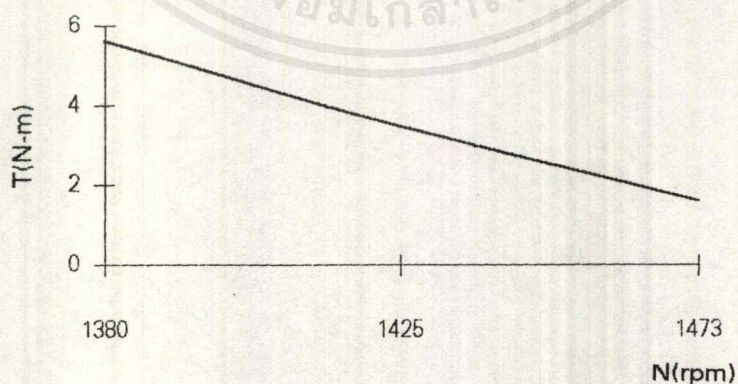
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วที่ 30 Hz

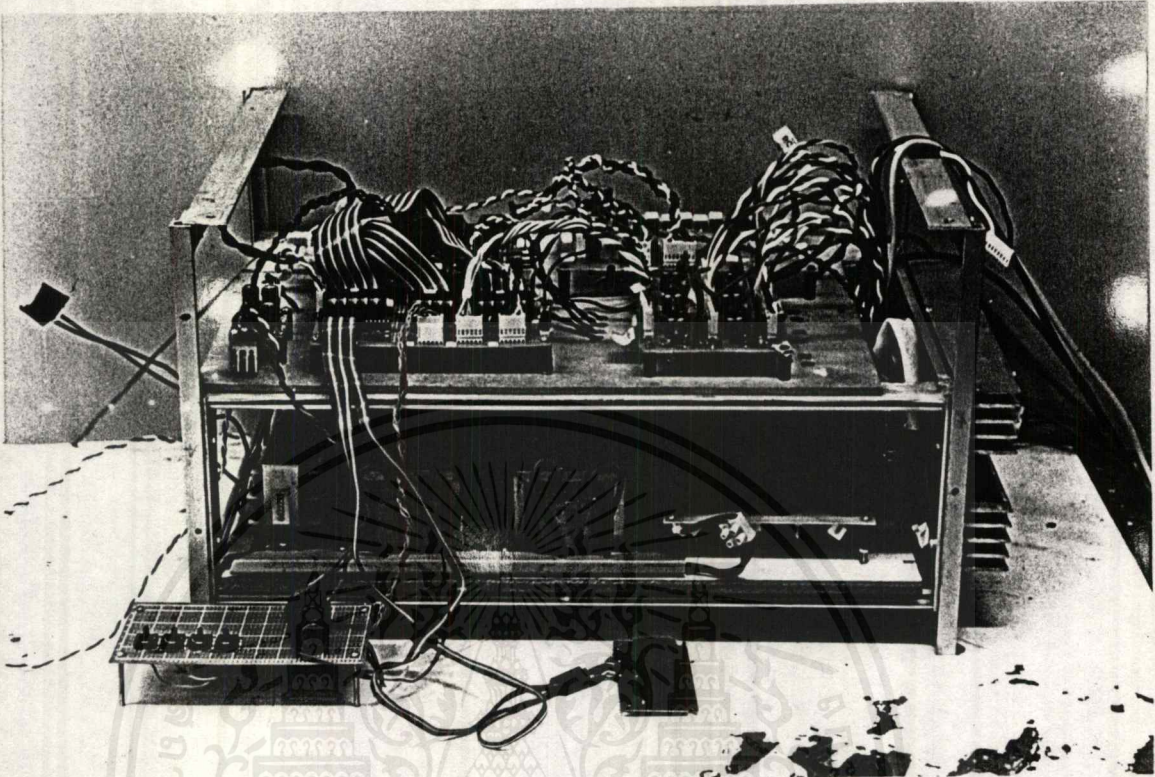


รูป 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วที่ 40 Hz

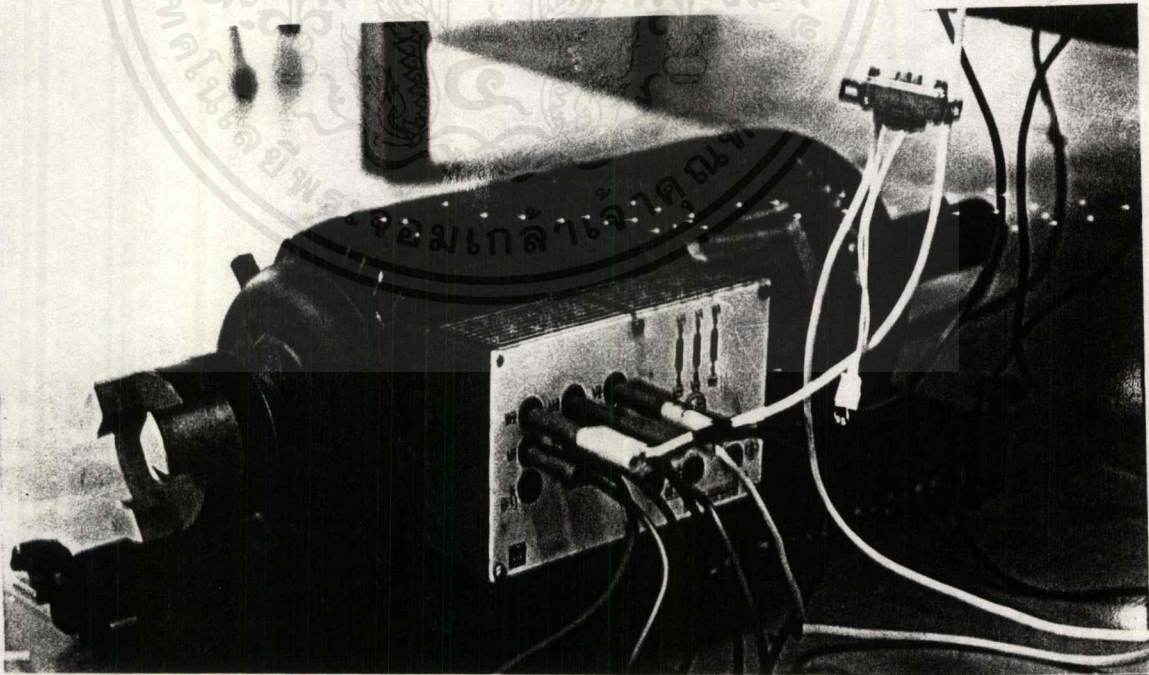


รูป 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วที่ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.38 แสดงชิ้นงาน



รูป 4.39 แสดงมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

## บทวิจารณ์และบทสรุป

ในโครงการนี้ได้ทำการศึกษา, ค้นคว้า, ออกแบบและสร้างระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยควบคุมแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์จากหลักการสเปซเวกเตอร์ซึ่งสามารถสร้างสัญญาณ PWM ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์โดยตรง การกำเนิดสัญญาณ PWM นี้มีส่วนที่เป็นแนวความคิดใหม่คือ ส่วนการหาตำแหน่งของเวกเตอร์โดยไม่ต้องมีการคำนวณค่ามุมจาก  $\arctan$  ซึ่งการทำงานจะยุ่งยากและมีความผิดพลาดสูงในช่วงมุมใกล้ 90 องศา

จากการทดลองนำอินเวอร์เตอร์ไปขับมอเตอร์ขนาด 1 kW 4 โพล ได้ความเร็วต่ำสุด 90 รอบต่อนาที ความเร็วสูงสุดที่ขับมอเตอร์คือ 2700 รอบต่อนาที ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงข้อดีของการนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้งานในการควบคุม

### 5.1 ข้อดีที่ได้จากการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ทดสอบ

5.1.1 ความถี่ในการสวิตช์ที่สูงมากนักทำให้ความคลาดเคลื่อนของค่าการประวิงเวลาค่อนข้างน้อย

5.1.2 หน่วยประมวลผลมีขนาด 32 บิตบัสข้อมูล ดังนั้นทำให้การประมวลผลทำได้รวดเร็วเหมาะแก่การใช้งานการควบคุมวงรอบปิดด้วยหลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ต่อไป

5.1.3 การสร้างสัญญาณมอดูเลทความกว้างพัลส์เกิดจากการทำงานของหน่วยประมวลผลซึ่งดีกว่าวิธีสร้างสัญญาณด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนได้

### 5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในช่วงการทำโครงการ

5.2.1 ด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากผู้ร่วมงานไม่มีประสบการณ์ในการต่อวงจรมาก่อน จึงทำให้ช่วงเริ่มต้นมีปัญหาอยู่บ้าง แต่ก็สามารถแก้ไขให้ลุล่วงไปได้

5.2.2 ด้านการเขียนโปรแกรม เนื่องจากผู้ร่วมงานขาดประสบการณ์ทางการเขียนโปรแกรม อีกทั้งไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนี้เป็นอุปกรณ์ใหม่ ยากต่อการศึกษาให้เข้าใจได้โดยเร็ว ทำให้ต้องใช้เวลาในการศึกษานานทำให้เวลาในการทำงานล่าช้าออกไป

