

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
INDUCTION MOTOR CONTROL**



โดย
นางสาวสุนิศา คำเชื้อ
นายบุญเทือง ยอดคอน
นายอนันต์ เต็มโคตร

รฟพ.
๘818 ก
๘650

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**82015**
วัน,เดือน,ปี.....**4 ก.ค. 2551**

b..... 11942841
i.....

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทบริหารศึกษาศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
INDUCTION MOTOR CONTROL

คณะผู้จัดทำ

นางสาวสุนิสา คำเชื้อ
นายบุญเรือง ยอดออน
นายอนันต์ เต็มโคตร



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ดร. นนทวัฒน์ จุลเคชะ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

โดย

นางสาวสุนิศา คำเชื้อ 47010869

นายบุญเทือง ยอดออน 48015294

นายอนันต์ เต็มโคตร 48015318

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.นนทวัฒน์ จุลเคชะ

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการศึกษาการออกแบบ ของวงจรขับอินเวอร์เตอร์ของอินดักชันมอเตอร์ จะประกอบด้วย วงจรคอนเวอร์เตอร์ (AC/DC) วงจรอินเวอร์เตอร์ (DC/AC) และส่วนควบคุมการทำงาน (MICROCONTROLLER) สำหรับวงจร คอนเวอร์เตอร์นั้นเราได้ใช้วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอดโดยจะใช้ตัว Capacitor เป็นตัวกรองแรงดันกระแสสลับ AC ให้เป็นแรงดันกระแสตรง DC เพื่อจ่ายแรงดันให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์เราจะใช้ไอซีเบอร์ FSBS5CH6 เพราะสะดวกต่อการใช้งานเนื่องจากเป็นเพาเวอร์โมดูล พร้อมทั้งมีวงจร Bootstrap และ Protection ภายใน การขับอินดักชันมอเตอร์ในส่วนของอินเวอร์เตอร์จะมีระบบวงจรประวิงเวลา (Dead Time control) เพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่างอุปกรณ์สวิตซ์ตัวบนและอุปกรณ์สวิตซ์ตัวล่างของอินเวอร์เตอร์ที่อยู่บนกิ่งเดียวกันในการขับอินดักชันมอเตอร์เราจะส่งสัญญาณ 6-step และสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม(PWM) ด้วยเทคนิคเวกเตอร์มอดดูเลชั่น ส่วนการสร้างสัญญาณจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ M16C/62 ของ MITSUBISHI ในการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INDUCTION MOTOR CONTROL

Student

Miss. Sunisa Kumchua

Mr.Boontuang Yodon

Mr.Anan Temkot

Thesis Advisor

Asst.prof.Dr.Nontawat Chuladaycha



ABSTRACT

This thesis presents the design and construction of the drive of the induction motor. It is made up of AC/DC converter, DC/AC inverter, and microcontroller. For the AC/DC converter, we use single-phase full- bridge rectifier, and capacitor filter to rectify output voltage. For the inverter, we use IC FSBS5CH60 because it is easier and more convenient to use because it contains IGBT and the drive circuit for IGBT. In this IC, it has Bootstrap and Protection circuit. The inverter has the dead time for short circuit protection and over-current protection. For drive induction motor, it uses two techniques 6-step and SVM (Space Vector Modulation) techniques. For the microcontroller, we use M16C/62A to control the gate signal of the inverter to drive the electric motor.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ของท่านที่ได้ให้คำปรึกษาคำแนะนำและให้ความรู้ ตลอดจนจนถึงการสนับสนุน อุปกรณ์การทำโครงการ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งที่คอยห่วงใยเป็นกำลังใจและสนับสนุนด้านการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณรุ่นพี่ปริญญาโททุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษา และคำแนะนำตลอดถึงความช่วยเหลือต่างๆ ในการทำโครงการในครั้งนี้ด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้คำปรึกษา และถ่ายทอดความรู้ให้แก่ผู้จัดทำ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์นี้ ทางผู้ศึกษาขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

นางสาวสุนิศา

คำเชื้อ

นายบุญเทือง

ยอดอน

นายอนันต์

เต็ม โศตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส	3
2.1.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก	4
2.1.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์แบบขลวด	5
2.2 การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	5
2.3 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	6
2.3.1 วงจรและรูปคลื่นสัญญาณ	6
2.3.2 หลักการควบคุมทางเวกเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับเฟส	8
2.3.3 Three-Phase Induction Motor	10
2.4 Space Vector Modulation SVM	17
2.5 การแปลงปริภูมิ	18
2.5.1 เวกเตอร์ปริภูมิ	21
2.6 การเปรียบเทียบเทคนิค PWM	23
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้างชุดวงจร	24
3.1 วงจรเรียงกระแส(CONVERTER)	24
3.1.1 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด	24
3.1.2 วงจรกรองแรงดัน	24
3.1.3 วงจรกรองแรงดันโดยใช้ตัวเก็บประจุ	25
3.1.4 การออกแบบวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด	26
3.2 การออกแบบและการสร้างชุดกำลังของอินเวอร์เตอร์(INVERTER)	27
3.2.1 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.2 รายละเอียดของไอซีเบอร์ FSBS5CH6	27
3.2.3 การประยุกต์ใช้งาน ไอซีเบอร์ FSBS5CH6	29
3.2.4 การทำงานและการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์	30
3.2.4.1 Impedance cell	30
3.2.4.2 Function and Protection Circuit	31
3.2.4.3 Under voltage Protection LVIC	31
3.2.4.4 Shot-Circuit Protection	32
3.2.4.5 Selecting Current Sensing Shunt Resistor	33
3.2.4.6 Bootstrap Circuit	34
3.3 การสร้างวงจรประวิงเวลา	35
3.4 การสร้างสัญญาณ 6-Step	36
3.5 หลักการสร้าง Space Vector	37
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	42
4.1 การทดลองและผลการทดลองที่ได้จากสัญญาณ 6-Step	42
4.1.1 ผลการทดลองที่ได้จาก CONVERTER ขับโหลดความต้านทาน	42
4.1.2 ผลการทดลองที่ได้จากวงจรประวิงเวลา	43
4.1.3 ผลการทดลองที่ได้จากวงจรขับ IGBT	44
4.1.4 ผลการทดลองที่ได้จากINVERTER ขับโหลดความต้านทาน ที่แรงดัน ไฟฟ้าอินพุตต่างๆ	44
4.1.5 ผลการทดลองที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	45
4.2 ผลการทดลองที่ได้จากการต่อวงจรสำเร็จในการขับ โหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ	45
4.3 ผลการวัดค่าฮาร์โมนิกของกระแสที่ได้จากการป้อนสัญญาณแบบ 6-Step	49
4.4 การทดลองและผลการทดลองที่ได้จากเทคนิค Space Vector Modulation จากการคำนวณ โดยโปรแกรม Excel	50
4.5 การทดลองและผลการทดลองที่ได้จากเทคนิค Space Vector Modulation โดยการขับอินดักชั่นมอเตอร์	52
4.6 ผลการวัดค่าฮาร์โมนิกของกระแสที่ได้จากวิธี Space Vector Modulation (SVM)	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์	หน้า
	56
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก ก ข้อมูลของ IC เบอร์ FSBS5CH60	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โรเตอร์	4
2.2 สเตเตอร์	4
2.3 วงจรสมมูลของอินดักชันมอเตอร์	5
2.4 วงจรและรูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ PWM	7
2.5 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แสดงช่วงกำลังงานไม่ให้ไหลสู่โหลด	8
2.6.1 โครงสร้างมอเตอร์และเวกเตอร์แรงดันระหว่างขด Run กับขด Start	8
2.6.2 โครงสร้างสวิตช์ 3 เฟส	9
2.6.3 เวกเตอร์แสดงแรงดันการควบคุมมอเตอร์	9
2.7 สัญญาณ sine wave	17
2.8 พิกัดเวกเตอร์ในระบบสามเฟส และ space vector $u(t)$	19
2.9 Voltage space vector and its components in d,q	19
2.10 ช่วงเวลาการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์	20
2.11 เวกเตอร์ปริภูมิ	22
3.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์	25
3.2 Description of Dummy Pins	27
3.3 การสร้างวงจร Inverter	29
3.4 วงจร Inverter 3 เฟส	30
3.5 Waveform of V_{BS} and $-V_S$ According to $R_{E(H)}$	30
3.6 Timing Chart of Low-side Under-voltage Protection Function	31
3.7 Timing Chart of Short-circuit Protection Function	32
3.8 Example of Short Circuit Protection Circuit with 1 shunt Resistor	33
3.9 Bootstrap Circuit Operation and Initial Charging	34
3.10 การเกิด Dead Time	35
3.11 วงจร Inverter	36
3.12 สัญญาณควบคุมขาเกของ IGBT เพื่อสร้างสัญญาณ 6 step	36
3.13 การแปลงพิกัดเวกเตอร์ 3มิติ เป็น 2 มิติ (แรงดัน 3เฟส abc ไปเป็นพิกัด d-q)	37
3.14 สัญญาณ sine wave ที่ป้อนให้กับมอเตอร์	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

หน้า

3.15 การเคลื่อนที่ของ space vector	40
3.16 เวกเตอร์อ้างอิงที่เกิดจากการรวมของเวกเตอร์สองตัวใน sector1	40
4.1 สัญญาณขับ โหลดความต้านทานของ Converter	42
4.1.1 การประวิงเวลาที่ 2 us ของสัญญาณขับเกท ช่วงขอบขาลง	43
4.1.2 การประวิงเวลาที่ 2 us ของสัญญาณขับเกทช่วงขอบขาขึ้น	43
4.1.3 สัญญาณขับ IGBT ในกิ่งเดียวกัน	44
4.1.4 สัญญาณ 6 step ของ V_{AN} และ I_A	44
4.1.5 สัญญาณ 6 step ของ V_{AN} เทียบกับ V_{BN}	45
4.2 สัญญาณของกระแสและแรงดันที่ได้จากขั้วมอเตอร์ทางด้านอินพุตของ Inverter	45
4.2.1 สัญญาณของกระแสและแรงดันทางด้านเอาต์พุตของ Inverter	46
4.2.2 V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} (line to line voltage) ที่ได้จากสัญญาณ 6-step ในการขับอินดักชั่นมอเตอร์	46
4.2.3 กระแสทางด้านเอาต์พุต (i_a , i_b , i_c) ในแต่ละเฟส ที่ได้จากการส่งสัญญาณ 6-step ในการขับอินดักชั่นมอเตอร์	47
4.2.4 แรงดันไฟฟ้า V_{ab} เทียบกับกระแสไฟฟ้า i_a ในการส่งสัญญาณ 6-step ในการขับอินดักชั่นมอเตอร์สามเฟส	47
4.2.5 แรงดันไฟฟ้า V_{bc} เทียบกับกระแสไฟฟ้า i_b ในการส่งสัญญาณ 6-step ในการขับอินดักชั่นมอเตอร์	48
4.2.6 แรงดันไฟฟ้า V_{ca} เทียบกับกระแสไฟฟ้า i_c ในการส่งสัญญาณ 6-step ในการขับอินดักชั่นมอเตอร์	48
4.2.7 แรงดันไฟฟ้า V_{ab} เทียบกับกระแสไฟฟ้า i_a , i_b , i_c ในการส่งสัญญาณ 6-step ในการขับอินดักชั่นมอเตอร์	49
4.3 การวัดค่าฮาร์โมนิกของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการป้อนสัญญาณแบบ 6-Step	49
4.4 กราฟสัญญาณแรงดัน ไฟฟ้าโดยวิธี 6-Step $V_{d(6-step)}$, $V_{q(6-step)}$ จากโปรแกรมExcel	50
4.4.1 กราฟสัญญาณแรงดัน ไฟฟ้า $V_{d(sm)}$, $V_{q(sm)}$ จาก โปรแกรมExcel ในการขับอินดักชั่นมอเตอร์	51
4.5.1 กระแสทางด้านเอาต์พุต (i_a , i_b , i_c) ในแต่ละเฟส ที่ได้จาก Space Vector Modulation ในการขับอินดักชั่นมอเตอร์	52
4.5.2 แรงดันไฟฟ้า V_{ab} เทียบกับกระแสไฟฟ้า i_a ที่ได้จากวิธี Space Vector Modulation	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
4.5.3 แรงดันไฟฟ้า V_{ab} เทียบกับกระแสไฟฟ้า i_b ที่ได้จากวิธี Space Vector Modulation ในการขับอินดักชันมอเตอร์	53
4.5.4 แรงดันไฟฟ้า V_{bc} เทียบกับกระแสไฟฟ้า i_c ที่ได้จากวิธี Space Vector Modulation ในการขับอินดักชันมอเตอร์	54
4.5.5 แรงดันไฟฟ้า V_{cb} เทียบกับกระแสไฟฟ้า i_a, i_b, i_c โดยวิธี Space Vector Modulation ในการขับอินดักชันมอเตอร์	54
4.6 การวัดค่าฮาร์โมนิกของกระแสที่ได้จากวิธี Space Vector Modulation (SVM)	55
รูปA CONVERTER	57
รูปB INVERTER	57
รูปC การทดลองขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ	58



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงรายละเอียดของไอซีเบอร์ FSBS5CH6	28
3.2 แสดงสถานะการทำงานของไอซีเบอร์ FSBS5CH6	31
3.3 แรงดันอ้างอิง ($V_{SC(ref)}$)	33
3.4 ช่วงเวลาการสวิตช์และแรงดันเอาต์พุต ของอินเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส	39
3.5 แสดงการหาค่าSector	41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับ (Induction motor) ทั้งแบบ 1 เฟส และ 3 เฟส ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในระบบการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมและในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า สำหรับใช้งานในบ้านอาศัย อาทิเช่น ปั๊มน้ำ ระบบสายพานลำเลียง พัดลมเป่าอากาศ และคอมเพรสเซอร์ของระบบเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น

การเลือกประเภทของมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับ รวมไปถึงการเลือกวิธีการควบคุมการทำงานของมอเตอร์เป็นประเด็นที่จะต้องมีการพิจารณาถึงความเหมาะสมของการใช้งานทั้งในด้านวิศวกรรมศาสตร์ และเศรษฐศาสตร์ ที่เกี่ยวกับการออกแบบ ต้นทุนการสร้าง และการประหยัดพลังงาน เนื่องจากมีความหลากหลายของประเภทมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับที่มีการจำหน่ายในปัจจุบัน ทั้งแบบ 1 เฟส และ 3 เฟส นอกจากนี้การควบคุมมอเตอร์ยังต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับความต้องการของผู้ใช้ อาทิเช่น แรงบิด ความเร็วรอบของมอเตอร์ รวมไปถึงค่ากำลังงานที่จะต้องใช้ในการขับมอเตอร์ดังกล่าว โดยปัจจัยเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมอเตอร์ ซึ่งมีความแตกต่างกันไป