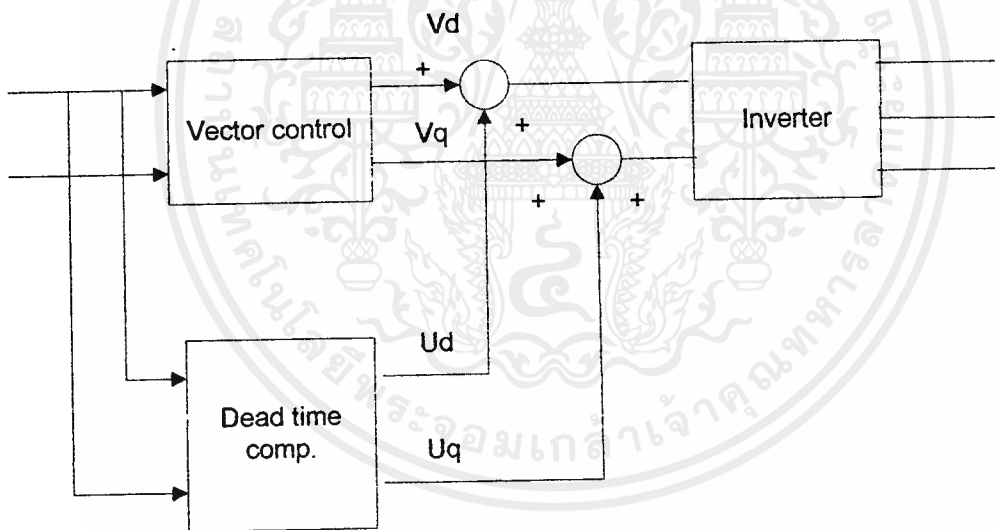
5.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้มีราคาแพงทำให้ต้องใช้เงินทุนมาก และการหาซื้ออุปกรณ์ให้ได้ตามความต้องการนั้นทำได้ยาก

### 5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

5.3.1 พัฒนาระบบควบคุมวงรอบปิดแบบเวกเตอร์ใช้ในการทดแทนหลักการควบคุมรอบเปิดซึ่งมีข้อเสียหลายประการ ซึ่งหลักการควบคุมวงรอบปิดแบบเวกเตอร์ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2

5.3.2 เนื่องจากระบบควบคุมแบบเวกเตอร์จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณจึงควรทำระบบนี้ให้มีการหาพารามิเตอร์ได้ด้วยตัวเอง ซึ่งจะทำให้ระบบที่ได้มีความคล่องตัวสูงขึ้น

5.3.3 จากปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ความถี่ต่ำ เนื่องมาจากผลของค่าประจุเวลาทำให้เกิดการลดทอนสัญญาณที่สร้างขึ้นโดยไม่โครคอนโทรลเลอร์สามารถแก้ไขได้โดยการชดเชยค่าประจุเวลา ซึ่งอาจคำนวณได้จากค่ากระแสเดเตอร์ดังรูปที่ 5.1



รูป 5.1 แสดงบล็อกโคอะแกรมของการประจุเวลา

ภาคผนวก ก  
ข้อเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแบบเวกเตอร์ด้วยหลักการควบคุมกระแส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

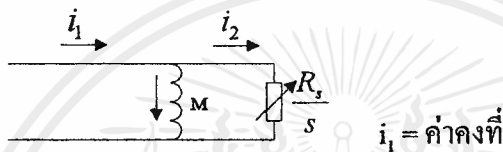
ภาคผนวก ก

ข้อเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแบบเวกเตอร์ด้วยหลักการควบคุมกระแส

ข้อแตกต่างเด่นชัดระหว่างการควบคุมกระแสกับแบบควบคุมแรงดัน คือ ความสามารถในการควบคุมเมื่อได้รับผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโรเตอร์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแสดงไว้ดังต่อไปนี้

1) วิธีควบคุมแบบกระแส

พิจารณาวจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังรูป



เนื่องจากใช้หลักการควบคุมกระแส โดยให้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ป้อนแก่มอเตอร์ ดังนั้น  $i_1 = \text{ค่าคงที่}$

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความต้านทานของโรเตอร์เพิ่มสูงขึ้นจาก  $R_2$  เป็น  $R_2^*$  ซึ่งจากการที่  $R_2^*$  มีค่าสูงขึ้นทำให้กระแส  $i_2$  มีค่าลดลง แต่กระแส  $i_0$  มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และเนื่องจากผลคูณของ  $i_0$  กับ  $i_2$  ยังคงที่ทำให้ระบบควบคุมยังคงสร้างกระแสสร้างแรงบิดคงที่ค่าเดิม ดังนั้นความถี่เชิงมุมของโรเตอร์ฟลักซ์จะยังคงที่ที่ค่าเดิมตามสมการ

$$\omega_0 = \omega_r + (R_2/L_2 i_1 \alpha) i_1 \beta$$

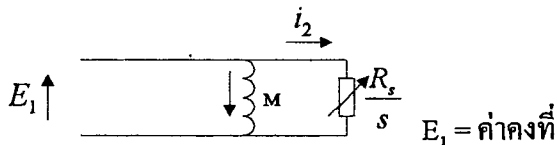
ซึ่งขณะนี้ค่าความถี่เชิงมุมของโรเตอร์ฟลักซ์ที่ถูกต้องควรมีค่าเป็น

$$\omega_0 = \omega_r + (R_2^*/L_2 i_1 \alpha) i_1 \beta$$

จะเห็นได้ว่า ผลจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของโรเตอร์จะมีผลต่อความถูกต้องในการควบคุมความเร็วในระบบควบคุมแบบควบคุมกระแส

2) วิธีควบคุมความเร็วแบบควบคุมแรงดัน

พิจารณาวจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังรูป



เนื่องจากใช้หลักการควบคุมแรงดัน โดยให้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ป้อนแก่มอเตอร์

ดังนั้นเมื่อความต้านทานของโรเตอร์เพิ่มสูงขึ้นจาก  $R_2$  เป็น  $R_2^*$  จะทำให้กระแส  $i_2$  ลดลงขณะที่กระแส  $i_0$  คงที่ ซึ่งผลคูณระหว่างกระแส  $i_2$  และ  $i_0$  จะลดลงทำให้ระบบควบคุมสร้างกระแสสร้างแรงบิดค่าใหม่เป็น

$$i_{1\beta}^{ref*} = i_{1\beta}^{ref} * \frac{R_2^*}{R_2}$$

ดังนั้นค่าความถี่เชิงมุมของโรเตอร์ฟลักซ์จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น

$$\omega_0 = \omega_r + \frac{R_2}{L_2 i_{1\alpha}^{ref}} i_{1\beta}^{ref*}$$

ซึ่งจะเห็นว่าระบบควบคุมโดยการควบคุมแรงดันมีความสามารถในการควบคุมอย่างถูกต้องเหนือกว่าระบบควบคุมแบบควบคุมกระแส





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

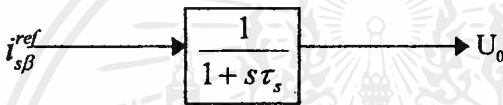
ภาคผนวก ข

การแปลงระบบต่อเนื่องให้เป็นระบบคิสิกิต

จากรูปที่ 3-2 จะเห็นว่า โครงสร้างระบบมีส่วนหนึ่งที่จะต้องแปลงจากระบบที่มีความต่อเนื่อง(continuous) ให้เป็นระบบที่มีคิสิกิต (discrete) เพื่อให้สอดคล้องกับการ โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยอาศัยการแปลงของ z (z-transformation) แบบ Bilinear (หรือเรียกว่า การแปลงแบบ Tustin) ดังแสดงความสัมพันธ์ คือ

$$S = (2/T) * (1-z^{-1}) / (1+z^{-1})$$

ดังนั้น สามารถแปลงระบบส่วนที่เกี่ยวข้องกับความต่อเนื่องให้เป็นความสัมพันธ์ลักษณะคิสิกิตได้ดังต่อไปนี้



$$\frac{U_0}{i_{s\beta}^{ref}} = \frac{1}{1 + s\tau_s}$$

แทน s ด้วยสมการของ s ข้างต้น

$$\frac{U_0}{i_{s\beta}^{ref}} = \frac{1}{1 + \tau_s \left( \frac{2}{T} * \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right)}$$

$$i_{s\beta}^{ref} = \left[ 1 + \frac{2\tau_s}{T} \left( \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) \right] U_0$$

$$(1+z^{-1})i_{s\beta}^{ref} = \left[ (1+z^{-1})U_0 + \frac{2\tau_s}{T}(1+z^{-1})U_0 \right]$$

$$i_{s\beta}^{ref} + i_{s\beta-1}^{ref} = U_0 + U_{0-1} + \frac{2\tau_s}{T}(U_0 - U_{0-1})$$

$$U_0 = \left[ (i_{s\beta}^{ref} + i_{s\beta-1}^{ref}) - \left( 1 - \frac{2\tau_s}{T} \right) U_{0-1} \right] / \left( 1 + \frac{2\tau_s}{T} \right)$$

ซึ่งจากผลการแปลงสามารถนำไปเขียนเป็นภาษาโปรแกรมได้ต่อไป

**เอกสารอ้างอิง**

[1] Paul Katz, "Digital Control Using Microprocessors", Prentice Hall International  
 [2] Karl J. Astrom, Bjorn Wittenmark, "Computer controlled system: theory and design", Prentice-Hall International.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
#####  
Vector Control Program  
Electrical Engineer KMITL '33  
#####
```

```
#include "7032.h"  
#define b 10  
#define bi 200  
#define high 1200  
#define low 1200  
#define M 4  
#define K 6  
#define ar 625  
#define Ts 2  
#define sig 107  
#define sig_Ls 6  
#define Isa 294  
#define Rs 287  
#define Ls 56  
#define Ks 48  
#define P_pair 2  
  
extern set_interrupt_mask(char);  
  
long ch,inst,Hz;  
volatile unsigned short ad_value;  
  
int testint;  
  
long W,Wm,Wo,Wsl,Om,Osl,O,PI,U,V,e_alp,e_beta,Wm_buff,En_test,  
Osl_buff,O_buff,Om_buff,Isb,Isb_buff,Isb1,Wsl_buff,e_d,e_q,Volt;  
  
short fwd_rev,real_dir,over,lng_point,Ang,sinx,cosx;  
  
char speed;  
  
unsigned char T1,T2,T3,P1,P2,P3;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

unsigned short theta,theta\_t,period,Encoder;

short sin1[1025]={

0 ,50 ,101 ,151 ,201 ,251 ,302 ,352 ,402 ,452,  
503 ,553 ,603 ,653 ,704 ,754 ,804 ,854 ,905 ,955,  
1005,1055,1106,1156,1206,1256,1307,1357,1407,1457,  
1507,1558,1608,1658,1708,1758,1809,1859,1909,1959,  
2009,2060,2110,2160,2210,2260,2310,2360,2411,2461,  
2511,2561,2611,2661,2711,2761,2811,2861,2912,2962,  
3012,3062,3112,3162,3212,3262,3312,3362,3412,3462,  
3512,3562,3612,3662,3712,3762,3812,3861,3911,3961,  
4011,4061,4111,4161,4211,4260,4310,4360,4410,4460,  
4510,4559,4609,4659,4709,4758,4808,4858,4907,4957,  
5007,5057,5106,5156,5205,5255,5305,5354,5404,5453,  
5503,5553,5602,5652,5701,5751,5800,5850,5899,5948,  
5998,6047,6097,6146,6195,6245,6294,6343,6393,6442,  
6491,6541,6590,6639,6688,6737,6787,6836,6885,6934,  
6983,7032,7081,7130,7180,7229,7278,7327,7376,7425,  
7473,7522,7571,7620,7669,7718,7767,7816,7864,7913,  
7962,8011,8059,8108,8157,8206,8254,8303,8351,8400,  
8449,8497,8546,8594,8643,8691,8740,8788,8836,8885,  
8933,8982,9030,9078, 9127,9175,9223,9271,9319,9368,  
9416,9464,9512,9560,9608,9656,9704,9752,9800,9848,  
9896,9944,9992,10040,10088 ,10135,10183,10231,10279,10326,  
10374,10422,10469,10517,10565,10612,10660,10707,10755,10802,  
10850,10897,10945,10992,11039,11087,11134,11181,11228,11276,  
11323,11370,11417,11464,11511,11558,11605,11652,11699,11746,  
11793,11840,11887,11934,11980,12027,12074,12121,12167,12214,  
12261,12307,12354,12400,12447,12493,12540,12586,12633,12679,  
12725,12772,12818,12864,12910,12957,13003,13049,13095,13141,  
13187,13233,13279,13325,13371,13417,13463,13508,13554,13600,  
13646,13691,13737,13783,13828,13874,13919,13965,14010,14056,  
14101,14146,14192,14237,14282,14327,14373,14418,14463,14508,  
14553,14598,14643,14688,14733,14778,14823,14867,14912,14957,  
15002,15046,15091,15136,15180,15225,15269,15314,15358,15402,  
15447,15491,15535,15580,15624,15668,15712,15756,15800,15844,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้และขอสงวนสิทธิ์ในนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15888,15932,15976,16020,16064,16108,16151,16195,16239,16282,  
16326,16369,16413,16456,16500,16543,16587,16630,16673,16717,  
16760,16803,16846,16889,16932,16975,17018,17061,17104,17147,  
17190,17233,17275,17318,17361,17403,17446,17488,17531,17573,  
17616,17658,17700,17743,17785,17827,17869,17911,17953,17995,  
18037,18079,18121,18163,18205,18247,18288,18330,18372,18413,  
18455,18496,18538,18579,18621,18662,18703,18745,18786,18827,  
18868,18909,18950,18991,19032,19073,19114,19155,19195,19236,  
19277,19317,19358,19399,19439,19479,19520,19560,19601,19641,  
19681,19721,19761,19801,19841,19881,19921,19961,20001,20041,  
20081,20120,20160,20200,20239,20279,20318,20357,20397,20436,  
20475,20515,20554,20593,20632,20671,20710,20749,20788,20827,  
20865,20904,20943,20981,21020,21059,21097,21136,21174,21212,  
21251,21289,21327,21365,21403,21441,21479,21517,21555,21593,  
21631,21668,21706,21744,21781,21819,21856,21894,21931,21968,  
22006,22043,22080,22117,22154,22191,22228,22265,22302,22339,  
22375,22412,22449,22485,22522,22558,22595,22631,22668,22704,  
22740,22776,22812,22848,22884,22920,22956,22992,23028,23064,  
23099,23135,23170,23206,23241,23277,23312,23348,23383,23418,  
23453,23488,23523,23558,23593,23628,23663,23697,23732,23767,  
23801,23836,23870,23905,23939,23973,24008,24042,24076,24110,  
24144,24178,24212,24246,24279,24313,24347,24380,24414,24448,  
24481,24514,24548,24581,24614,24647,24680,24713,24746,24779,  
24812,24845,24878,24910,24943,24976,25008,25041,25073,25105,  
25138,25170,25202,25234,25266,25298,25330,25362,25394,25425,  
25457,25489,25520,25552,25583,25615,25646,25677,25708,25739,  
25771,25802,25833,25863,25894,25925,25956,25986,26017,26048,  
26078,26108,26139,26169,26199,26229,26259,26290,26320,26349,  
26379,26409,26439,26468,26498,26528,26557,26586,26616,26645,  
26674,26704,26733,26762,26791,26820,26848,26877,26906,26935,  
26963,26992,27020,27049,27077,27105,27133,27162,27190,27218,  
27246,27273,27301,27329,27357,27384,27412,27440,27467,27494,  
27522,27549,27576,27603,27630,27657,27684,27711,27738,27765,  
27791,27818,27844,27871,27897,27924,27950,27976,28002,28028,  
28054,28080,28106,28132,28158,28183,28209,28234,28260,28285,

เอกสารนี้เป็นเอกสารของสำนักงานทรัพย์สินส่วนพระมหากษัตริย์ โดยสงวนลิขสิทธิ์ไว้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

28311,28336,28361,28386,28411,28436,28461,28486,28511,28536,  
28560,28585,28610,28634,28658,28683,28707,28731,28755,28779,  
28803,28827,28851,28875,28899,28922,28946,28970,28993,29016,  
29040,29063,29086,29109,29132,29155,29178,29201,29224,29247,  
29269,29292,29314,29337,29359,29381,29404,29426,29448,29470,  
29492,29514,29535,29557,29579,29600,29622,29643,29665,29686,  
29707,29729,29750,29771,29792,29813,29833,29854,29875,29895,  
29916,29936,29957,29977,29997,30018,30038,30058,30078,30098,  
30118,30137,30157,30177,30196,30216,30235,30254,30274,30293,  
30312,30331,30350,30369,30388,30407,30425,30444,30462,30481,  
30499,30518,30536,30554,30572,30590,30608,30626,30644,30662,  
30680,30697,30715,30732,30750,30767,30784,30801,30819,30836,  
30853,30869,30886,30903,30920,30936,30953,30969,30986,31002,  
31018,31034,31050,31067,31082,31098,31114,31130,31146,31161,  
31177,31192,31207,31223,31238,31253,31268,31283,31298,31313,  
31328,31342,31357,31372,31386,31400,31415,31429,31443,31457,  
31471,31485,31499,31513,31527,31540,31554,31568,31581,31594,  
31608,31621,31634,31647,31660,31673,31686,31699,31711,31724,  
31737,31749,31761,31774,31786,31798,31810,31822,31834,31846,  
31858,31870,31881,31893,31904,31916,31927,31938,31950,31961,  
31972,31983,31994,32005,32015,32026,32037,32047,32058,32068,  
32078,32088,32099,32109,32119,32129,32138,32148,32158,32167,  
32177,32186,32196,32205,32214,32224,32233,32242,32251,32259,  
32268,32277,32286,32294,32303,32311,32319,32328,32336,32344,  
32352,32360,32368,32376,32383,32391,32398,32406,32413,32421,  
32428,32435,32442,32449,32456,32463,32470,32477,32483,32490,  
32496,32503,32509,32515,32522,32528,32534,32540,32546,32551,  
32557,32563,32568,32574,32579,32585,32590,32595,32600,32605,  
32610,32615,32620,32625,32629,32634,32638,32643,32647,32651,  
32656,32660,32664,32668,32672,32675,32679,32683,32686,32690,  
32693,32697,32700,32703,32706,32709,32712,32715,32718,32721,  
32723,32726,32729,32731,32733,32736,32738,32740,32742,32744,  
32746,32748,32749,32751,32753,32754,32756,32757,32758,32759,  
32760,32761,32762,32763,32764,32765,32766,32766,32767,32767,  
32767,32767,32767,32767,32767