นอกจากประเด็นที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้ว ยังมีข้อปัญหาในเชิงเทคนิคที่จำเป็นจะต้องพิจารณาในเชิงลึกโดยเฉพาะปัญหาการสูญเสียกำลังงานบางส่วน ในช่วงสภาวะเริ่มต้นของการขับมอเตอร์ซึ่งเกิดจากนำมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับทำงานร่วมกับสวิตช์ตัดต่อวงจร เพื่อให้การทำงานของมอเตอร์เป็นไปในลักษณะแบบทำงาน และหยุดทำงานเป็นช่วงๆ สลับกัน หรือเรียกว่าการทำงานแบบเปิด/ปิด เช่นในกรณีเครื่องปรับอากาศ มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ มอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับ ซึ่งการทำงานลักษณะเปิด/ปิด เช่นนี้ จะทำให้มีการสูญเสียกำลังงานบางส่วนในสภาวะเริ่มต้น เนื่องจากกระแสเฉลี่ยในช่วงเริ่มต้นมีขนาดสูงกว่าสภาวะปกติ และไม่สามารถควบคุมการทำงานได้อย่างต่อเนื่อง รวมทั้งการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับนั้นจะขึ้นอยู่กับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้เป็นหลัก

จากปัญหาที่ได้กล่าวถึงในข้างต้น ทำให้ปัญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอินเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับ ให้มีการลดอัตราการสิ้นเปลืองกำลังงาน ไฟฟ้าโดยนำเสนอหลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้การเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดัน ไฟสลับที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยวิธีการป้อนสัญญาณแบบ 6 Step

1.2.1.1 เพื่อศึกษาการสร้างวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าเฟสเดียวแบบบริดจ์ไดโอด

1.2.1.2 เพื่อศึกษาการสร้างและการทำงานของชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

1.2.1.3 เพื่อศึกษาการสร้างสัญญาณ 6 Step เพื่อนำไปใช้ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์และการทำงานของวงจรประวิงเวลา (Dead time)

1.2.2 ศึกษาการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับ 3 เฟส เพื่อที่จะควบคุมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้เทคนิค Space Vector Modulation (SVM)

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 สร้างวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าเฟสเดียวแบบบริดจ์ไดโอด

1.3.2 สร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

1.3.3 ออกแบบและสร้างวงจรประวิงเวลา (Dead time) เพื่อไม่ให้ไอจีบีทีที่อยู่ใกล้กันทำงานพร้อมกัน

1.3.4 สร้างสัญญาณ 6 step เพื่อนำไปควบคุมความเร็วรอบของอินดักชั่นมอเตอร์

1.3.5 สร้างสัญญาณไซน์ซอชด์เพื่อป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธี Space Vector Modulation (SVM)

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้มากที่สุด ซึ่งมอเตอร์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำนี้อาจเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวหรือมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟส (Poly Phase Induction Motor) ก็ได้ ซึ่งมีข้อดีและข้อด้อยคือ

ข้อดี (Advantage)

1. เป็นมอเตอร์ชนิดที่สร้างขึ้นได้ง่าย และทนทาน โดยเฉพาะชนิดกรงกระรอก (Squirrel-cage Type)
2. ราคาไม่แพง และไม่เสถียร
3. มีประสิทธิภาพที่สูงพอในสถานะที่มอเตอร์หมุนปกติ ไม่มีแปรงถ่านดังนั้นการสูญเสียเนื่องจากความฝืดจึงลดลงหรือมีค่าน้อยมาก และมีพาวเวอร์แฟกเตอร์ดี
4. ต้องการการดูแล และบำรุงรักษาต่ำ
5. สามารถที่จะเริ่มหมุน (Start) ได้ง่าย โดยเฉพาะชนิดกรงกระรอก

ข้อด้อย (Disadvantage)

1. ความเร็วรอบของมอเตอร์ไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้ อันเนื่องมาจากความถี่หลักมูลของแรงดันไฟฟ้าสลับที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้
2. มีคุณสมบัติเหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบซันด์ ความเร็วรอบจะลดลงหรือเพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับโหลด
3. แรงบิดในขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำค่อนข้างต่ำกว่าแรงบิดขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบซันด์

มอเตอร์ไฟสลับ 3 เฟส ที่มีคุณสมบัติที่ดี คือมีความเร็วรอบคงที่เนื่องจากความเร็วรอบอินดักชันมอเตอร์ขึ้นอยู่กับความถี่ (Frequency) ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ และมีราคาถูก โครงสร้างไม่ซับซ้อนสะดวกในการบำรุงรักษา เพราะไม่มีคอมมิวเตเตอร์ และแปรงถ่านเหมือนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อใช้ร่วมกับเครื่องควบคุมความเร็วแบบอินเวอร์เตอร์ (Inverter) สามารถควบคุมความเร็ว (Speed) ได้ตั้งแต่ศูนย์จนถึงความเร็วตามพิกัดของมอเตอร์ นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ขับเคลื่อนลิฟท์ขับเคลื่อนสายพานลำเลียง ขับเคลื่อนเครื่องจักรไฟฟ้า เช่น เครื่องไสเครื่องกลึง อินดักชันมอเตอร์มี 2 แบบ แบ่งตามลักษณะตัวหมุนคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก(Squirrel Cage Induction Motor)

อินดักชันมอเตอร์แบบนี้ ตัวโรเตอร์จะมีโครงสร้างแบบกรงกระรอกเหมือนกับโรเตอร์ของสปลิตเฟสมอเตอร์



รูปที่ 2.1 โรเตอร์

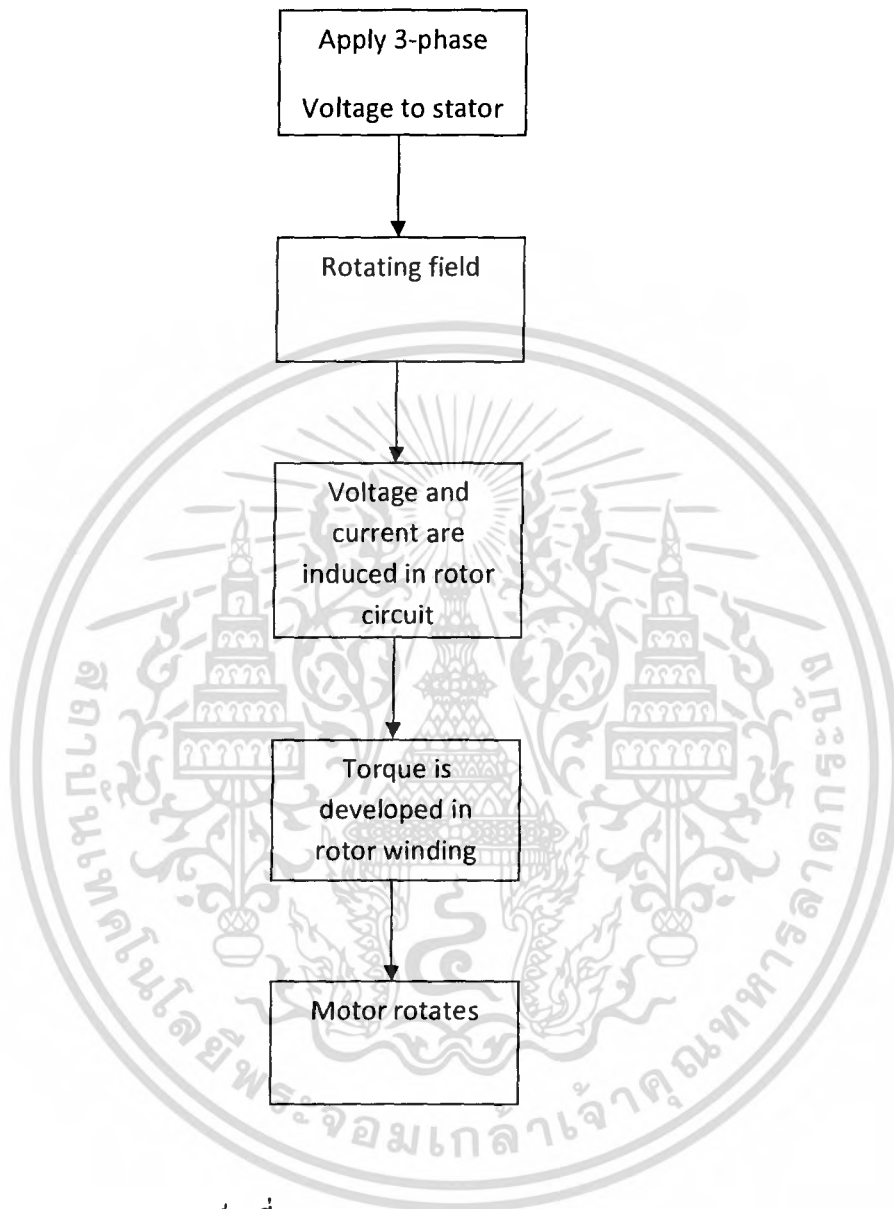
รูปที่ 2.2 สเตเตอร์

2.1.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์แบบขดลวด(Wound Rotor Induction Motors)

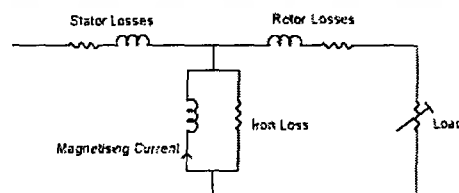
อินดักชันมอเตอร์ชนิดนี้ตัวโรเตอร์จะทำจากเหล็กแผ่นบาง ๆ อัดซ้อนกันเป็นตัวหุ้มคล้ายอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มีร่องสำหรับวางขดลวดของตัวโรเตอร์เป็นขดลวด 3 ชุด สำหรับสร้างขั้วแม่เหล็ก 3 เฟสเช่นกันปลายของขดลวดทั้ง 3 ชุดต่อกับสปริง(Slip Ring)จำนวน 3 อันสำหรับเป็นทางให้กระแสไฟฟ้าครบวงจรทั้ง 3 เฟสการทำงานของอินดักชันมอเตอร์เมื่อจ่ายไฟฟ้าสลับ 3 เฟสให้ที่ขดลวดทั้ง 3 ของตัวสเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนรอบ ๆ ตัวสเตเตอร์ ทำให้ตัวหมุน(โรเตอร์) ได้รับการเหนี่ยวนำทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่ตัวโรเตอร์ และขั้วแม่เหล็กนี้ จะพยายามดึงดูดกับสนามแม่เหล็กที่หมุนอยู่รอบ ๆ ทำให้มอเตอร์ของอินดักชันมอเตอร์หมุนไปได้ ความเร็ว ของสนามแม่เหล็กหมุนที่ตัวสเตเตอร์นี้จะคงที่ตามความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้น โรเตอร์ของอินดักชันของมอเตอร์จึงหมุนตามสนามหมุนดังกล่าวไปด้วย ความเร็วเท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน

2.2 การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

How does induction motor rotate ?



วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของอินดักชันมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

2.3.1 วงจรและรูปคลื่นสัญญาณ

อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเหมาะสำหรับกรณีที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง ซึ่งโครงสร้างและรูปคลื่นสัญญาณของวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแสดงอยู่ในรูปที่ 2.4(ก)

เทคนิค PWM สามารถใช้ได้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ไม่ว่าจะเป็นเทคนิคไซน์ตัดสามเหลี่ยม หรือเทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกต่ำ หรือการควบคุมรูปคลื่นของกระแส

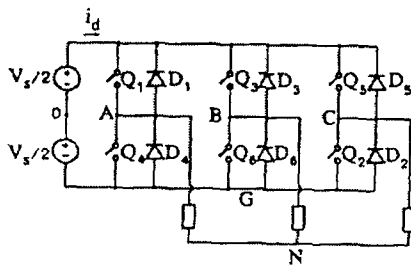
รูปที่ 2.4(ข) แสดงหลักการของเทคนิคไซน์ตัดสามเหลี่ยม เรามีรูปสามเหลี่ยม V_T ซึ่งมีความถี่เท่ากับความถี่การสวิตช์ และมีสัญญาณอ้างอิงรูปไซน์ 3 สัญญาณ ได้แก่ V_{rA} , V_{rB} และ V_{rC} ซึ่งมีมุมเฟสต่างกัน 120 องศา โดยมีจุดตัดระหว่าง V_T กับ V_{rA} (V_r และ V_{rO}) เป็นตัวกำหนดการตัดต่อวงจรของสวิตช์ Q_1 , Q_4 (Q_3 , Q_6 และ Q_5 , Q_2 ตามลำดับ) รูปคลื่นของแรงดัน V_{AG} , V_{BG} (G คือสายลบบของแหล่งแรงดันไฟตรง) และ V_{AB} แสดงอยู่ในรูปที่ 2.4(ค) สังเกตได้ว่าองค์ประกอบหลักมูลของ V_{AG} หรือ V_{AG1} มีแอมพลิจูดเท่ากับค่าที่แสดงในสมการที่ (a1) V_{AG} ต่างกับ V_{AO} เพียงค่าแรงดันไฟตรง $V_s/2$

$$V_{AG1} = m_a V_s \quad m_a \leq 0.5 \quad (a1)$$

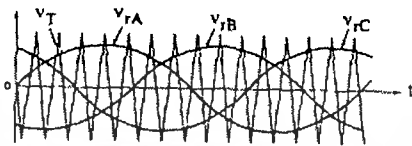
แรงดันสาย V_{AB} มีองค์ประกอบหลักมูลเท่ากับ V_{AB1} แอมพลิจูดของ V_{AB1} เท่ากับ $\sqrt{3}$ ของแอมพลิจูดของ V_{AG1} เนื่องจาก V_{AG} และ V_{BG} มีเฟสต่างกัน 120° และ V_{AB1} มีเฟสช้าหลัง V_{AG1} อยู่ 30 องศา(แสดงในรูปที่ 1(ค) ดังนั้น

$$V_{AB1} = \sqrt{3} m_a V_s \quad m_a \leq 0.5 \quad (a2)$$

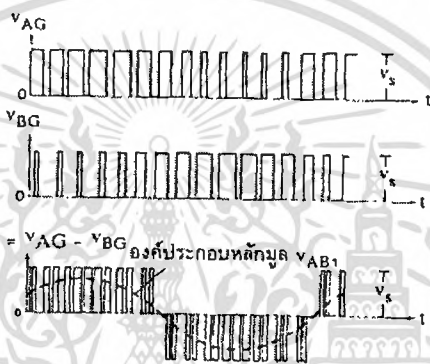
ในการออกแบบระบบ โดยทั่วไปนิยมเลือกอัตราการผลิตความถี่ m_f เป็นเลขคี่และเป็นพหุคูณของ 3 และให้ความลาดชันของ V_T และ V_r ณ จุดที่แรงดันทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์มีเครื่องหมายตรงกันข้าม (แสดงในรูปที่ 2.4(ข)) ในกรณีนี้ถ้า $m_a \leq 0.5$ สเปกตรัมของ V_{AB} จะเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.4(ง) สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเราอาจจะออกแบบให้วงจรทำงานถึงในย่านการผลิตเกิน เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่มีค่าสูงขึ้น ส่วนข้อเสียที่เนื่องมาจากฮาร์มอนิก ที่เพิ่มขึ้นมักจะพอยอมรับได้