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void set_port(void);
void delay(void);
void busywait(void);
void writeinst(long inst);
void writechar(long ch);
void write_val(long c,long power);
void start_lcd(void);
void write_val(long c,long power);
long Om_cnv(void);
long diff(short Om);
long PI(long Wm);
long slip(long Isb);
long Integrate(long Wsl);
long Integrate_op(long Wsl);
long O_cal(long Osl,long Om);
long e_alp_f(long Wo,long Isb);
long e_beta_f(long Wo,long Isb);
void PWM(long e_alp,long e_beta,short O);

/##### System Initialize #####*/
void set_port(void)
{
    PFC.PAIOR.WORD = 0xCF80;
    PFC.PACR1.WORD = 0x0A02;
    PFC.PACR2.WORD = 0xBF95;
    PFC.PBIOR.WORD = 0x03FF;
    PFC.PBCR1.WORD = 0x01A0;
    PFC.PBCR2.WORD = 0xAAA0;
    INTC.ICR.BIT_IRQ4S = 1;
    INTC.IPRB.WORD |= 0x0000;
    INTC.IPRC.WORD |= 0x000B;
    INTC.IPRD.WORD |= 0x0000;
    INTC.IPRE.WORD |= 0x0000;
    PA.DR.WORD = 0x0000;

```

```

PB.DR.WORD    = 0x0000;
PB.DR.WORD    = 0x0001;          /*inrush = 1*/
}

void set_time(void)
{
/*----- SET ITU0 -----*/
ITU0.TCNT     = 0x0000;        /*clear up count before start*/
ITU0.GRA      = 100; /*get counter value = 40 usec */
ITU0.TCR.BYTE = 0x23;         /*TCNT cleared by GRA using internal/8*/
ITU0.TIOR.BYTE = 0;          /*GRA used but with no input output pins*/
ITU0.TSR.BYTE = 0;          /*make sure all status flags cleared*/
ITU0.TIER.BYTE |= 0x01;      /*enable interrupt from GRA compare match*/
ITU.TSTR.BYTE |= 0x01;      /*start the counter*/
/*----- SET ITU1 -----*/
ITU1.TCNT     = 0x0000;        /*clear up count before start*/
ITU1.GRA      = 1240; /*2480get counter value = 500 usec */
ITU1.TCR.BYTE = 0x23;         /*TCNT cleared by GRA using internal/8*/
ITU1.TIOR.BYTE = 0;          /*GRA used but with no input output pins*/
ITU1.TSR.BYTE = 0;          /*make sure all status flags cleared*/
ITU1.TIER.BYTE |= 0x01;      /*enable interrupt from GRA compare match*/
ITU.TSTR.BYTE |= 0x02;      /*start the counter*/
/*----- SET PWM MODE -----*/
ITU.TSTR.BYTE &= 0xE7;        /*Stop TCNT3,TCNT4 */
ITU3.TCR.BYTE = 0x03;        /*TCNT3,TCNT4 are falling edge and*/
ITU4.TCR.BYTE = 0x03;        /*counter clock = 10/8 MHz*/
ITU4.TIER.BYTE = 0x7C;       /*Interrupt by underflow*/
ITU.TFCR.BYTE = 0xE0;        /*TCNT3,TCNT4 operate together in PWM mode*/
ITU.TFCR.BYTE |= 0x0F;      /*BFA3,BFB3,BFA4,BFB4 =1 buffer mode */
ITU.TOCR.BYTE = 0xFC;        /*set O/P PWM invert*/
ITU.TMDR.BYTE |= 0x18;      /*Set TCNT3,TCNT4 in PWM mode*/
ITU4.TCNT     = 0;
ITU3.TCNT     = 9;          /*(12)Set dead time = 2.8 usec*/
ITU3.BRB     = 50;
ITU4.BRA     = 50;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ITU4.BRB = 50;
ITU3.BRA = 255; /*Set switching's period = 200 usec*/
ITU.TSTR.BYTE |= 0x78; /*Start counting*/
/*-----PHASE COUNTING MODE-----*/
ITU.TMDR.BYTE |= 0x40; /*timer 2 to phase counting mode*/
ITU2.TIER.BYTE = 0x7C; /*timer 2 interrupt by overflow*/
ITU2.TCNT = 0;
ITU.TSTR.BYTE |= 0x64; /*start counting*/
)

```

```
void set_ad(void)
```

```

{
    ad_value = 0;
    AD.CSR.BYTE = 0x47;
    AD.CR.BYTE = 0;
    AD.CSR.BYTE |= 0x20; /*enable A/D conversion*/
}

```

```
/*##### LCD display function #####*/
```

```
void delay(void)
```

```

{
    long j=0,i=0;
    for(j=0;j<7;j++)
    {
        for(i=0;i<50000;i++) /* delay time*/
        {
        }
    }
}

```

```
/*-----*/
```

```
void write_ch(char word[12])
```

```

{
    short i;
    long ch;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

inst = 0x0800;
writeinst(inst);
inst = 0x0200;
writeinst(inst);
for(i=0;i<12;i++)
{
    ch = (word[i]&(0x00F0));
    ch = ch<<4;
    writechar(ch);
    ch = (word[i]&(0x000F));
    ch = ch<<8;
    writechar(ch);
}
}
/*-----*/
void writechar(long ch)
{
    busywait();
    PA.DR.WORD = ch;
    PA.DR.BIT.B14 = 0;    /* R/W = L */
    PA.DR.BIT.B7 = 1;    /* RS = H */
    PA.DR.BIT.B15 = 1;  /* Enable = H */
    PA.DR.BIT.B15 = 0;  /* Enable = L */
}
/*-----*/
void writeinst(long inst)
{
    busywait();
    PA.DR.WORD = inst;
    PA.DR.BIT.B14 = 0;    /* R/W = L */
    PA.DR.BIT.B7 = 0;    /* RS = L */
    PA.DR.BIT.B15 = 1;  /* Enable = H */
    PA.DR.BIT.B15 = 0;  /* Enable = L */
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*-----*/
void busywait(void)
{
    PA.DR.BIT.B7 = 0;
    PA.DR.BIT.B14 = 1;
    PFC.PAIOR.BIT.B11 = 0;
    PA.DR.BIT.B15 = 1;
    while(PA.DR.BIT.B11 == 1)
    {
    }
    PA.DR.BIT.B15 = 0;
    PFC.PAIOR.BIT.B11 = 1;
}
/*-----*/
void start_lcd(void)
{
    short j=0;
    PA.DR.BIT.B7 = 0;      /* RS clear */
    PA.DR.BIT.B14 = 0;    /* R/W clear */
    PA.DR.BIT.B15 = 0;    /* Enable clear */
    for(j=0;j<3;j++)
    {
        delay();
        PA.DR.WORD = 0x0200; /* set 4 bit interface,2 line */
        PA.DR.BIT.B15 = 1;    /* Enable = H */
        PA.DR.BIT.B15 = 0;    /* Enable = L */
        delay();
        PA.DR.WORD = 0x0800;
        PA.DR.BIT.B15 = 1;    /* Enable = H */
        PA.DR.BIT.B15 = 0;    /* Enable = L */
    }
}
/*===== set up display in desired configuration =====*/
inst = 0x0200;          /* set 4 bit interface,2 line display*/
writeinst(inst);
inst = 0x0800;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

writeinst(inst);
inst = 0x0000;      /* display on cursor off*/
writeinst(inst);
inst = 0x0C00;
writeinst(inst);
inst = 0x0000;      /* clear display */
writeinst(inst);
inst = 0x0100;
writeinst(inst);
inst = 0x0000;      /* increment addr counter after each write*/
writeinst(inst);
inst = 0x0600;
writeinst(inst);
}
/*-----*/
void write_val(long c,long power)
{
    long d;

    while(lng >= 1)
    {
        if(lng == point)
        {
            ch = 0x0200;
            writechar(ch);
            ch = 0x0E00;
            writechar(ch);
        }
        else
        {
            if(lng>1)
            {
                d = c/power;
                c = c-(d*power);
                ch = 0x0300;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        writechar(ch);
        d = d<<8;
        writechar(d);
        power /= 10;
    }
else
{
    ch = 0x0300;
    writechar(ch);
    c = c<<8;
    writechar(c);
}
}
}
}
}
}
}
}
}
}

/***** Finish LCD function *****/

/***** Program interrupt *****/
#pragma interrupt(NMI)
void NMI(void)
{
    ITU3.BRB = 0;          /*82Control TIOCA3,TIOCB3*/
    ITU4.BRA = 0;          /*Control TIOCA4,TOCXA4*/
    ITU4.BRB = 0;          /*Control TIOCB4,TOCXB4*/

    while(PB.DR.BIT.B12 != 1) /*Wait clear fault button*/
    {
    }
}

#pragma interrupt(IRQ_4)
void IRQ_4(void)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}

#pragma interrupt(time_0) /*40 usec*/
void time_0(void)
{
    /*ITU0.TSR.BYTE &=0xFE;          /*Enable interrupt*/
}

#pragma interrupt(time_1) /*1 msec*/
void time_1(void)
{
    ITU3.BRB = P1;          /*P1,Control TIOCA3,TIOCB3*/
    ITU4.BRA = P2;          /*P2,Control TIOCA4,TOCXA4*/
    ITU4.BRB = P3;          /*P3,Control TIOCB4,TOCXB4*/

    ===== main calculation =====
    Om = Om_cnv();          /* radian xxxxxx => x.xxxxx*/
    Wm = diff(Encoder);     /* rad/s xxxxx => xxx.xx*/
    Isb = PI(Wm);           /* Amp xxxxx => xx.xx*/
    Wsl = slip(Isb);        /* rad/s xxxxx => xx.xx*/
    Wo = (P_pair*Wm)+Wsl;   /* rad/s xxxxxx => xxx.xx*/
    O = O_cal(Osl,Om);      /* radian xxxxx => x.xxx*/
    e_alp = e_alp_f(Wo,Isb); /* Volt xxxxx => xxx.xx*/
    e_beta = e_beta_f(Wo,Isb); /* Volt xxxxx => xxx.xx*/
    PWM(e_alp,e_beta,O);

    ITU1.TSR.BYTE &=0xFE;   /*Enable interrupt*/
}

#pragma interrupt(time_2)
void time_2(void)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(TTU2.TCNT == 0)
{
    real_dir = fwd;
}
else
{
    real_dir = rev;
    ITU2.TCNT = 65199;
}
ITU2.TSR.BYTE &= 0xFB;    /* clear flag*/
}

#pragma interrupt(time_4)
void time_4(void)
{
}

/*##### Other Function #####*/

void delay_3s(void)
{
    long t=0;
    while(t<7000000)
    {
        t++;
    }
}

/*##### Calculation Function #####*/
/*##### Encoder convert #####*/
long Om_cnv(void)
{
    long Om;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้









```

else
{
    angel = (2046-angel);          /* quadrant2 */
    sinx = sin1[angel];
}
}
else
{
    sinx = sin1[angel];
}
/*----- find cos value -----*/
angel = ang_buff + 0x400;
angel &= 0x0FFF;
if(angel>1023)
{
    if(angel>2047)
    {
        if(angel>3071)
        {
            angel = (4094-angel);
            cosx = sin1[angel];
            cosx = -1*cosx;
        }
        else
        {
            angel = (angel-2047);
            cosx = sin1[angel];
            cosx = -1*cosx;
        }
    }
}
else
{
    angel = (2046-angel);
    cosx = sin1[angel];
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
else
{
    cosx = sin1[angel];
}

ed = (e_alp*cosx)-(e_beta*sinx); /*Volt xxxxx => xxx.xx*/
ed /= 0x7FFF;
ed /= 10;
eq = (e_alp*sinx)+(e_beta*cosx);
eq /= 0x7FFF;
eq /= 10;

cd = ed; /* find sector */
cq = eq;
if(ed<0)
    ed = -ed;
if(eq<0)
    eq = -eq;
if((1000*eq) > (1732*ed))
    a = 1;
else
    a = 0;
ed = cd;
eq = cq;
if(eq>0)
{
    if(ed>0)
    {
        switch(a)
        {
            case 0 : s=1; break;
            case 1 : s=2; break;
        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else
{
    switch(a)
    {
        case 0 : s=3; break;
        case 1 : s=2; break;
    }
}
else
{
    if(ed>0)
    {
        switch(a)
        {
            case 0 : s=6; break;
            case 1 : s=5; break;
        }
    }
    else
    {
        switch(a)
        {
            case 0 : s=4; break;
            case 1 : s=5; break;
        }
    }
}
eq = eq*137;          /* (eq*237)/sqr(3) */
ed = ed*237;        /* ed*237 */
switch(s)
{
    case 1 : N1 = (ed-eq)/2540;    /*N1,N2 xxx => xxx*/
            N2 = (2*eq)/2540;      /* base = 254*10 */

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N0 = (237-TEMP1)/2;

T3 = N0;

N1 += N0;

T1 = N1;

N2 += N1;

T2 = N2;

break;

case 2 : N2=(cd+eq)/2540;

N1=(-cd+eq)/2540;

TEMP1 = (N1+N2);

N0 = (237-TEMP1)/2;

T1 = N0;

N1 += N0;

T3 = N1;

N2 += N1;

T2 = N2;

break;

case 3 : N2=(-cd-eq)/2540;

N1=(2\*eq)/2540;

TEMP1 = (N1+N2);

N0 = (237-TEMP1)/2;

T1 = N0;

N1 += N0;

T2 = N1;

N2 += N1;

T3 = N2;

break;

case 4 : N2=(-cd+eq)/2540;

N1=(-2\*eq)/2540;

TEMP1 = (N1+N2);

N0 = (237-TEMP1)/2;

T2 = N0;

N1 += N0;

T1 = N1;

N2 += N1;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่คัดลอกไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T3 = N2;

break;

case 5 : N2=(ed-eq)/2540;

N1=(-ed-eq)/2540;

TEMP1 = (N1+N2);

N0 = (237-TEMP1)/2;

T2 = N0;

N1 += N0;

T3 = N1;

N2 += N1;

T1 = N2;

break;

case 6 : N1=(ed+eq)/2540;

N2=(-2\*eq)/2540;

TEMP1 = (N1+N2);

N0 = (237-TEMP1)/2;

T3 = N0;

N1 += N0;

T2 = N1;

N2 += N1;

T1 = N2;

break;

}

if(T1 > 246)

T1 = 246;

if(T2 > 246)

T2 = 246;

if(T3 > 246)

T3 = 246;

if(T1 < 9)

T1 = 9;

if(T2 < 9)

T2 = 9;

if(T3 < 9)

T3 = 9;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
T1 +=9;
```

```
T2 +=9;
```

```
T3 +=9;
```

```
P1 = T1;
```

```
P2 = T2;
```

```
P3 = T3;
```

```
}
```

```
/*##### Main Program #####*/
```

```
void main(void)
```

```
{
```

```
short chk=0,dir,lock,HZ2;
```

```
long Isa1,power,rpm,torque;
```

```
U = 0;V = 0;I = 0;
```

```
real_dir = fwd;
```

```
dir = 1;
```

```
lock= -1;
```

```
over = 0;
```

```
Osl = 0;
```

```
P1=0x0F; P2=0x0F; P3=0x0F;
```

```
Wm_buff = 0;
```

```
Wsl_buff = 0;
```

```
Isb_buff = 0;
```

```
set_interrupt_mask(15);
```

```
set_port();
```

```
set_time();
```

```
set_ad();
```

```
start_lcd();
```

```
delay_3s();
```

```
PB.DR.WORD = 0x0000; /*inrush = 0*/
```

```

set_interrupt_mask(6);

while(1)
{

if((PB.DR.BIT.B15==0)&(PB.DR.BIT.B14==0)&(PB.DR.BIT.B13==0)
&(PB.DR.BIT.B12==0))
{
chk = 1;
}
if(chk==1)
{
ad_value = AD.DRD;          /*Obtain new value*/
AD.CSR.BYTE &= 0x7F;
AD.CSR.BYTE |= 0x20;       /*enable A/D conversion*/
ad_value = ad_value >> 6;
Hz = (ad_value*99)/1023;
Hz2 = Hz % 5;
Hz = Hz-Hz2;
W = Hz*31415/100;
inst = 0x0800;
writeinst(inst);
inst = 0x0100;
writeinst(inst);
Ing = 2;
point = 0;
power = 10;
write_val(Hz,power);          /* write Hz to LCD */

inst = 0x0C00;
writeinst(inst);
inst = 0x0000;
writeinst(inst);

if(Wm>=0)
rpm = Wm*300;
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





.DATA.L H'005B ;(22)  
 .DATA.L H'005F ;(23)  
 .DATA.L H'0063;(24)  
 .DATA.L H'0067;(25)  
 .DATA.L H'006B ;(26)  
 .DATA.L H'006F ;(27)  
 .DATA.L H'0073;(28)  
 .DATA.L H'0077;(29)  
 .DATA.L H'007B ;(30)  
 .DATA.L H'007F ;(31)(Reseved 13 - 31)

\*\*\*\*\* TRAPA 0 - 31 \*\*\*\*\*

.DATA.L H'0083 ;(32) 0 TRAPA (0 - 31)  
 .DATA.L H'0087 ;(33) 1  
 .DATA.L H'008B ;(34) 2  
 .DATA.L H'008F ;(35) 3  
 .DATA.L H'0093 ;(36) 4  
 .DATA.L H'0097 ;(37) 5  
 .DATA.L H'009B ;(38) 6  
 .DATA.L H'009F ;(39) 7  
 .DATA.L H'00A3 ;(40) 8  
 .DATA.L H'00A7 ;(41) 9  
 .DATA.L H'00AB ;(42) 10  
 .DATA.L H'00AF ;(43) 11  
 .DATA.L H'00B3 ;(44) 12  
 .DATA.L H'00B7 ;(45) 13  
 .DATA.L H'00BB ;(46) 14  
 .DATA.L H'00BF ;(47) 15  
 .DATA.L H'00C3 ;(48) 16  
 .DATA.L H'00C7 ;(49) 17  
 .DATA.L H'00CB ;(50) 18  
 .DATA.L H'00CF ;(51) 19  
 .DATA.L H'00D3 ;(52) 20  
 .DATA.L H'00D7 ;(53) 21  
 .DATA.L H'00DB ;(54) 22  
 .DATA.L H'00DF ;(55) 23