(ก) วงจร

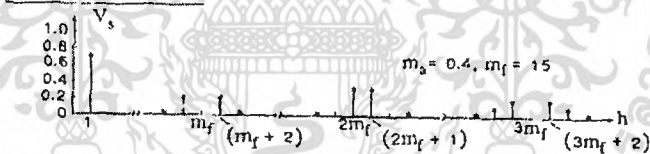


(ข) ไซน์ตัดสามเหลี่ยม



(ค) รูปคลื่น

ส่วนหนึ่งของแรงดันสาย

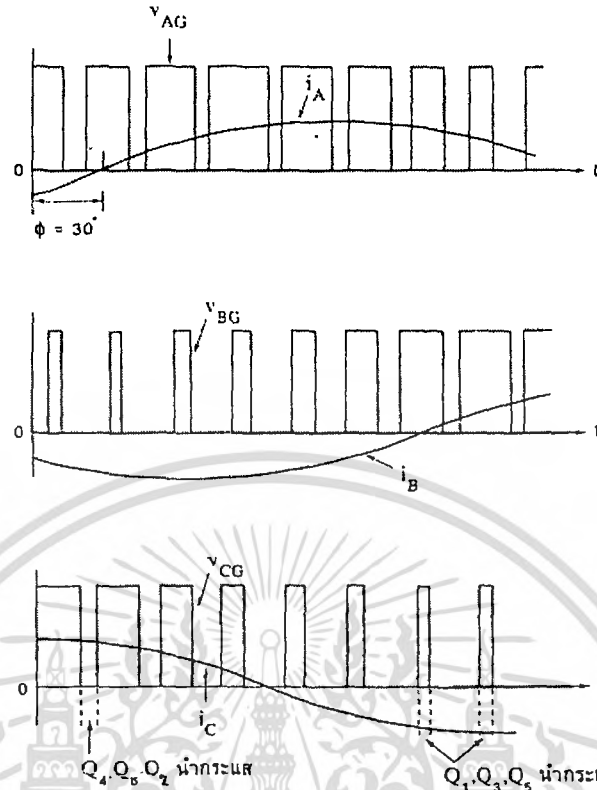


(ง) สเปกตรัม

รูปที่ 2.4 วงจรและรูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ PWM

เมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณในรูปที่ 2.4 จะพบว่าในบางช่วงเวลาดังแสดงในรูปต่าง สวิตช์จะต่อถึงทั้งสามของโหนดเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่าย V_s (เช่น เมื่อ Q_4, Q_6, Q_2 นำกระแส) และบางช่วงเวลาที่สวิตช์จะต่อถึงทั้งสามของโหนดเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่าย V_s (เช่นเมื่อ Q_1, Q_3, Q_5 นำกระแส) ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าว กระแสอินพุทของอินเวอร์เตอร์ (i_d ในรูปที่ 2.4 (ก)) มีค่าเป็นศูนย์ หมายความว่ากำลังงานไม่ไหลจากแหล่งจ่ายสู่โหนด ซึ่งระยะเวลาของการควบคุมช่วงเวลาดังกล่าวเป็นการควบคุมกำลังงานที่จ่ายให้แก่โหนด หรือควบคุมค่าองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันเอาต์พุทนั่นเอง

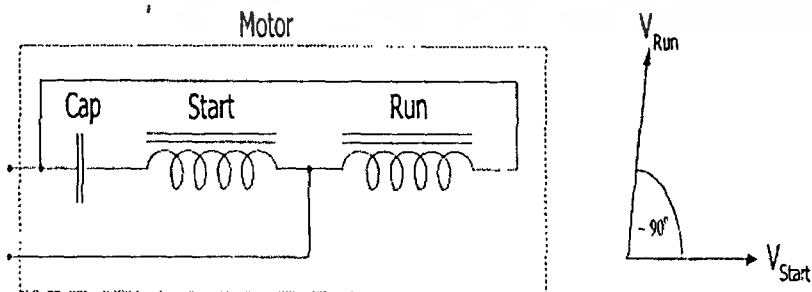
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแสดงช่วงกำลังงานไม่ให้ไหลสู่โหลด

2.3.2 หลักการของการควบคุมทางเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส

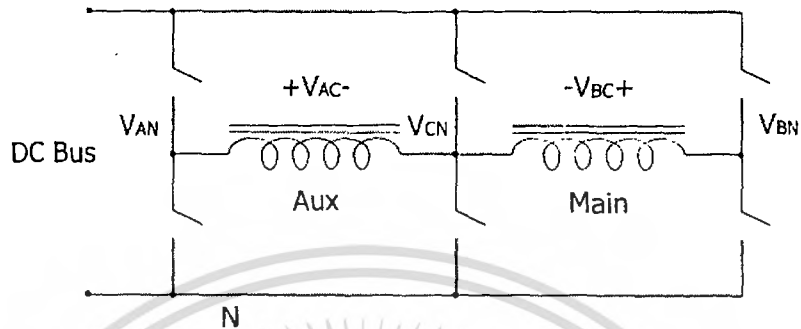
เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคาปาซิเตอร์มอเตอร์ จะมีชุดขดลวด 2 ชุด คือ ขดหลัก (Main,Run) ขดช่วย (Auxiliary,Start) ดังแสดงในรูปที่ 2.6.1 โดยมีตัวเก็บประจุต่อร่วมกับขดรีนเพื่อให้เกิดมุม ระหว่างขดลวดทั้งสอง และเพื่อให้เกิดแรงบิดในการขับเคลื่อนมอเตอร์



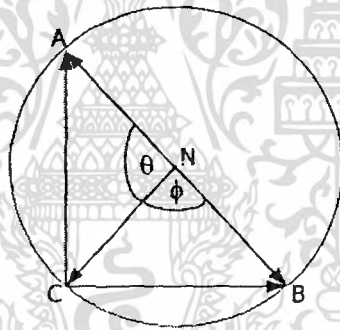
รูปที่ 2.6.1 โครงสร้างมอเตอร์และเวกเตอร์แรงดันระหว่างขด Run กับขด Start

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในการควบคุมเราจะออกแบบให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยให้มุมของแรงดันระหว่างทั้งสองขดมีขนาด 90 องศา โดยใช้โครงสร้างของสวิตช์ 3 เฟส เพื่อสร้างแรงดัน 2 ขุดดังกล่าวโดยไม่ต้องคิดแปลงโครงสร้างของมอเตอร์เดิมดังรูปที่ 2.6.2



รูปที่ 2.6.2 โครงสร้างสวิตช์ 3 เฟส



รูปที่ 2.6.3 เวกเตอร์แสดงแรงดันการควบคุมมอเตอร์

จากรูปที่ 2.6.3 ขนาดของ V_{AC} และ V_{BC} จะได้จากการวัดแล้วนำมาทำมุมกัน 90 องศา ต่อมาเราทำการสร้างเวกเตอร์ V_{AN} , V_{BN} และ V_{CN} โดยที่จุด N จะอยู่กึ่งกลางระหว่าง A กับ B จากนั้นเราทำการปรับมุม θ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของมุมระหว่าง V_{AC} และ V_{BC} ยังมีค่า 90 องศา ซึ่ง V_{AN} , V_{BN} และ V_{CN} จะเป็นแรงดันที่ถูกสร้างขึ้นมาจากการมอดูเลชันเพื่อไปจ่ายให้กับมอเตอร์ 1 เฟส

2.3.3 Three-Phase Induction Motor

Voltage Equations ที่อธิบายพฤติกรรมของ Induction motor คือ

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{abc s} \\ \mathbf{v}_{abc r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_s & 0 \\ 0 & \mathbf{r}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc s} \\ \mathbf{i}_{abc r} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{abc s} \\ \boldsymbol{\lambda}_{abc r} \end{bmatrix} \quad (1)$$

โดยที่ $p = \frac{d}{dt}$

$$\mathbf{r}_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{r}_r = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}$$

Flux Linkage Equations คือ

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{abc s} \\ \boldsymbol{\lambda}_{abc r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ (\mathbf{L}_{sr})^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc s} \\ \mathbf{i}_{abc r} \end{bmatrix} \quad (4)$$

โดยที่

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & \frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & \frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & \frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & \frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{L}_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (7)$$

จากสมการที่ (1) Transform ตัวแปรต่างๆ จาก Rotor มายัง Stator

$$\mathbf{i}'_{abcr} = \frac{N_r}{N_s} \mathbf{i}_{abcr} \quad (8)$$

$$\mathbf{v}'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} \mathbf{v}_{abcr} \quad (9)$$

$$\lambda'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{abcr} \quad (10)$$

$$L'_{ms} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \quad (11)$$

จากสมการที่ (11)

$$\mathbf{L}'_{sr} = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$L_{mr} = \left[\frac{N_r}{N_s} \right]^2 L_{ms} \quad (13)$$

$$\mathbf{L}'_r = \left[\frac{N_s}{N_r} \right]^2 \mathbf{L}_r \quad (14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า (6) ใน (14) ดังนั้น

$$\mathbf{L}'_r = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (15)$$

โดยที่

$$L'_{lr} = \left[\frac{N_s}{N_r} \right]^2 L_{lr} \quad (16)$$

Flux Linkage Equations เขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \lambda'_{abcs} \\ \lambda'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}'_{sr} \\ (\mathbf{L}'_{sr})^T & \mathbf{L}'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abcs} \\ \mathbf{i}'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (17)$$

จากสมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{abcs} \\ \mathbf{v}_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_s & 0 \\ 0 & \mathbf{r}'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abcs} \\ \mathbf{i}'_{abcr} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \lambda'_{abcs} \\ \lambda'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{r}'_r = \left[\frac{N_s}{N_r} \right]^2 \mathbf{r}_r \quad (19)$$

จากสมการที่ (17), (18) Transform ตัวแปรต่างๆให้อยู่ในกรอบอ้างอิงใดๆ (Arbitrary reference frame) โดยใช้สมการ (20), (21)

$$\mathbf{f}_{qd0s} = \mathbf{K}_s \mathbf{f}_{abcs} \quad (20)$$

$$\mathbf{f}'_{qd0r} = \mathbf{K}_r \mathbf{f}'_{abcr} \quad (21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$\mathbf{K}_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{K}_r = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\beta) & \sin(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (23)$$

เมื่อ $\beta = \theta - \theta_r$

จากสมการที่ (18)

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{v}_{qd0s} \\ (\mathbf{K}_r)^{-1} \mathbf{v}'_{qd0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_s & 0 \\ 0 & \mathbf{r}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{i}_{qd0s} \\ (\mathbf{K}_r)^{-1} \mathbf{i}'_{qd0r} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} (\mathbf{K}_s)^{-1} \boldsymbol{\lambda}_{qd0s} \\ (\mathbf{K}_r)^{-1} \boldsymbol{\lambda}'_{qd0r} \end{bmatrix} \quad (24)$$

จากสมการที่ (24)

$$(\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{v}_{qd0s} = \mathbf{r}_s (\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{i}_{qd0s} + p [(\mathbf{K}_s)^{-1}] \boldsymbol{\lambda}_{qd0s} + (\mathbf{K}_s)^{-1} p \boldsymbol{\lambda}_{qd0s} \quad (25)$$

$$(\mathbf{K}_r)^{-1} \mathbf{v}'_{qd0r} = \mathbf{r}_r' (\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{i}'_{qd0r} + p [(\mathbf{K}_s)^{-1}] \boldsymbol{\lambda}'_{qd0r} + (\mathbf{K}_s)^{-1} p \boldsymbol{\lambda}'_{qd0r} \quad (26)$$

จากสมการที่ (25), (26)

$$\mathbf{v}_{qd0s} = \mathbf{K}_s \mathbf{r}_s (\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{i}_{qd0s} + \mathbf{K}_s p [(\mathbf{K}_s)^{-1}] \boldsymbol{\lambda}_{qd0s} + \mathbf{K}_s (\mathbf{K}_s)^{-1} p \boldsymbol{\lambda}_{qd0s} \quad (27)$$

$$\mathbf{v}'_{qd0r} = \mathbf{K}_r \mathbf{r}_r' (\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{i}'_{qd0r} + \mathbf{K}_r p [(\mathbf{K}_s)^{-1}] \boldsymbol{\lambda}'_{qd0r} + \mathbf{K}_r (\mathbf{K}_s)^{-1} p \boldsymbol{\lambda}'_{qd0r} \quad (28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (27), (28)

$$\mathbf{v}_{qd0s} = \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{qd0s} + \omega \lambda_{dqs} + p \lambda_{qd0s} \quad (29)$$

$$\mathbf{v}'_{qd0r} = \mathbf{r}'_r \mathbf{i}'_{qd0r} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dqr} + p \lambda'_{qd0r} \quad (30)$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของแกนอ้างอิงใดๆ

ω_r คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์

$$(\lambda_{dqs})^T = [\lambda_{ds} \quad -\lambda_{qs} \quad 0]$$

$$(\lambda'_{dqs})^T = [\lambda'_{ds} \quad -\lambda'_{qs} \quad 0]$$

จากสมการที่ (18) สามารถ Transform ไปยังแกนอ้างอิงใดๆแสดงดังได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{K}_s)^{-1} \lambda_{qd0s} \\ (\mathbf{K}_r)^{-1} \lambda'_{qd0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}'_{sr} \\ (\mathbf{L}'_{sr})^T & \mathbf{L}'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{i}_{qd0s} \\ (\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{i}'_{qd0r} \end{bmatrix} \quad (31)$$

จากสมการที่ (31)

$$(\mathbf{K}_s)^{-1} \lambda_{qd0s} = \mathbf{L}_s (\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{i}_{qd0s} + \mathbf{L}'_{sr} (\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{i}'_{qd0r} \quad (32)$$

$$(\mathbf{K}_r)^{-1} \lambda'_{qd0r} = (\mathbf{L}'_{sr})^T (\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{i}_{qd0s} + \mathbf{L}'_r (\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{i}'_{qd0r} \quad (33)$$

จากสมการที่ (32), (33)

$$\lambda_{qd0s} = \mathbf{K}_s \mathbf{L}_s (\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{i}_{qd0s} + \mathbf{K}_s \mathbf{L}'_{sr} (\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{i}'_{qd0r} \quad (34)$$

$$\lambda'_{qd0r} = \mathbf{K}_r (\mathbf{L}'_{sr})^T (\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{i}_{qd0s} + \mathbf{K}_r \mathbf{L}'_r (\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{i}'_{qd0r} \quad (35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$\mathbf{K}_s \mathbf{L}_s (\mathbf{K}_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_M & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$\mathbf{K}_s \mathbf{L}'_{sr} (\mathbf{K}_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_M & 0 & 0 \\ 0 & L'_{lr} + L_M & 0 \\ 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$\mathbf{K}_r (\mathbf{L}'_{sr})^T (\mathbf{K}_s)^{-1} = \mathbf{K}_r \mathbf{L}'_r (\mathbf{K}_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$L_M = \frac{3}{2} L_{ms} \quad (39)$$