```
.DATA.L H'00E3      ;(56) 24
.DATA.L H'00E7      ;(57) 25
.DATA.L H'00EB      ;(58) 26
.DATA.L H'00EF      ;(59) 27
.DATA.L H'00F3      ;(60) 28
.DATA.L H'00F7      ;(61) 29
.DATA.L H'00FB      ;(62) 30
.DATA.L H'00FF      ;(63) 31 TRAPA(0 - 31)
```

```
***** IRQ 0 - 7 *****
```

```
.DATA.L H'0103      ;(64)IORQ0 H'0x100 to H'0x103
.DATA.L H'0107      ;(65)IORQ1 H'0x104 to H'0x107
.DATA.L H'010B      ;(66)IORQ2 H'0x108 to H'0x10B
.DATA.L H'010F      ;(67)IORQ3 H'0x10C to H'0x10F
.DATA.L _IRQ_4      ;(68)IORQ4 H'0x110 to H'0x113
.DATA.L H'0117      ;(69)IORQ5 H'0x114 to H'0x117
.DATA.L H'011B      ;(70)IORQ6 H'0x118 to H'0x11B
.DATA.L H'011F      ;(71)IORQ7 H'0x11C to H'0x11F
```

```
***** DMAC 0 - 3 *****
```

```
.DATA.L H'0123      ;(72)DEI0 H'0x120 to H'0x123
.DATA.L H'0127      ;(73)(Reserved)
.DATA.L H'012B      ;(74)DEI1 H'0x128 to H'0x12B
.DATA.L H'012F      ;(75)(Reserved)
.DATA.L H'0133      ;(76)DEI2 H'0x130 to H'0x133
.DATA.L H'0137      ;(77)(Reserved)
.DATA.L H'013B      ;(78)DEI3 H'0x138 to H'0x13B
.DATA.L H'013F      ;(79)(Reserved)
```

```
***** ITU 0 - 4 *****
```

```
** ITU0 **
```

```
.DATA.L _time_0     ;(80)IMIA0 H'0x140 to H'0x143
.DATA.L H'0147      ;(81)IMIB0 H'0x144 to H'0x147
.DATA.L H'014B      ;(82)OVI0 H'0x148 to H'0x14B
.DATA.L H'014F      ;(83)(Reserved)
```

```
** ITU1 **
```

```
.DATA.L _time_1     ;(84)IMIA1 H'0x150 to H'0x153
.DATA.L H'0157      ;(85)IMIB1 H'0x154 to H'0x157
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

.DATA.L H'015B ;(86)OVI1 H'0x158 to H'0x15B

.DATA.L H'015F ;(87)(Reserved)

;\*\* ITU2 \*\*

.DATA.L H'0163 ;(88)IMIA2 H'0x160 to H'0x163

.DATA.L H'0167 ;(89)IMIB2 H'0x164 to H'0x167

.DATA.L \_time\_2 ;(90)OVI2 H'0x168 to H'0x16B

.DATA.L H'016F ;(91)(Reserved)

;\*\* ITU3 \*\*

.DATA.L H'0173 ;(92)IMIA3 H'0x170 to H'0x173

.DATA.L H'0177 ;(93)IMIB3 H'0x174 to H'0x177

.DATA.L H'017B ;(94)OVI3 H'0x178 to H'0x17B

.DATA.L H'017F ;(95)(Reserved)

;\*\* ITU4 \*\*

.DATA.L H'0183 ;(96)IMIA4 H'0x180 to H'0x183

.DATA.L H'0187 ;(97)IMIB4 H'0x184 to H'0x187

.DATA.L \_time\_4 ;(98)OVI4 H'0x188 to H'0x18B

.DATA.L H'018F ;(99)(Reserved)

\*\*\*\*\*SCI 0 - 1 \*\*\*\*\*

;\*\* SCIO \*\*

.DATA.L H'0193 ;(100)ERIO H'0x190 to H'0x193

.DATA.L H'0197 ;(101)RxIO H'0x194 to H'0x197

.DATA.L H'019B ;(102)TxIO H'0x198 to H'0x19B

.DATA.L H'019F ;(103)TEIO H'0x19C to H'0x19F

;\*\* SCII \*\*

.DATA.L H'01A3 ;(104)ERII H'0x1A0 to H'0x1A3

.DATA.L H'01A7 ;(105)RxII H'0x1A4 to H'0x1A7

.DATA.L H'01AB ;(106)TxII H'0x1A8 to H'0x1AB

.DATA.L H'01AF ;(107)TEII H'0x1AC to H'0x1AF

\*\*\*\*\*PRT & A/D \*\*\*\*\*

.DATA.L H'01B3 ;(108)Parity control unit

.DATA.L H'01B7 ;(109)ITI A/D

\*\*\*\*\*

.END

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
#####  
;  
; Interrupt Service Program  
#####
```

```
.section P,code,align=4
```

```
.global _set_interrupt_mask
```

```
; value passed in r4
```

```
_set_interrupt_mask:
```

```
mov.l r14,@-r15
```

```
mov.l r15,r14
```

```
mov.l r0,@-r15
```

```
mov.l r1,@-r15
```

```
stc sr,r0 ;get current SR value
```

```
mov.l __mask,r1
```

```
and r1,r0 ;clear the old imask bits
```

```
shll2 r4
```

```
shll2 r4
```

```
not r1,r1
```

```
and r1,r4 ;clear all but the imask bits
```

```
or r4,r0 ;set the new imask bits
```

```
ldc r0,sr ;load new SR value
```

```
mov.l @r15+,r1
```

```
mov.l @r15+,r0
```

```
rts
```

```
mov.l @r15+,r14
```

```
.align 4
```

```
__mask:
```

```
.data.l H'ffffff0f
```

```
.end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
#####
```

```
;!! Start.src
```

```
;!!
```

```
;!! Reset initialisation code
```

```
;!!
```

```
#####
```

```
.section P,code,align=4
```

```
.global _start
```

```
.import _main
```

```
_start:
```

```
;!Initialise stack pointer to new user stack
```

```
mov.l stack_k,r15
```

```
;!set up the bus controller for the EVB
```

```
;! WCR1 with 0
```

```
mov.l wcr1_k,r0
```

```
sub r1,r1
```

```
mov.w r1,@r0
```

```
mov.l wcr3_k,r0
```

```
mov.w state_k,r1
```

```
mov.w r1,@r0
```

```
;!BSR to use /LBS, /HBS, /WR
```

```
mov.l bcr_k,r0
```

```
mov.w bas_k,r1
```

```
bra start_0
```

```
mov.w r1,@r0
```

```
.align 4
```

```
bcr_k: .data.l H'5ffffa0
```

```
wcr1_k: .data.l H'5ffffa2
```

```
wcr3_k: .data.l H'5ffffa6
```

```
.res.w 1
```

```
bas_k: .data.w H'0800
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        ;!Setup monitor vectors from A002000 onwards
        ;!Basically copy 00-11f to a002000-a00211f
start_0:
        mov     #0,r0          ;!setup pointer to monitor vector table
        mov.l   offset,r1     ;!setup pointer to new vector table
        mov.l   vecend,r3     ;!address 0x11f stop value

;nextvec:
        ;mov.l   @r0,r2       ;!get data from monitor vector table
        ;mov.l   r2,@r1       ;!write data to new vector table
        ;add     #4,r0         ;!next vector from monitor
        ;add     #4,r1         ;!next vector to write to
        ;cmp/gt  r0,r3        ;!only write vectors up to external interrupts
        ;bt     nextvec       ;!if less than 0x11f next vector write

        ;!else now update VBR to show new address of vector table
        mov.l   offset,r0     ;!get offset to start of vector table
        ldc     r0,vbr        ;!load value in VBR

        ;!now initialise daa segments - either clear or set values
        mov.l   _D_BGN,r0
        mov.l   _D_END,r1
        mov.l   _D_ROM,r2

start_1:
        mov.l   @r2,r3        ;!get from src
        mov.l   r3,@r0        ;!place in dest
        add     #4,r2         ;!inc src
        add     #4,r0         ;!inc dest
        cmp/gt  r0,r1         ;!dest == _D_END?
        bt     start_1

```

```

;! zero out section B

```

```

mov.l   _B_BGN,r0

```

```

mov.l   _B_END,r1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

mov    #0,r2
start_2:
mov.l  r2,@r0
add    #4,r0
cmp/ge r0,r1
bt     start_2

;! call main
mov.l  main_k,r0
jsr    @r0
or     r0,r0
;! call exit
mov    r0,r4
mov.l  exit_k,r0
jsr    @r0
or     r0,r0
_exit: nop
bra    _exit
nop
.align 2
exit_k: .data.l _exit
main_k: .data.l _main
offset: .data.l H'0A002000
vecend: .data.l H'0000011F
stack_k: .data.l H'0FFFFFFC
_D_ROM: .data.l H'0A007A00           ;start address of section D
_D_BGN: .data.l H'0FFFE000         ;start address of section R
_D_END: .data.l H'0FFFEFFF         ;end address of section R
_B_BGN: .data.l H'0FFFF000         ;start address of section B
_B_END: .data.l H'0FFFF100         ;end address of section B
.section C,data,align=4
.section D,data,align=4
.section R,data,align=4
.section B,data,align=4