จากสมการที่ (29), (30), (34), (35) แสดงได้ตั้งสมการต่อไปนี้

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \quad (40)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \quad (41)$$

$$v_{0s} = r_s i_{0s} + p \lambda_{0s} \quad (42)$$

$$v'_{qr} = r_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + p \lambda'_{qr} \quad (43)$$

$$v'_{dr} = r_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + p \lambda'_{dr} \quad (44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v'_{0r} = r_r i'_{0r} + p \lambda'_{0r} \quad (45)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (46)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (47)$$

$$\lambda_{0s} = L_{ls} i_{0s} \quad (48)$$

$$\lambda'_{qr} = L'_{lr} i'_{qr} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (49)$$

$$\lambda'_{dr} = L'_{lr} i'_{dr} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (50)$$

$$\lambda'_{0r} = L'_{lr} i'_{0r} \quad (51)$$

สมการแรงบิดแสดงได้ดังสมการที่ (52) ถึงสมการที่ (54)

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) L_M (i_{qs} i'_{dr} - i_{ds} i'_{qr}) \quad (52)$$

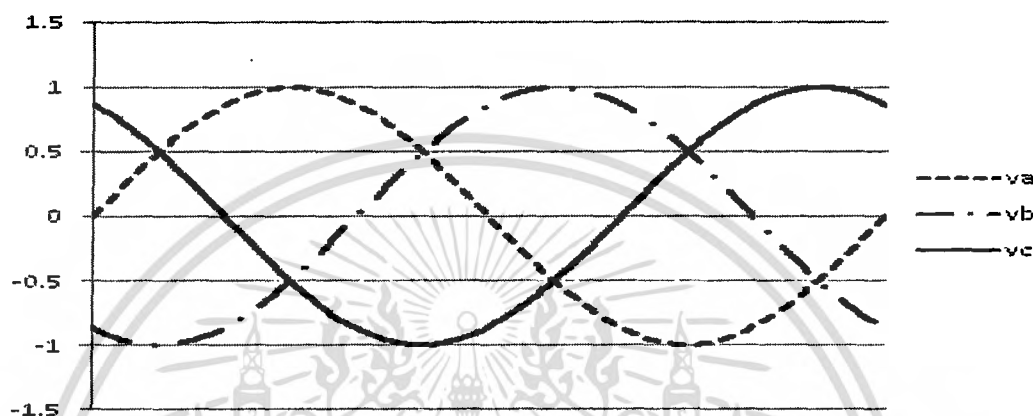
$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda'_{qr} i'_{dr} - \lambda'_{dr} i'_{qr}) \quad (53)$$

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 Space Vector Modulation (SVM)

หลักการของวิธี Space Vector Modulation (SVM) มีความแตกต่างจากหลักการของวิธี PWM โดยอินเวอร์เตอร์ที่ใช้วิธี PWM จะมีชุดขับแบบ push-pull 3 ชุด ซึ่งแต่ละชุดสร้างสัญญาณควบคุมที่แยกอิสระกัน ในขณะที่วิธี SVM จะพิจารณาอินเวอร์เตอร์เป็นชุดขับเพียงหนึ่งชุดเท่านั้น โดยที่อินเวอร์เตอร์สามารถที่จะถูกขับได้ถึง 8 สเตต



รูปที่ 2.7 สัญญาณ sine wave

ในการควบคุมการสวิตช์ของวิธี SVM นั้นทำในระบบดิจิทัล ซึ่งกล่าวได้ว่า SVM เป็นเทคนิคการมอดูเลตแบบดิจิทัล โดยมีเป้าหมายในการสร้างแรงดันไฟฟ้า PWM ให้กับโหลด โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าง่ายที่จ่ายให้กับโหลดจะเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งการสร้างสัญญาณ PWM ดังกล่าวจะเสร็จสิ้นภายในแต่ละคาบเวลาสุ่ม (sampling period) โดยพิจารณาจากการเลือกสเตตการสวิตช์และการคำนวณคาบเวลาของสเตตที่เหมาะสมซึ่งคำนวณได้จากการแปลงเวกเตอร์ปริภูมิ (space vector transformation)

82015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การแปลงปริภูมิ

พิจารณาฟังก์ชันทางเวลา 3 ฟังก์ชันที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามสมการ

$$u_a(t) + u_b(t) + u_c(t) = 0 \quad (55)$$

การอธิบายเวกเตอร์ดังกล่าวสามารถแสดงในปริภูมิสองมิติซึ่งพิกัดจะเหมือนกับแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส อาทิเช่น เวกเตอร์ $[u_a \ 0 \ 0]^T$ วางอยู่บนแกน X เวกเตอร์ $[0 \ u_b \ 0]^T$ มีเฟสต่างกัน 120 องศา และเวกเตอร์ $[0 \ 0 \ u_c]^T$ มีเฟสต่าง 240 องศา จากเวกเตอร์ตัวแรก ดังแสดงในรูปที่ 2.8

เวกเตอร์ SV ในรูปแบบของจำนวนเชิงซ้อนแสดงได้ตามสมการ

$$u(t) = \frac{2}{3} [u_a + u_b e^{j(\frac{2}{3})\pi} + u_c e^{-j(\frac{2}{3})\pi}] \quad (56)$$

โดยที่ $2/3$ เป็น scaling factor สมการ(56) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปองค์ประกอบของจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพในโดเมน $x-y$ ได้ดังนี้

$$u(t) = u_x + ju_y \quad (57)$$

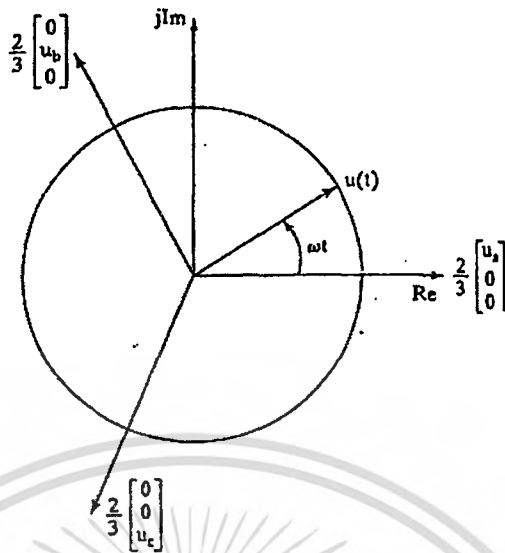
พิจารณาสมการ (56) และ (57) เราสามารถแปลงพิกัดจาก $a-b-c$ ไปเป็น $x-y$ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (58)$$

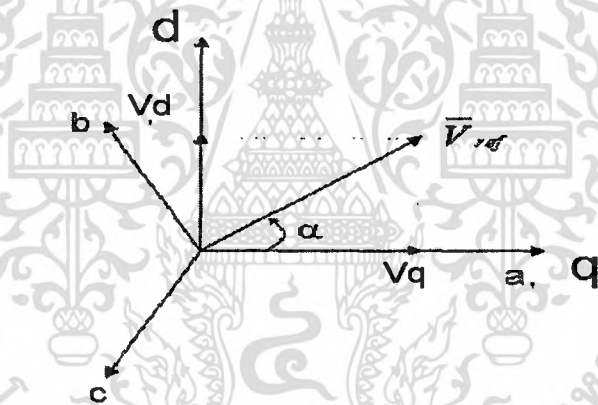
ซึ่งสามารถเขียนเป็น

$$u_x = \frac{2}{3} [v_a - 0.5(v_b + v_c)] \quad (59)$$

$$u_y = \frac{\sqrt{3}}{3} (v_b + v_c) \quad (60)$$



รูปที่ 2.8 พิกัดเวกเตอร์ในระบบสามเฟส และ space vector $u(t)$



รูปที่ 2.9 Voltage space vector and its components in d,q

การแปลงจากแกน $x-y$ ไปเป็นแกน $\alpha-\beta$ ได้โดยทำการหมุนแกน $x-y$ ดังกล่าวด้วย ωt โดยที่ ω เป็นความเร็วเชิงมุม

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\frac{\pi}{2} + \omega t) \\ \sin(\omega t) & \sin(\frac{\pi}{2} + \omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \quad (61)$$

จากสมการ (56) เราสามารถแปลงกลับได้เป็น

$$u_a = \text{Re}(u) \quad (62)$$

$$u_b = \text{Re}(ue^{-j(2\pi/3)\pi})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u_c = \text{Re}(ue^{j(2/3)\pi})$$

ในระบบ 3 เฟส แบบสมมูล แรงดันไฟฟ้า u_a, u_b, u_c สามารถเขียนได้เป็น

$$u_a = V_m \sin(\omega t) \tag{63}$$

$$u_b = V_m \sin(\omega t - 2\pi/3)$$

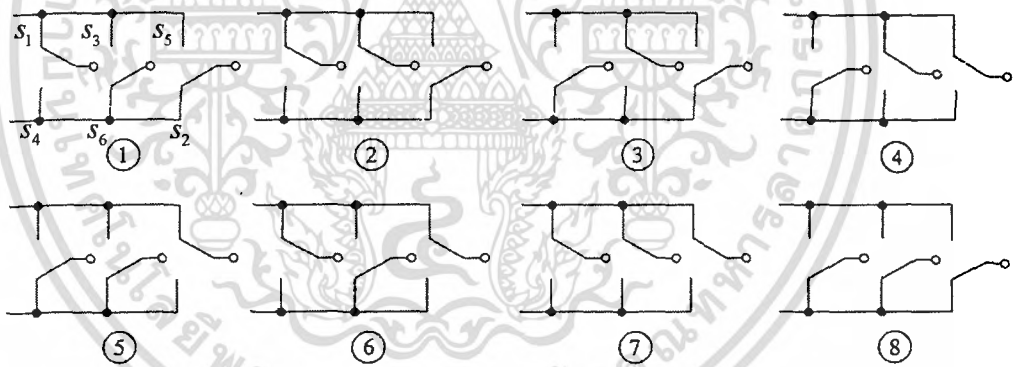
$$u_c = V_m \sin(\omega t + 4\pi/3)$$

โดยที่ V_m มีค่าเป็นยอดแรงดันไฟฟ้า

จากสมการ (56) เวกเตอร์ SV สามารถเขียนได้เป็น

$$u(t) = V_m e^{j\theta} = V_m e^{j\omega t} \tag{64}$$

จากสมการข้างต้น อธิบายถึงเวกเตอร์ที่มีขนาด V_m หมุนด้วยความเร็วคงที่ ω



รูปที่ 2.10 ช่วงเวลาการสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 เวกเตอร์ปริภูมิ (SV)

สแตตการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ สามารถแสดงในรูปแบบของค่าเลขฐานสอง q_1, q_2, q_3, q_4, q_5 และ q_6 โดยที่ $q_k=1$ เมื่อสวิตช์ปิดวงจร และ $q_k=0$ เมื่อสวิตช์เปิดวงจร

เมื่อคู่ q_1, q_4, q_3, q_6 และ q_5, q_2 เป็นคู่ที่มีค่าตรงข้ามกัน ดังนั้น $q_4=1-q_1, q_6=1-q_3$ และ $q_2=1-q_5$ โดยสแตตของการเปิด/ปิด สวิตช์แสดงในรูปแบบที่ 2.10

พิจารณาการแปลงจาก 3 เฟสไปเป็นเป็น 2 เฟส ตามสมการที่ (58) และพิจารณาแรงดันไฟฟ้าในสาย ($\sqrt{3}$ แรงดันเฟส) เป็นค่าอ้างอิงทำให้อำนาจประกอบของ $\alpha - \beta$ ซึ่งเป็นเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าแบบ rms (root mean square) สามารถแสดงในรูปแบบฟังก์ชันของ q_1, q_3, q_5

$$\begin{bmatrix} V_{L\alpha} \\ V_{L\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{3}{2}} V_s \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_3 \\ q_{5c} \end{bmatrix} \quad (65)$$

เมื่อ V_s = แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง

ค่า $\sqrt{2}$ ใช้ในการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าแบบ rms เป็นค่าแรงดันสูงสุด สำหรับค่าสูงสุดของแรงดันสายมีค่า $2V_s/\sqrt{3}$ ในขณะที่ค่าสูงสุดของแรงดันเฟสมีค่า $V_{p(peak)} = V_s/\sqrt{3}$

เมื่อพิจารณาให้แรงดันเฟส V_n เป็นแรงดันอ้างอิง เวกเตอร์แรงดันในสาย V_{ab} จะนำหน้าเฟสเวกเตอร์อยู่ $\pi/6$ และค่าสูงสุดของแรงดันสายที่ถูกนอร์มัลไลซ์ สามารถแสดงได้ตามสมการ

$$V_n = \frac{\sqrt{2} \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} e^{j(2n-1)\pi/6} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\cos\left(\frac{(2n-1)\pi}{6}\right) + j \sin\left(\frac{(2n-1)\pi}{6}\right) \right] \quad (66)$$

โดยที่ $n = 0, 1, 2, 6$ เป็นหมายเลขของเวกเตอร์แรงดันในสาย

พิจารณาหาเวกเตอร์ที่ไม่ใช่เวกเตอร์ศูนย์ V_1 ถึง V_6 และ V_7 ที่เป็นเวกเตอร์ศูนย์ ทำให้เราสามารถกำหนดเวกเตอร์ เป็นฟังก์ชันเวลาของการอินทิเกรต V_n ดังแสดงตามสมการ

$$U = \int V_n dt + U_0 \quad (67)$$

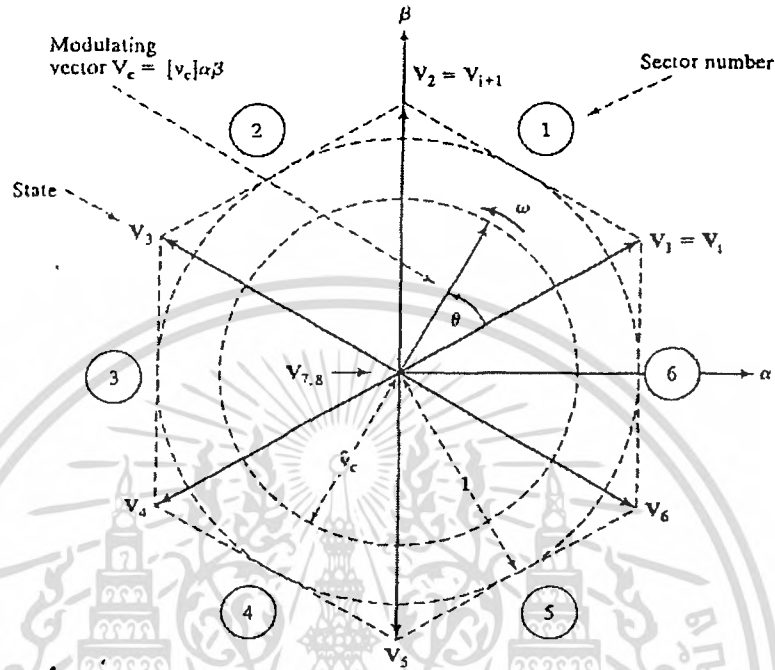
จากสมการที่(67) ภายภาพของฟังก์ชัน U แสดงได้เป็นรูปทรงเรขาคณิตหกเหลี่ยมที่คำนวณได้จากขนาดและคาบเวลาของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า ถ้าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นสัญญาณไซน์ซึ่ชอยด์ที่สมบูรณ์แบบ ดังนั้นเราสามารถพิจารณาฟังก์ชัน U ได้ในรูปแบบ

$$U^* = Me^{j\theta} = Me^{j\omega t} \quad (68)$$

โดยที่ M เป็นครรชนิการมอดูเลต ($0 < M < 1$) สำหรับการควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และเป็นความถี่เอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพของฟังก์ชัน U^* แสดงได้เป็นรูปทรงเรขาคณิตวงกลมดังแสดงในรูปที่ 2.11 ตามเส้นประวงกลมที่มีรัศมี $M=1$ และถูกพิจารณาเป็นเวกเตอร์อ้างอิง V_r



รูปที่ 2.11 แสดงเวกเตอร์ปริภูมิ

ภาพรูปทรงเรขาคณิตของฟังก์ชัน U สามารถควบคุมได้โดยการเลือกเวกเตอร์ V_n และการปรับค่าความกว้างของเวกเตอร์ V_n ให้มีรูปทรงเข้าใกล้ฟังก์ชัน U^* มากที่สุด ซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า “quasi-circular”

จากสมการที่(58) และ (59),(60) เวกเตอร์ของสัญญาณมอดูเลตแรงดันสาย 3 เฟส

$[v_r]_{abc}=[v_{ra} v_{rb} v_{rc}]^T$ สามารถแสดงโดยเวกเตอร์จำนวนเชิงซ้อน $U^*=V_r=[v_r]_{\alpha\beta}=[v_{r\alpha} v_{r\beta}]^T$ โดยได้ดังนี้

$$v_{r\alpha} = \frac{2}{3} [v_{ra} - 0.5(v_{rb} + v_{rc})] \quad (69)$$

$$v_{r\beta} = \frac{\sqrt{3}}{3} (v_{rb} - v_{rc}) \quad (70)$$

ถ้าสัญญาณมอดูเลตแรงดันสาย เป็นสัญญาณไซน์ชวยค์ของระบบ 3 เฟสสมดุล ที่มีขนาด $A_c=1$ และ ω เป็นความถี่เชิงมุม โดยพิจารณาในระนาบไม่เคลื่อนที่ $\alpha-\beta$ ที่ไม่เคลื่อนที่ สัญญาณมอดูเลต $V_c=[v_r]_{\alpha\beta}$ จะมีขนาดคงที่ MA_c เท่ากับ M และหมุนด้วยความถี่ ω ดังแสดงเป็นวงกลมจุดไขว่ปลาที่มีรัศมี M ในรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การเปรียบเทียบเทคนิค PWM

เทคนิคการมอดูเลตถูกนำมาใช้ในการสร้างรูปสัญญาณความถี่ หรือรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าสัญญาณมอดูเลต PWM ที่ใช้ในการสวิตช์ อินเวอร์เตอร์นั้นถูกสร้างมาจากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณพาหุรูปสามเหลี่ยมความถี่สูง และสัญญาณไซน์ซอซอด้อ้างอิงสามสัญญาณซึ่งหลักการพื้นฐานนี้ได้ถูกนำมาพัฒนา สร้างทั้งทางแอนะล็อกและดิจิตอลสำหรับการแปลงกำลังงาน

สัญญาณ PWM ได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้งานกับระบบไฟฟ้าสามเฟส เนื่องจากองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่สามถูกขจัดออก และการใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในการสร้างสัญญาณ PWM ในขณะทีวิธี SVM ไม่ได้พิจารณาแยกส่วนในแต่ละเฟสแรงดันไฟฟ้าเหมือนกับกรณีของ PWM แต่แรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟส ซึ่งถูกพิจารณาภายในระบบอ้างอิงสองมิติ (ระนาบ $\alpha - \beta$) และเวกเตอร์อ้างอิงจะถูกประมวลผลเป็นชุดเดียวกัน นอกจากนี้วิธี SVM ยังมีข้อดีในแง่ฮาร์มอนิกที่ต่ำ และครรชนีการมอดูเลตที่สูง โดยเฉพาะการพัฒนาในเชิงดิจิตอลที่ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ชิพเดี่ยว จากคุณสมบัติที่ยืดหยุ่นในการควบคุม ทำให้วิธี SVM ได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้งานด้านการแปลงกำลังงานและการควบคุมมอเตอร์

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้างชุดวงจร

3.1 วงจรเรียงกระแส(CONVERTER)

วงจรเรียงกระแสทำหน้าที่เพื่อแปลงผันกำลังไฟฟ้า จากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง โดยต้องการให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีความเป็นไฟฟ้ากระแสตรงมากที่สุด วงจรเรียงกระแสมีทั้งที่เป็นแบบครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่น แบบครึ่งคลื่นมักจะใช้เมื่อพิกัดกำลังไฟฟ้าที่โหลดมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น จะมีกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยด้านเข้ามีค่าไม่เป็นศูนย์ทำให้เกิดปัญหาที่หม้อแปลงอิ่มตัวได้ง่าย ส่วนวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นสามารถนำไปใช้ในงานที่มีขนาดพิกัดกำลังสูงได้ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ในโครงการฉบับนี้ได้ใช้วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด

3.1.1 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด

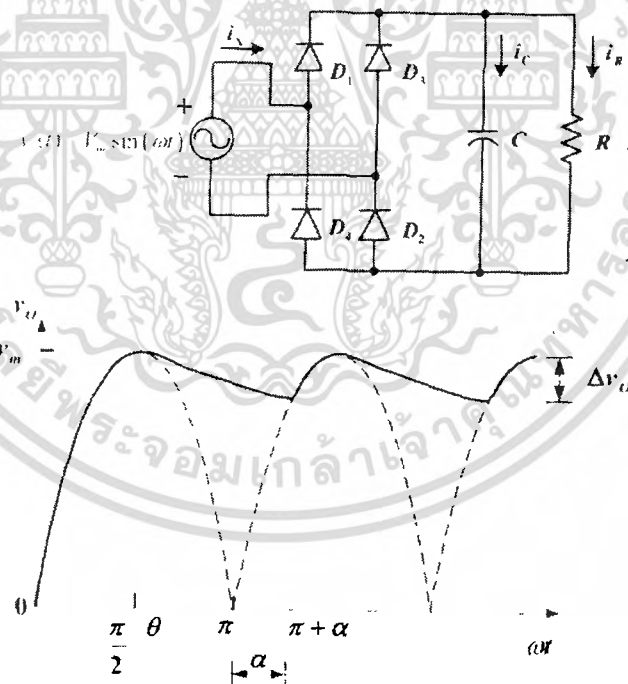
วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์มีลักษณะเหมือนวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น เพราะแรงดันเอาต์พุตที่ได้เป็นแบบเต็มคลื่น ข้อแตกต่างระหว่างการเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์และแบบเต็มคลื่นธรรมดา ต่างกันตรงการต่อวงจรไดโอด แบบเต็มคลื่นจะใช้ไดโอด 2 ตัว แบบบริดจ์จะใช้ไดโอด 4 ตัว และหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ก็แตกต่างกัน แบบเต็มคลื่นธรรมดาใช้หม้อแปลงมีแท่งปลอก (Center Tap, CT) มี 3 ขั้ว แบบบริดจ์ใช้หม้อแปลง 2 ขั้วหรือ 3 ขั้วก็ได้

3.1.2 วงจรกรองแรงดันหรือวงจรฟิลเตอร์

วงจรกรองแรงดันที่ใช้ในแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงมีหน้าที่เปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสทั้งแบบครึ่งคลื่น และแบบเต็มคลื่นซึ่งจะมีการเพิ่มให้ เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เรียบมากขึ้น

3.1.3 วงจรกรองแรงดันโดยใช้ตัวเก็บประจุ

โดยเมื่อแรงดันอินพุตอยู่ในครึ่งคลื่นบวกจะทำให้ไดโอดอยู่ในสถานะ ON และตัวเก็บประจุก็จะเริ่มเก็บประจุ ซึ่งช่วงเวลาของการเก็บประจุของตัวเก็บประจุนั้นจะสั้น ทั้งนี้เนื่องจากไม่มีค่าความต้านทานในเส้นทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในระหว่างการชาร์จประจุนี้ มีเพียงแต่ค่าความต้านทานภายในสายไฟที่ใช้ต่อในวงจรเท่านั้น ซึ่งในกรณีช่วงเวลาของการคายประจุจะนานกว่าช่วงเวลาของการเก็บประจุ ทั้งนี้เนื่องจากมีค่าความต้านทานของโหลดต่ออยู่ในวงจรมันเอง การลดลงของความชันของรูปคลื่นสัญญาณเป็นการลดลงของแรงดันไฟฟ้าที่ปรากฏคร่อมตัวเก็บประจุ และจากการที่มีโหลดต่อขนานอยู่กับตัวเก็บประจุ ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตที่ปรากฏคร่อม โหลดก็จะมีขนาด ลดลงด้วย ซึ่งการลดลงของแรงดันเอาต์พุตนี้เกิดจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ แต่เมื่อมีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและวงรอบของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้ได้ค่าที่เรียบจนเกือบจะคงที่ นั่นคือ มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าสูงหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเพียงเล็กน้อยหรือที่เรียกว่า ริปเปิ้ล นั่นเอง



รูปที่ 3.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 การออกแบบวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด

จากข้อดีของวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอดที่จะมีกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ด้านเข้าหรือด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะเป็นข้อดีต่อหม้อแปลงไฟฟ้าและ ยังสามารถนำไปใช้ในงานที่มีขนาดพิกัดกำลังสูง ได้อีกด้วยรวมทั้งกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเป็นศูนย์ โดย ทั้งนี้ได้มีการเพิ่มวงจรกรองแรงดันเข้าไปด้วยเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ จากวงจรเรียงกระแสให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เรียบมากขึ้น โดยอาศัยหลักการเก็บประจุและการคายประจุของตัวเก็บประจุ

จาก $V_{s(t)} = V_m \sin(\omega t)$

$$V_{dc(max)} = \sqrt{2} V_m = \sqrt{2}(220) = 311.12 \text{ V}$$

มอเตอร์เหนี่ยวนำมีรายละเอียดดังนี้

$\frac{1}{2}$ แรงม้า 4-pole และมีความถี่ 50 Hz ความเร็วรอบของโรเตอร์(N_r) เท่ากับ 1,420 rpm
แรงดันไฟฟ้า 220-380 V

การคำนวณค่าความจุของตัวเก็บประจุ

จาก $C_{min} = \frac{P_{out}(1-2f_{net}t_{on})}{2f_{net}V_{dc(max)}^2\Delta V}$

โดยที่ $P_{out} = \frac{1}{2} \times 746 = 373 \text{ W} + 50\% = 559.5 \text{ W}$
 $f_{net} = 50 \text{ Hz}$
 $t_{on} = 2.5 \text{ msec}$
 $\Delta V = \text{ripple at } 3\%$

$$C_{min} = \frac{559.5(1-2(50)(0.0025))}{2(50)(311.12)^2(0.03)} = 1445 \mu\text{F}$$

แต่ได้ปรับค่า C ขึ้นเป็น 1680 μF ทำให้ได้ค่า ripple ลดลง

และใช้ค่าความต้านทานเท่ากับ 2 k Ω , 50 W

3.2 การออกแบบและสร้างชุดกำลังของ INVERTER

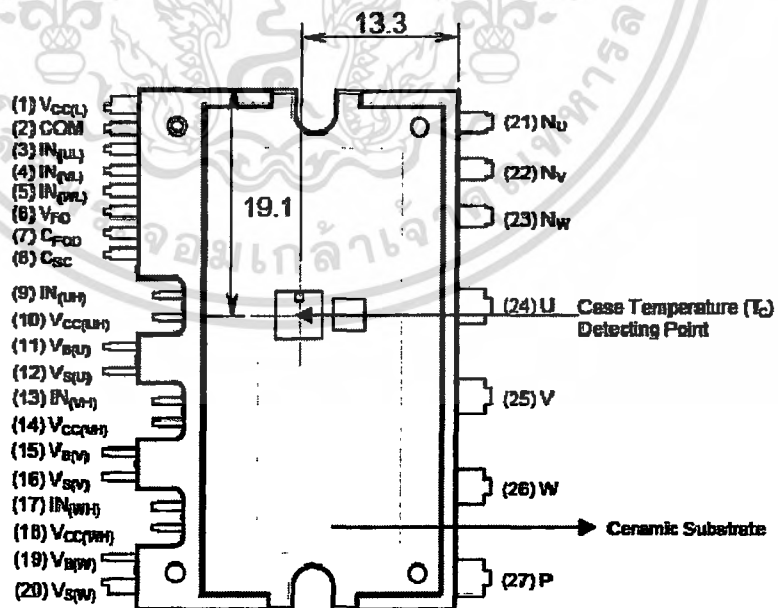
3.2.1 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

คือวงจรที่แปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ โดยชุดวงจรกำลัง Inverter จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้รับจากวงจร Converter เพื่อจ่ายให้แก่มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการขับเคลื่อน ในการทำงานจะรับ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแล้วมาทำการแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ เพื่อป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งในส่วนของชุดกำลังของวงจร Inverter นี้จะเลือกใช้ไอซีเบอร์ FSBS5CH60 มาเป็นสวิทช์กำลังในวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำให้ง่ายและสะดวกในการนำไปใช้งานควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.2.2 รายละเอียดของไอซีเบอร์ FSBS5CH6

รายละเอียดที่สำคัญเกี่ยวกับ FSBS5CH6 มีดังนี้

- 600 V / 3 – 30 A
- ประสิทธิภาพการสูญเสียต่ำ
- ความนำเชื่อถือสูง
- สัญญาณรบกวนน้อย
- นำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น เครื่องปรับอากาศ , เครื่องซักผ้า , ตู้เย็น เป็นต้น