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

.section P,code,align=4
.global _set_interrupt_mask

; value passed in r4
_set_interrupt_mask:
    mov.l r14,@-r15
    mov.l r15,r14

    mov.l r0,@-r15
    mov.l r1,@-r15
    stc sr,r0 ;get current SR value
    rmov.l __mask,r1
    and r1,r0 ;clear the old imask bits
    shll2 r4
    shll2 r4
    not r1,r1
    and r1,r4 ;clear all but the imask bits
    or r4,r0 ;set the new imask bits
    ldc r0,sr ;load new SR value
    mov.l @r15+,r1
    mov.l @r15+,r0

    rts

    mov.l @r15+,r14

.align 4
__mask:
    .data.l H'ffffff0f
    .end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทดสอบโปรแกรมในส่วนการสร้างสัญญาณ PWM โดยใช้หลักการของสเปซเวกเตอร์ ซึ่งใช้การปรับความถี่ด้วยหลักการ V/F โดยประยุกต์โปรแกรมควบคุมแบบเวกเตอร์ดังนี้

1. ในส่วนคำนวณค่าแรงดันและมุมได้แก้ไขฟังก์ชันการคำนวณที่มีช่วงเวลาในการทำงาน ทุกๆ 500 ไมโครวินาทีเป็นดังนี้

```
#pragma interrupt(time_1)      /*1 msec*/
void time_1(void)
{
    ITU3.BRB = P1;              /*P1,Control TIOCA3,TIOCB3*/
    ITU4.BRA = P2;              /*P2,Control TIOCA4,TOCXA4*/
    ITU4.BRB = P3;              /*P3,Control TIOCB4,TOCXB4*/

    /*===== main calculation =====*/
    if(Hz<50)
    {
        V = Hz*44;
    }
    else
    {
        V = 2200;
    }

    period = 10000/Hz;
    theta = 40950/period;
    theta_t = theta_t + theta;
    theta_t &= 0x0FFF;
    PWM(e_alp,e_beta,theta_t);

    ITU1.TSR.BYTE &=0xFE;      /*Enable interrupt*/
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ในการสร้างแรงดัน $V_d$ , $V_q$ ในฟังก์ชันสร้างสัญญาณ PWM จากสมการ

```
ed = (e_alp*cosx)-(e_beta*sinx); /*Volt xxxxx => xxx.xx*/
```

```
ed /= 0x7FFF;
```

```
ed /= 10;
```

```
eq = (e_alp*sinx)+(e_beta*cosx);
```

```
eq /= 0x7FFF;
```

```
eq /= 10;
```

เป็นสมการในการหา  $V_d$  ,  $V_q$  ซึ่งเป็นการแปลงค่าแรงดันของหลักการ  $V/F$  ดังนี้

```
ed = V*cosx;
```

```
ed /= 32767;
```

```
eq = V*sinx;
```

```
eq /= 32767;
```





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Feature	Description
CPU	Original Hitachi architecture
	32-bit internal data paths
	General-register machine:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sixteen 32-bit general registers</li> <li>• Three 32-bit control registers</li> <li>• Four 32-bit system registers</li> </ul>
	RISC-type instruction set:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instruction length: 16-bit fixed length for improved code efficiency</li> <li>• Load-store architecture (basic arithmetic and logic operations are executed between registers)</li> <li>• Delayed unconditional branch instructions reduce pipeline disruption</li> <li>• Instruction set optimized for C language</li> </ul>
	Instruction execution time: one instruction/cycle (50 ns/instruction at 20-MHz operation)
	Address space: 4 Gbytes available on the architecture
	On-chip multiplier: multiplication operations (16 bits × 16 bits → 32 bits) executed in 1–3 cycles, and multiplication/accumulation operations (16 bits × 16 bits + 42 bits → 42 bits) executed in 2–3 cycles
	Five-stage pipeline
Operating modes	Operating modes:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• On-chip ROMless mode</li> </ul>
	Processing states:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Power-on reset state</li> <li>• Manual reset state</li> <li>• Exception processing state</li> <li>• Program execution state</li> <li>• Power-down state</li> <li>• Bus-released state</li> </ul>	
Power-down states:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sleep mode</li> <li>• Software standby mode</li> </ul>	

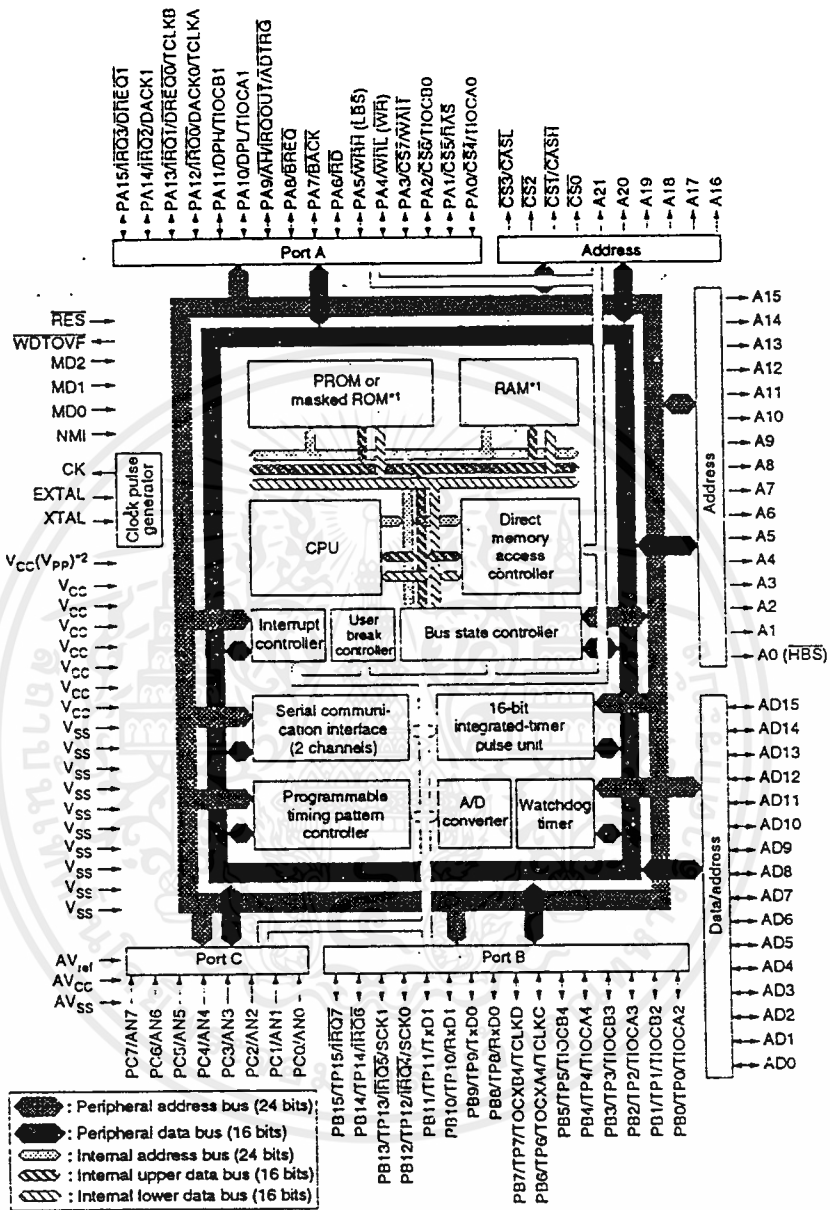
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Feature	Description
Interrupt controller (INTC)	Nine external interrupt pins (NMI, $\overline{IRQ0}$ – $\overline{IRQ7}$ )
	Thirty-one internal interrupt sources
	Sixteen programmable priority levels
User break controller (UBC)	Generates an interrupt when the CPU or DMAC generates a bus cycle with specified conditions
	Simplifies configuration of a self-debugger
Clock pulse generator (CPG)	On-chip clock pulse generator (maximum operating frequency: 20 MHz):
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 20-MHz pulses can be generated from a 20-MHz crystal with a duty cycle correcting circuit</li> </ul>
Bus state controller (BSC)	Supports external memory access:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sixteen-bit external data bus</li> </ul>
	Address space divided into eight areas with the following preset features:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bus size (8 or 16 bits)</li> <li>• Number of wait cycles can be defined by user.</li> <li>• Type of area (external memory area, DRAM area, etc.) <ul style="list-style-type: none"> <li>— Simplifies connection to ROM, SRAM, DRAM, and peripheral I/O</li> </ul> </li> <li>• When the DRAM area is accessed: <ul style="list-style-type: none"> <li>— <math>\overline{RAS}</math> and <math>\overline{CAS}</math> signals for DRAM are output</li> <li>— <math>T_p</math> cycles can be generated to assure <math>\overline{RAS}</math> precharge time</li> <li>— Address multiplexing is supported internally, so DRAM can be connected directly</li> </ul> </li> <li>• Chip select signals (<math>\overline{CS0}</math> to <math>\overline{CS7}</math>) are output for each area</li> </ul>
	DRAM refresh function:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Programmable refresh interval</li> <li>• Supports CAS-before-RAS refresh and self-refresh modes</li> </ul>
	DRAM burst access function:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Supports high-speed access modes for DRAM</li> </ul>
	Wait cycles can be inserted by an external WAIT signal
	One-stage write buffer improves the system performance
	Data bus parity can be generated and checked


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	Description
Memory access (DMAC) (4 channels)	<p>Permits DMA transfer between the following modules:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• External memory</li> <li>• External I/O</li> <li>• On-chip memory</li> <li>• Peripheral on-chip modules (except DMAC)</li> </ul> <hr/> <p>DMA transfer can be requested from external pins, on-chip SCI, on-chip timers, and on-chip A/D converter</p> <hr/> <p>Cycle-steal mode or burst mode</p> <hr/> <p>Channel priority level is selectable</p> <hr/> <p>Channels 0 and 1: dual or single address transfer mode is selectable; external request sources are supported; Channels 2 and 3: dual address transfer mode, internal request sources only</p>
16-bit integrated-timer pulse unit (ITU)	<p>Ten types of waveforms can be output</p> <hr/> <p>Input pulse width and cycle can be measured</p> <hr/> <p>PWM mode: pulse output with 0–100% duty cycle (maximum resolution: 50 ns)</p> <hr/> <p>Complementary PWM mode: can output a maximum of three pairs of non-overlapping PWM waveforms</p> <hr/> <p>Phase counting mode: can count up or down according to the phase of an external two-phase clock</p>
Timing pattern controller (TPC)	<p>Maximum 16-bit output (4 bits × 4 channels) can be output</p> <hr/> <p>Non-overlap intervals can be established between pairs of waveforms</p> <hr/> <p>Timing-source timer is selectable</p>
Watchdog timer (WDT) (1 channel)	<p>Can be used as watchdog timer or interval timer</p> <hr/> <p>Timer overflow can generate an internal reset, external signal, or interrupt</p> <hr/> <p>Power-on reset or manual reset can be selected as the internal reset</p>
Serial communication interface (SCI) (2 channels)	<p>Asynchronous or clocked synchronous mode is selectable</p> <hr/> <p>Can transmit and receive simultaneously (full duplex)</p> <hr/> <p>On-chip baud rate generator in each channel</p> <hr/> <p>Multiprocessor communication function</p>
A/D converter	<p>Ten bits × 8 channels</p> <hr/> <p>Can be externally triggered</p> <hr/> <p>Variable reference voltage</p>
I/O ports	<p>Total of 40 I/O lines (32 input/output lines, 8 input-only lines):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Port A: 16 input/output lines (input or output can be selected for each bit)</li> <li>• Port B: 16 input/output lines (input or output can be selected for each bit)</li> <li>• Port C: 8 input lines</li> </ul>
Large on-chip memory	<p>(on-chip ROM version): 64-kbyte electrically programmable ROM or masked ROM, and 4-kbyte RAM</p> <hr/> <p>(ROMless version): 8-kbyte RAM</p> <hr/> <p>32-bit data can be accessed in one clock cycle</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ  
การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในระบบควบคุมแบบเวกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในระบบควบคุมแบบเวกเตอร์

การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์

มอเตอร์ที่ใช้ทำการทดสอบมีค่าพิกัดต่างๆดังต่อไปนี้

ขนาด	1 KW
แรงดัน	220/380 V ( Δ/Y )
กระแส	4.32/2.5 A ( Δ/Y )

ทำการทดลองหาความต้านทานขดลวดด้วยวิธี VI Method จะ ได้ค่าดังตาราง

V (volt)	I (A.)	R (Ω)
1	0.12	8.33
2	0.23	8.7
3	0.34	8.82
4	0.47	8.51
5	0.58	8.62

ซึ่ง โดยค่าเฉลี่ยแล้วจะได้ค่าความต้านทานขดลวดเท่ากับ 8.6 Ω ต่อขด

ทำการทดลอง No-load Test โดยต่อมอเตอร์แบบ Δ ได้ผลดังนี้

แรงดัน	220 V
กระแส	1.7 A
กำลังสูญเสีย	100 W

ทำการทดลอง Lock-Rotor Test ได้ผลดังนี้

แรงดัน	68 V
กระแส	4.3 A
กำลังสูญเสีย	300 W

จากนั้นนำค่าจากการทดสอบมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์

$$Z_n = \frac{V}{\sqrt{3}I} = 74.72\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

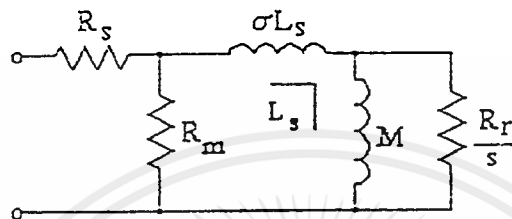
$$R_n = \frac{P}{3I^2} = 11.52 \Omega$$

$$X_n = \sqrt{Z_n^2 - R_n^2} = 73.83 \Omega$$

$$Z_l = \frac{V}{\sqrt{3}I} = 9.13 \Omega$$

$$R_l = \frac{P}{3I^2} = 5.41 \Omega$$

$$X_l = \sqrt{Z_l^2 - R_l^2} = 7.35 \Omega$$



รูปแสดงวงจรสมมูลที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์

จากวงจรสมมูลดังรูป ที่ No-load test จะ ได้สมการดังต่อไปนี้

$$R_s + \frac{R_m \cdot jX_s}{R_m + jX_s} \approx R_n + jX_n$$

เมื่อทำการแก้สมการจะได้  $R_m = 145.389 \Omega$  และ  $X_s = 17.595 \Omega$

และจากการทดสอบ Lock-Rotor test จะ ได้สมการดังต่อไปนี้

$$R_s + \frac{R_m \cdot jZ_3}{R_m + jZ_3} \approx R_l + jX_l$$

$$Z_3 = j(X_s - X_m) + \frac{R_r \cdot jX_m}{R_r + jX_m}$$

เมื่อทำการแก้สมการจะได้  $R_r = 0.71 \Omega$  และ  $X_m = 15.71 \Omega$

เพราะฉะนั้นจะได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์ดังต่อไปนี้

$$R_s = 2.87 \Omega$$

$$R_r = 0.71 \Omega$$

$$R_m = 145.389 \Omega$$

$$\sigma L_s = 0.006 \text{ H}$$

$$L_m = M = L_r = 0.05 \text{ H}$$

### การหาค่า $i_{sc}$

การพิกัดกระแส = 4.32 A และกระแสขณะไม่มีโหลด = 1.7 A

แวกเตอร์ของกระแสพิกัด ( $i_s$ ) จะมีขนาด = 7.48 A และแวกเตอร์ของกระแสขณะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_{sa} = 2.944 \text{ A} \quad (i_{sa}^{ref})$$

### การหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ (Moment of inertia ; J)

เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นมอเตอร์แบบพิเศษคือเป็น Induction Motor และ Synchronous Motor ในตัวเดียวกันแล้วแต่จะเลือกใช้งานแบบใดจึงทำให้ถ้าทำการทดลองโดยวิธีวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว ผลของความผิดจากแปรปรวนจะทำให้ค่าที่ได้ผิดพลาดไปค่อนข้างมาก จึงเลือกใช้วิธีทางกลศาสตร์คือนำน้ำหนักของโรเตอร์แล้วคำนวณค่า J จากสูตรการหาค่า J ของรูปทรงกระบอกคือ

$$J = \frac{1}{2} mr^2$$

J = โมเมนต์ความเฉื่อย (kg-m<sup>2</sup>)

m = น้ำหนัก (kg)

r = รัศมี (m)

น้ำหนักของโรเตอร์(คิดเฉพาะส่วนที่อยู่นอกจุดหมุน) = 8.8 kg ,รัศมี = 0.051 m ได้

$$J = 0.0115 \text{ kg m}^2$$

และเมื่อประมาณค่ารวมกับ Coupling และ Encoder ค่า J จะมีค่าประมาณ 0.014 kg m<sup>2</sup>

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือ,สนับสนุนและได้รับการอำนวยความสะดวกจากบุคคลหลายท่าน ผู้จัดทำขอกล่าวขอบพระคุณ อ.คูสิต สุขสวัสดิ์ ซึ่งช่วยให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด,อ.พิชิต ดำยอง ให้ยืมเครื่องมือวัดในการทดสอบและบริษัท novem engineering ให้คำปรึกษา,ข้อมูลและอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นอย่างดี

และขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด ขอขอบคุณบุคคลทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## เอกสารอ้างอิง

- [1] F.harashima, S.Kouhei, M.Kajita and G.Stanke,"Multimicroprocessor -Based Control System for Quick Response Induction Motor Drive", IEEE Transaction on Industry application , Vol.IA-21,No.4, pp.602-609,1985.
- [2] H.Boreck, H.Skudelny and G.Stanke," Analysis and Realization of a Pulse-width Modulation Based on Voltage Space Vectors", IEEE Transaction on Industry application Vol24, No.1,pp142-150, 1988.
- [3] K.Ohinishi, H.Suzuki, K.Miyachi and M.Terashima,"Decoupling Control Secondary Flux and Secondary current in Induction Motor Drive with Controlled Voltage Source and Its comparision with Volts/Hertz Control", IEEE Transaction on Industry Application ,Vol.IA-21, No.1, pp.241-247,1985.
- [4] ไสภณ สมัยรัฐ ,"ระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์",คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2538
- [5] คุณิต สุขสวัสดิ์,มณฑร วิรัชศิลป์ ,อภิชาติ เต็มเสรีกุล ,อภิรักษ์ จันทรวรพันธ์และ อธิโรจน์ บุญประเสริฐศรี,"อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สำหรับอินดักชันมอเตอร์",คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2538