รูปที่ 3.2 Description of Dummy Pins

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

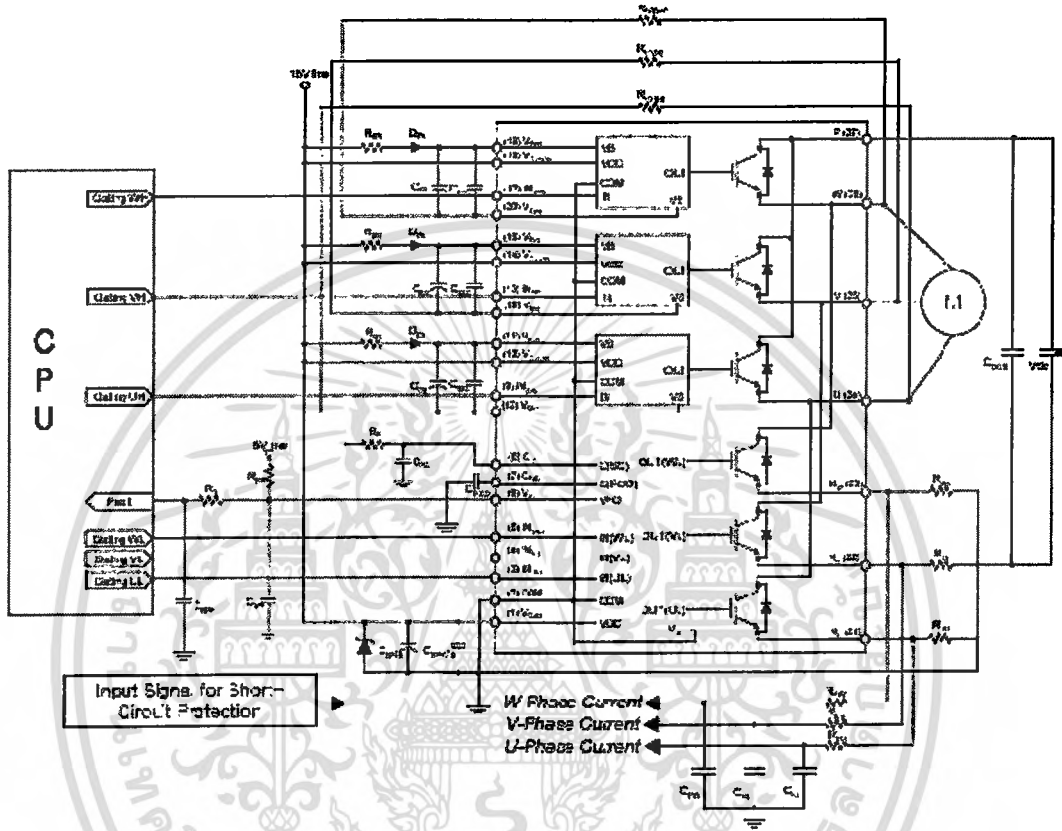
Pin Number	Pin Name	Pin Description
1	VCC(L)	Low-side Common Bias Voltage for IC and IGBTs Driving
2	COM	Common Supply Ground
3	IN(UL)	Signal Input for Low-side U Phase
4	IN(VL)	Signal Input for Low-side V Phase
5	IN(WL)	Signal Input for Low-side W Phase
6	VFO	Fault Output
7	CFOD	Capacitor for Fault Output Duration Time Selection
8	CSC	Capacitor (Low-pass Filter) for Short-Current Detection Input
9	IN(UH)	Signal Input for High-side U Phase
10	VCC(UH)	High-side Bias Voltage for U Phase IC
11	VB(U)	High-side Bias Voltage for U Phase IGBT Driving
12	VS(U)	High-side Bias Voltage Ground for U Phase IGBT Driving
13	IN(VH)	Signal Input for High-side V Phase
14	VCC(VH)	High-side Bias Voltage for V Phase IC
15	VB(V)	High-side Bias Voltage for V Phase IGBT Driving
16	VS(V)	High-side Bias Voltage Ground for V Phase IGBT Driving
17	IN(WH)	Signal Input for High-side W Phase
18	VCC(WH)	High-side Bias Voltage for W Phase IC
19	VB(W)	High-side Bias Voltage for W Phase IGBT Driving
20	VS(W)	High-side Bias Voltage Ground for W Phase IGBT Driving
21	NU	Negative DC-Link Input for U Phase
22	NV	Negative DC-Link Input for V Phase
23	NW	Negative DC-Link Input for W Phase
24	U	Output for U Phase
25	V	Output for V Phase
26	W	Output for W Phase
27	P	Positive DC-Link Input

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของไอซีเบอร์ FSBS5CH6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การประยุกต์ใช้งานไอซีเบอร์ FSBS5CH60

เราได้นำไอซีตัวนี้มาสร้างวงจร Inverter ดังรูปที่ 3.3

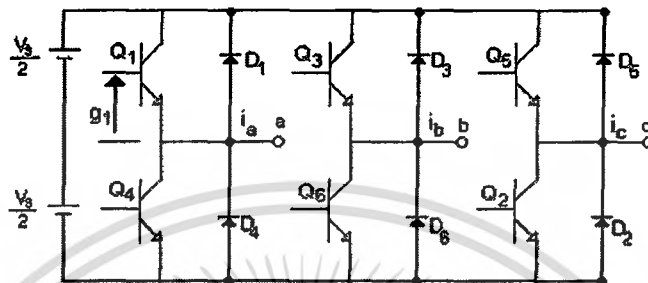


รูปที่ 3.3 การสร้างวงจร Inverter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การทำงานและการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรนี้เป็นวงจรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า DC ให้เป็นแรงดันไฟฟ้า AC 3 เฟส ที่มีรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า AC ใกล้เคียงรูปคลื่น sine ดังรูปที่ 3.4 วงจรนี้จะมีการส่งสัญญาณขับ Gate ทุกๆ 60 องศาและแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสที่ต่อกับโหลดจะเลื่อนไป 120 องศา



รูปที่ 3.4 วงจร Inverter 3 เฟส

จากรูปที่ 3.3 เราสามารถนำมาออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ได้ โดยส่วนที่สำคัญของวงจรได้แก่

3.2.4.1 Impedance cell $R_{E(H)}$

เมื่อทางด้าน High on และโหลดถูกชอร์ตลงกราวด์และเนื่องจากว่าสายไฟจะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำขึ้นภายในสาย จึงมีกระแส I_F โหลด และกระแส I_F นี้เองจะทำให้เกิดแรงดันขึ้น (di/dt) ของค่าความเหนี่ยวนำขึ้นและเมื่อทางด้าน HVIC OFF จะทำให้แรงดันที่เกิดขึ้นนั้นมีผลกระทบต่อไอซี ทางด้าน HVIC ดังนั้นเราจึงต่อ $R_{E(H)}$ เข้ามาเพื่อป้องกันแรงดันที่เกิดขึ้น

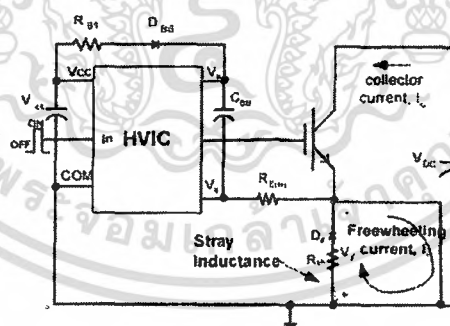
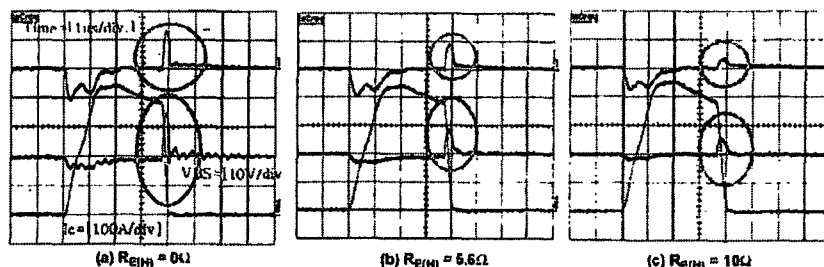


Figure 6.9 Load Short Test Circuit



รูปที่ 3.5 Waveform of V_{BS} and $-V_S$ According to $R_{E(H)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

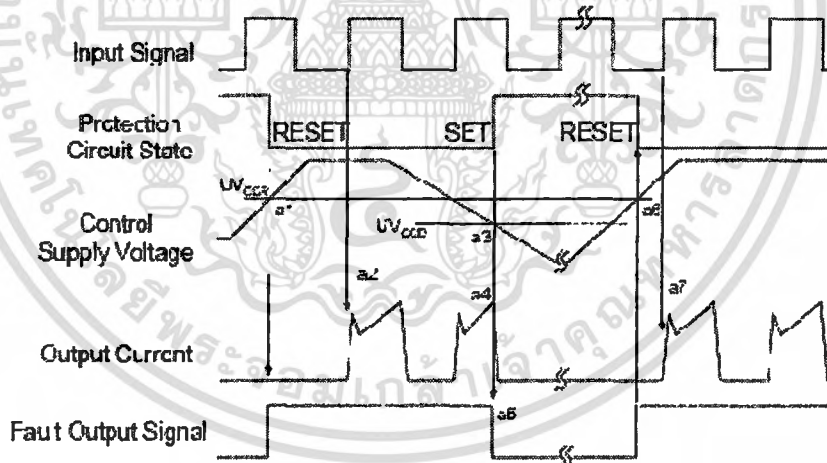
3.2.4.2 Function and Protection Circuit

แหล่งจ่ายไฟสำหรับไอซีเบอร์นี้คือ $15 V_{dc}$ หรืออาจจะอยู่ในช่วง $\pm 15 V_{dc} 10\%$ และกระแสควรจะมีมากกว่า $60 mA$ ดังตาราง แสดงถึงการควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับไอซี

แรงดัน(V)	การทำงาน
0 – 4	ไอซีจะไม่ทำงาน และ V_{FO} ไม่ทำงานด้วย
4 -12.5	ไอซีเริ่มทำงาน และ V_{FO} เริ่มจะทำงาน
12.5 – 13.5	แรงดันนี้จะทำงานและIGBTจะเริ่มทำงานด้วยแต่แรงดัน V_{CE} ยังไม่พอ
13.5 – 16.5	ทำงานตามปกติ
13 – 16.5	ทำงานตามปกติ
16.5 – 20 for V_{CC}	IGBT ยังทำงานอยู่แต่ระบบจะเพิ่มสัญญาณรบกวน
18.5 – 20 for V_{BS}	IGBT ยังทำงานอยู่แต่ระบบจะเพิ่มสัญญาณรบกวน
Over 20	วงจรอาจเกิดอันตราย

ตารางที่ 3.2 แสดงสภาวะการทำงานของไอซีเบอร์ FSBS5CH6

3.2.4.3 Under voltage Protection LVIC



รูปที่ 3.6 Timing Chart of Low-side Under –voltage Protection Function

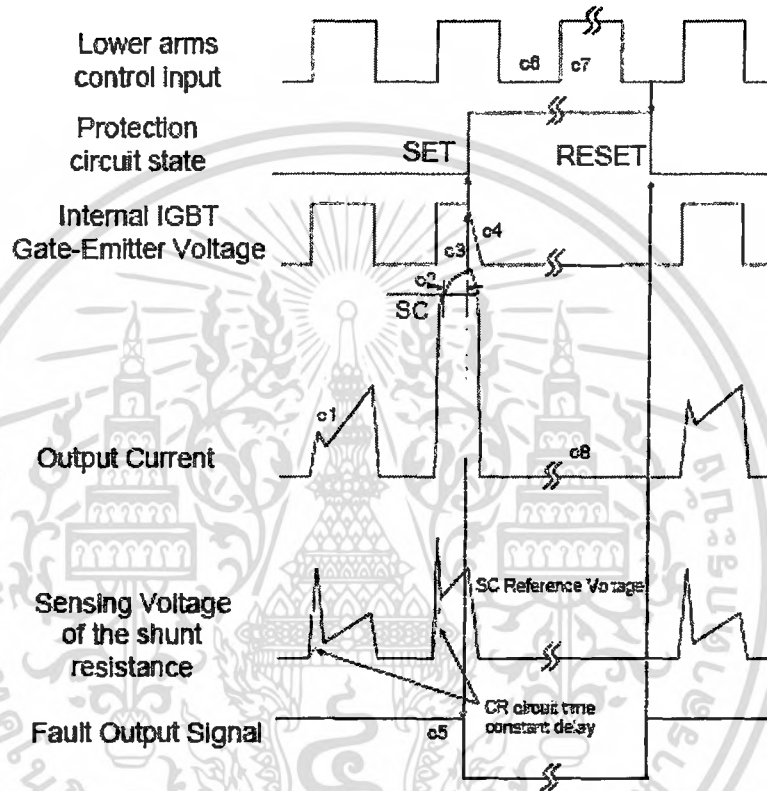
- a1: แรงดันเริ่มทำงาน
- a2: ทำงานปกติ IGBT ON และมีกระแสเอาท์พุทเกิดขึ้น
- a3: under voltage detection
- a4: IGBT OFF
- a5: สัญญาณ F_o เริ่มทำงาน (active low)
- a6: under voltage reset

a7: ทำงานปกติ และมีกระแสเอาท์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4.4 Shot-Circuit Protection

LVIC มีฟังก์ชันการตรวจสอบการทำงานของโหลดเกินพิกัดภายในไอซี ซึ่งจะตรวจเช็คโดยขา C_{SC} ถ้ามีกระแสไหลเกินระดับ SC reference ทางด้านเอาต์พุต ทำให้แรงดันตกคร่อม R_{shunt} มีค่ามากกว่า V_{ref} ดังนั้นไอซีจะทำให้สวิตช์ IGBT ทางด้าน LVIC เปิดวงจรแล้วส่งสัญญาณไปบอก CPU ให้ทำการระบวนการต่อไป ดังรูป Timing Diagram



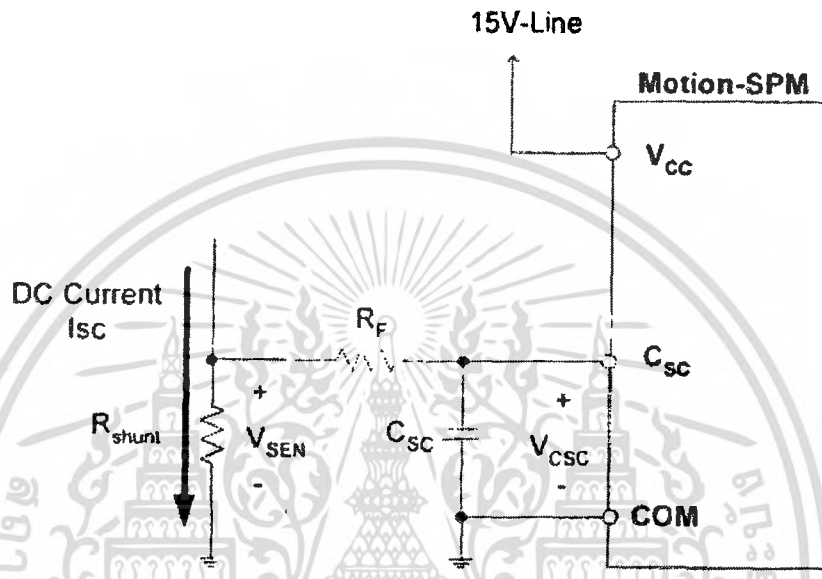
รูปที่ 3.7 Timing Chart of Short-circuit Protection Function

- C1: ทำงานตามปกติ IGBT ON และมีกระแสเอาต์พุตไหล
- C2: Shot-circuit current detection
- C3: IGBT ได้รับกระแสสูง
- C4: IGBT TURN OFF
- C5: อินพุต "L" ; IGBT OFF
- C6: อินพุต "H" ; IGBT on แต่อยู่ระหว่างการ active ของ F_o อยู่ดังนั้น IGBT จึงเปิดวงจรอยู่ (OFF)
- C7: IGBT OFF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4.5 Selecting Current Sensing Shunt Resistor

การเลือกค่า R ที่นำมาต่อขานานเมื่อ shot-circuit protection จากตัวอย่างด้านล่าง เรานำ R มาต่อขานาน 1 ตัว ซึ่งกระแส Line ทางด้าน N จะเป็นตัวที่ Detected และป้องกัน กระแสตัวนี้จะไหลผ่าน RC filter ถ้ากระแสมีค่ามากกว่า SC reference ขาเกททั้งหมดทางด้าน N ของ IGBT จะ OFF และมีสัญญาณ F_o ไป Detected บอก CPU ดังนั้นเมื่อมีสัญญาณ F_o (SC protection) ควรจะหยุดการทำงานทันที



รูปที่ 3.8 Example of Short Circuit Protection Circuit with 1 shunt Resistor

ค่าความต้านทานที่นำมาตรวจเช็คกระแส คำนวณได้จากสูตร

$$R_{shunt} = \frac{V_{SC(ref)}}{I_{SC}}$$

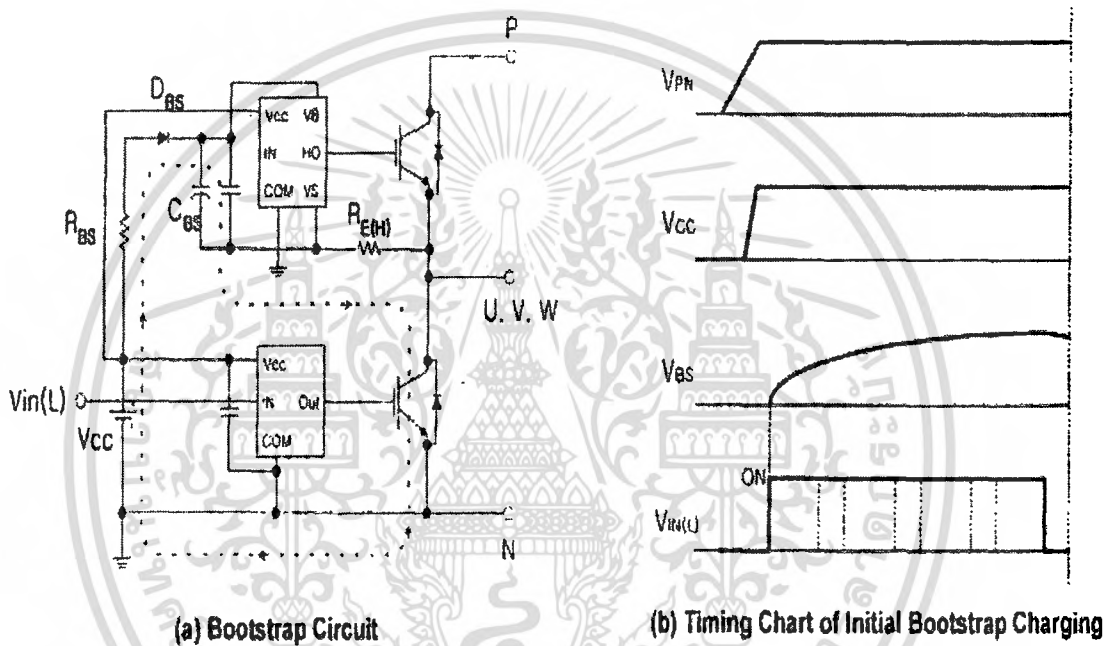
SC trip Level	Min	Typ	Max	Unit
$V_{SC(ref)}$	0.45	0.5	0.55	V

ตารางที่ 3.3 แรงดันอ้างอิง ($V_{SC(ref)}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4.6 Bootstrap Circuit

การทำงานของวงจร Bootstrap แรงดัน V_{BS} คือแรงดันระหว่าง $V_{B(u,v,w)}$ และ $V_{S(u,v,w)}$ ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายที่จ่ายให้กับ IGBT ทำงานทางด้าน HVIC แรงดันตรงนี้จะมีความอยู่ระหว่าง 13.5-18.5 V ที่สามารถขับ IGBT ทางด้าน HVIC ทำงานได้ ดังนั้นจากวงจรจะการทำงาน เมื่อมีสัญญาณทางด้าน low เข้ามาทำให้ IGBT ปิดวงจร V_S ถูกดึงลงกราวด์ ดังนั้นจึงมีกระแสไหลผ่าน R_{BS} D_{BS} C_{BS} และ C_{BS} ก็ค่อยๆ เริ่มชาร์จประจุ จากแหล่งจ่าย V_{CC} และเมื่อมีสัญญาณทางด้าน HVIC เข้ามา IGBT ทางด้าน LVIC จะเปิดวงจร แล้ว C_{BS} ที่ทำการชาร์จประจุมาก็จะคายประจุให้กับ IGBT ทางด้าน HVIC ให้ IGBT ทำงาน



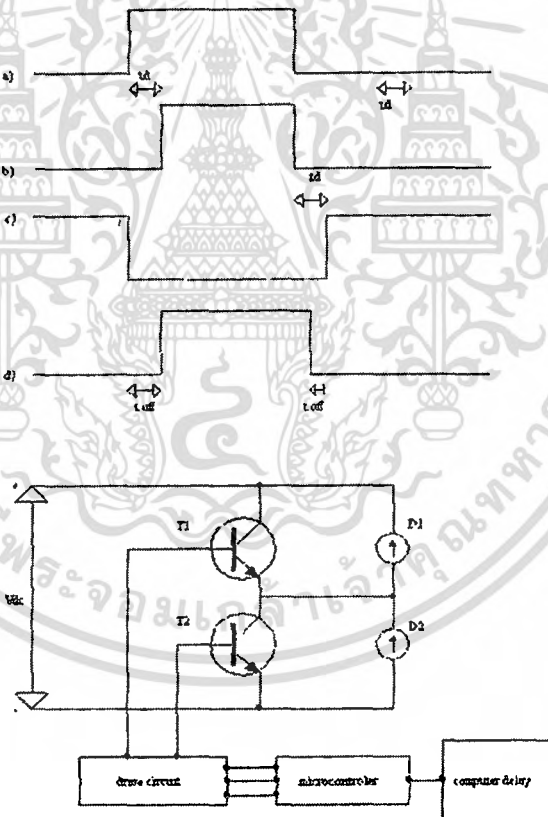
รูปที่ 3.9 Bootstrap Circuit Operation and Initial Charging

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การสร้างวงจรประวิงเวลา (Dead time)

ในทางปฏิบัติ กิ่งใดๆของอินเวอร์เตอร์ สวิตซ์ตัวบนและตัวล่างต้องไม่นำกระแสพร้อมกัน ดังนั้นจึงต้องการช่วงเวลาที่ยาวขึ้นที่สวิตซ์ทั้งคู่หยุดนำกระแสก่อนที่สวิตซ์จะเปลี่ยนสถานะ เพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่างบัสบวกกับบัสลบ ช่วงเวลานี้จะเรียกว่า เดดไทม์(Dead time) ซึ่งเวลาเดดไทม์ดังกล่าวจะต้องมีความเหมาะสม คือหากมีค่าน้อยเกินไปอาจทำให้เกิดการลัดวงจรได้ง่าย หรือถ้าหากมีค่ามากเกินไปก็อาจจะทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์ผิดเพี้ยนไปซึ่ง dead time ที่ใช้ในการทดลองนี้เท่ากับ $2\mu\text{s}$ ในการสร้างวงจร Dead time นี้จะใช้ Microcontroller ตระกูล M16C/62A ของ Misubishi โดยในตัว Microcontroller นี้จะมีโหมดการสร้าง Dead time และสามารถกำหนดเวลาได้จากสูตรคำนวณ

$$\text{Dead time} = \frac{f_1}{2} \times \text{จำนวนการหน่วงที่ต้องการ} \quad (\text{ซึ่งจะเก็บค่าไว้ใน Register DTTX})$$

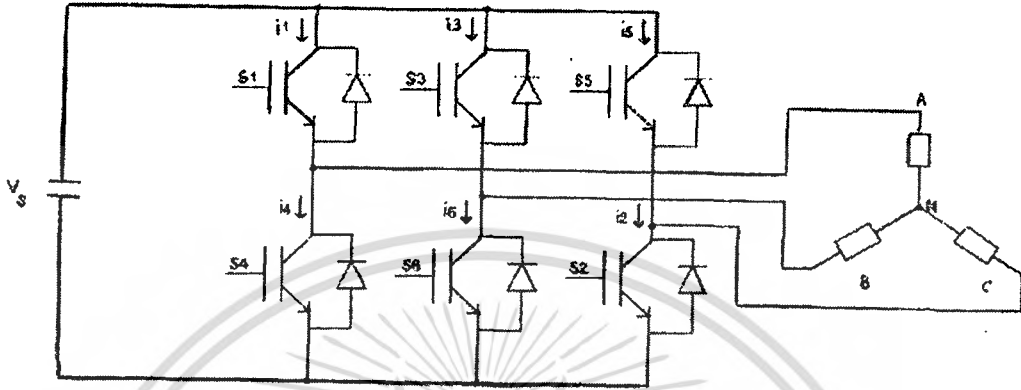


รูปที่ 3.10 การเกิด Dead Time

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

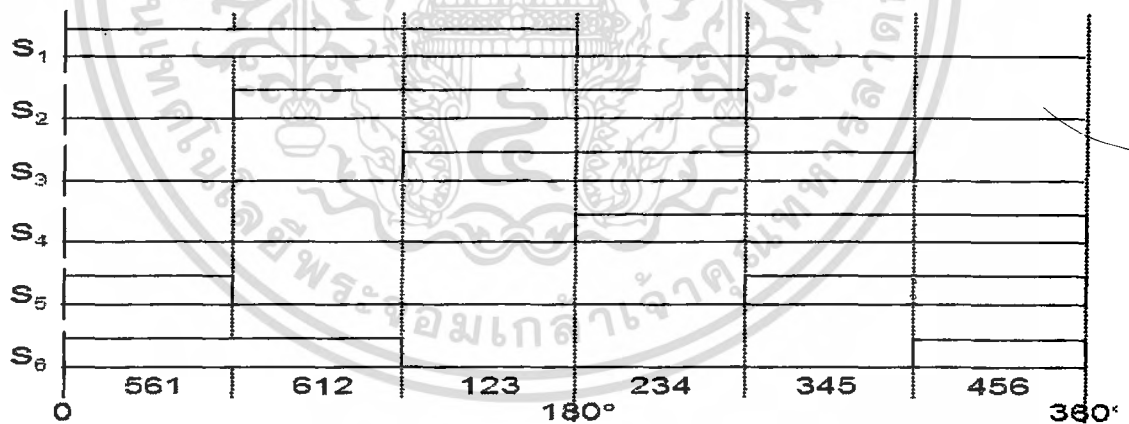
3.4 การสร้างสัญญาณ 6 step

จากรูปวงจรอินเวอร์เตอร์ ด้านล่างนี้เราจะทำการสร้างสัญญาณ 6 step โดยอาศัยการทำงานของ IGBT ดังตารางการควบคุมขาเกจของ IGBT ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจร Inverter

ตารางสัญญาณควบคุมขาเกจของไอจีบีที



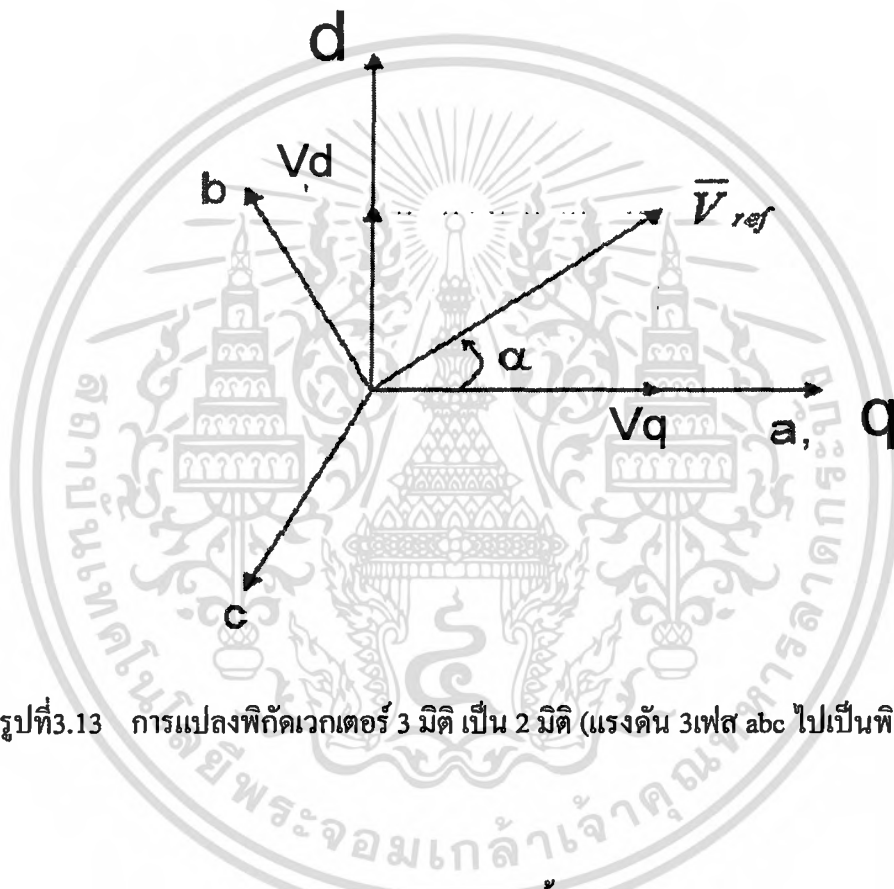
รูปที่ 3.12 สัญญาณควบคุมขาเกจของ IGBT เพื่อสร้างสัญญาณ 6 step

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 Space Vector Modulation (SVM)

หลักการของ SVM

- สัญญาณแรงดัน ไซน์ เกิดจากการที่เวกเตอร์ที่มีขนาดคงที่ เคลื่อนที่ไป โดยมีความถี่คงที่
- เทคนิค SVM PWM อ้างอิงกับแรงดัน โดยเป็นการรวมของรูปแบบการสวิตซ์ทั้ง 8 รูปแบบ (V_0 ถึง V_8) ดังตารางที่ 3.4
- การแปลงพิกัดเวกเตอร์ 3 มิติ เป็น 2 มิติ (แรงดัน 3 เฟส abc ไปเป็นพิกัด d-q) ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การแปลงพิกัดเวกเตอร์ 3 มิติ เป็น 2 มิติ (แรงดัน 3 เฟส abc ไปเป็นพิกัด d-q)

การออกแบบ Space Vector Modulation (SVM) ดังนี้

- การสร้างสัญญาณ SVM PWM มี 3 ขั้นตอนคือ
 - 1.) คำนวณหาค่า ของ V_q , V_d , V_{ref} และ มุม (angle, α)
 - 2.) คำนวณหาช่วงเวลาในแต่ละ sector (T_0, T_1, T_2)
 - 3.) หาค่าเวลาในการสวิตซ์ของ IGBT แต่ละตัว (S_1 ถึง S_7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1 คำนวณหาค่าของ V_q , V_d , V_{ref} และ มุม (angle, α)

จากองค์ประกอบแรงดัน 3 เฟส จากรูปที่ 3.14 จะได้



รูปที่ 3.14 สัญญาณ sine wave ที่ป้อนให้กับมอเตอร์

$$V_a = V_m \sin(\omega t)$$

$$V_b = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$V_c = V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

ดังนั้นเมื่อป้อนแรงดัน 3 เฟส ให้กับมอเตอร์ จะเกิด rotating flux ใน air gap ของมอเตอร์ ซึ่งองค์ประกอบของ rotating flux สามารถแสดงเป็น เวกเตอร์รับของแรงดันที่เคลื่อนที่ ของ V_d, V_q ดังรูป ที่ 3.15

และความสัมพันธ์ระหว่างการสวิตช์ ของ IGBT(1,3,5) กับแรงดัน (line to line voltage)

$[V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}]^T$ อธิบายดังสมการ

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (71)$$

ในส่วนของแรงดันเฟส (Phase voltage ; line-to-neutral output voltage vector $[V_a, V_b, V_c]^T$) คือ

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (72)$$

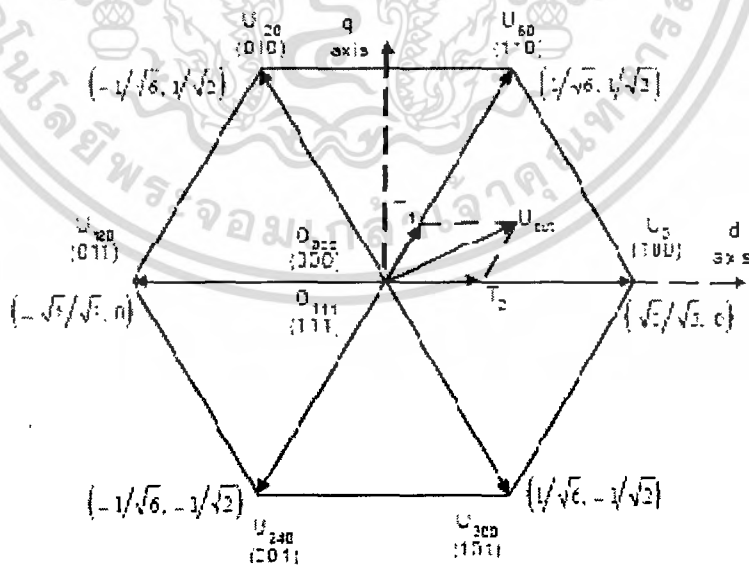
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

a	b	c	V_a	V_b	V_c	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	2/3	-1/3	-1/3	1	0	-1
1	1	0	1/3	1/3	-2/3	0	1	-1
0	1	0	-1/3	2/3	-1/3	-1	1	0
0	1	1	-2/3	1/3	1/3	-1	0	1
0	0	1	-1/3	-1/3	2/3	0	-1	1
1	0	1	1/3	-2/3	1/3	1	-1	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 3.4 ช่วงเวลาการสวิตช์และแรงดันเอาต์พุต ของอินเวอร์เตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

ดังนั้นจากสมการที่(72)เราสามารถแปลงพิกัดของระบบไฟฟ้าสามเฟส(a-b-c)ไปเป็นระบบไฟฟ้าในพิกัด d-q จากสมการ ที่ (73) และจะเคลื่อนที่ไปตาม sector ต่างๆ ดังรูปที่ 3.15

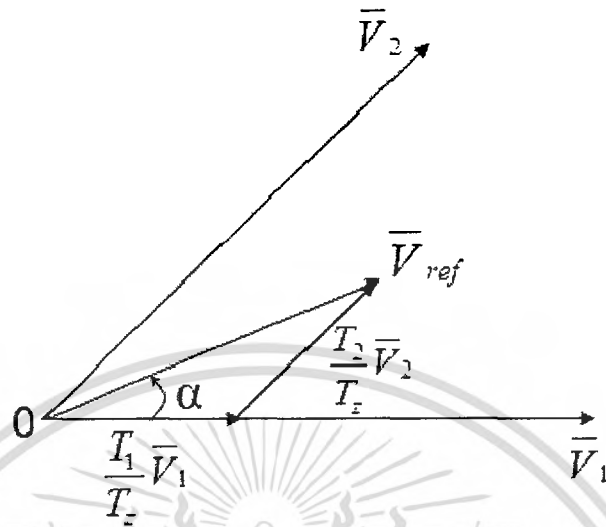
$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (73)$$



รูปที่ 3.15 การเคลื่อนที่ของ space vector จะเคลื่อนที่ไปตาม section

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 กำหนดหาช่วงเวลายินแต่ละ sector (T0,T1,T2)



รูปที่3.16 เวกเตอร์อ้างอิงที่เกิดจากการรวมของเวกเตอร์สองตัวใน sector1

จากรูปที่3.15 แรงดันเอาต์พุตใน sector 0 เมื่อคาบเวลาของ T1,T2,T0 คือ V1,V2 ทำให้ได้สมการที่ (74)

$$\frac{1}{T} \int_{nT}^{(n+1)T} V_{out} dt = \frac{1}{T} (T_1 V_1 + T_2 V_2) \quad n = 0,1,2, \dots \text{ โดยที่ } T_1 + T_2 \leq T \quad (74)$$

$$\frac{1}{T} \int_{nT_{PWM}}^{(n+1)T_{PWM}} V_{out} dt = T_{PWM} V_{out} = (T_1 V_1 + T_2 V_2) \quad n = 0,1,2, \dots$$

โดยที่ $T_1 + T_2 \leq T_{PWM}$

เมื่อพิจารณาความถี่การสวิตช์ที่สูงเพียงพอสำหรับการทำงาน เวกเตอร์อ้างอิง (V_{ref}) สามารถถูกอนุมานให้มีค่าคงที่ตลอดหนึ่งคาบเวลาของการสวิตช์ และจากสาเหตุที่เวกเตอร์ V_1 และ V_2 มีค่าคงที่ และเวกเตอร์ V_2 มีค่าเป็น 0 ทำให้เราสามารถกำหนดให้เวลาของการสวิตช์ได้ตามสมการที่ (74),(75)

$$T_{PWM} V_{out} = (T_1 V_1 + T_2 V_2) + T_0 (V_0 \text{ or } V_7) \quad (75)$$

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = T_{PWM} \begin{bmatrix} V_{1q} & V_{2q} \\ V_{1d} & V_{2d} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{outq} \\ V_{outd} \end{bmatrix} \quad (76)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 การหาค่าของ sector

$$A = \text{sig}(ref_1 - ref_2)$$

$$B = \text{sig}(ref_2 - ref_3)$$

$$C = \text{sig}(ref_3 - ref_1)$$

โดย ref_1, ref_2, ref_3 คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของเฟส a, b, c

$$\text{Sig}(x) = 1 \quad x > 0$$

$$\text{Undef} \quad x = 0$$

$$-1 \quad x < 0$$

$$N = |A + 2B + 4C|$$

N	1	2	3	4	5	6
Sector	1	5	0	3	2	4

ตารางที่ 3.5 แสดงการหาค่า Sector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

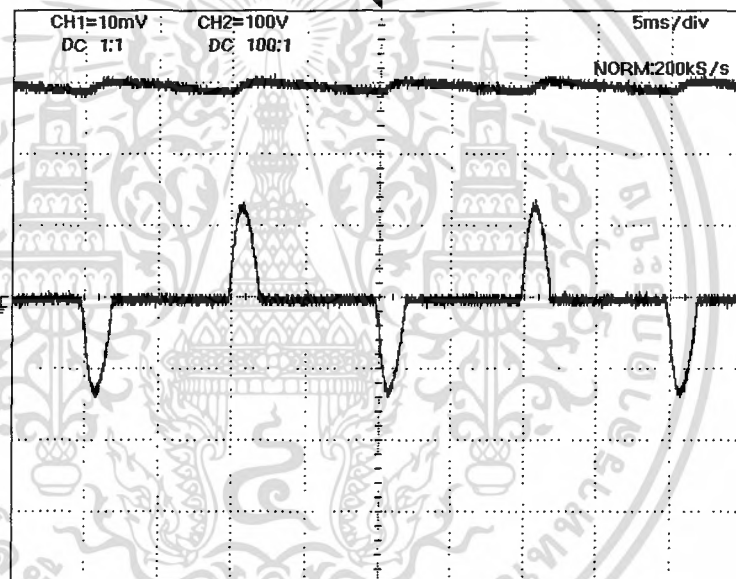
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลองและผลการทดลองที่ได้จากการสร้างโดยสัญญาณ 6-Step

หลังจากการออกแบบและสร้างวงจร Converter , Inverter ได้แล้วนั้นในบทนี้จะสรุปผลการทดลองของการทดลองในแต่ละส่วน ดังนี้

4.1.1 ผลการทดลองที่ได้จาก Converter ขับโหลดความต้านทาน



รูปที่ 4.1 สัญญาณขับ โหลดความต้านทานของ Converter

แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (V_{AC}) ที่ป้อนให้แก่วงจร Converter เท่ากับ 220 V

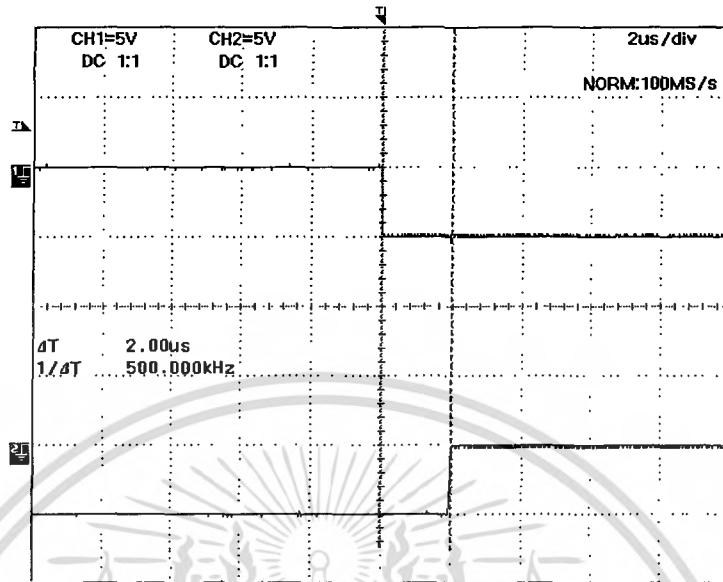
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจร Converter เท่ากับ 305 V

กระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุต (I_s) เท่ากับ 17 A

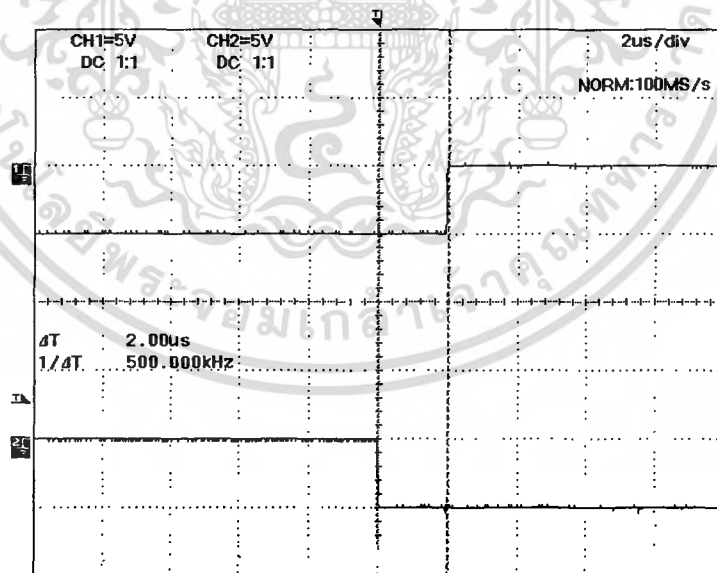
กระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต (I_L) เท่ากับ 3.4 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการทดลองที่ได้จากวงจรประวิงเวลา (Dead Time)



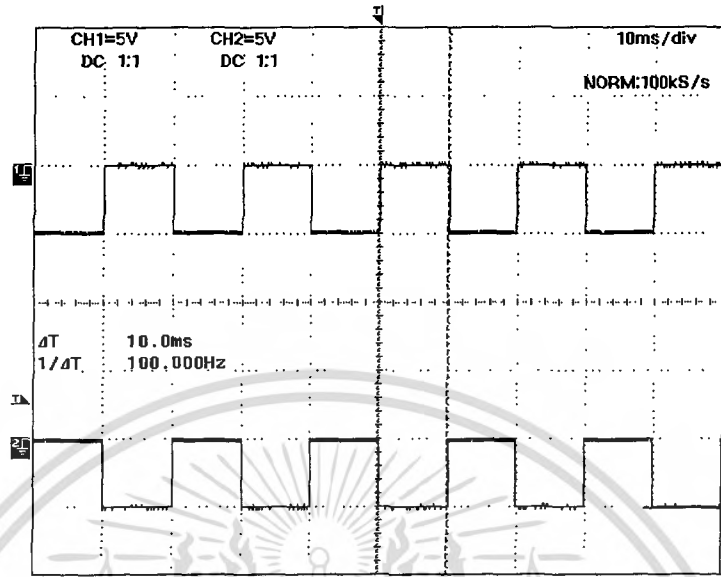
รูปที่ 4.1.1 การประวิงเวลาที่ 2 us ของสัญญาณขั้วเกท ช่วงขอบขาสูง



รูปที่ 4.1.2 การประวิงเวลาที่ 2 us ของสัญญาณขั้วเกทช่วงขอบขาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

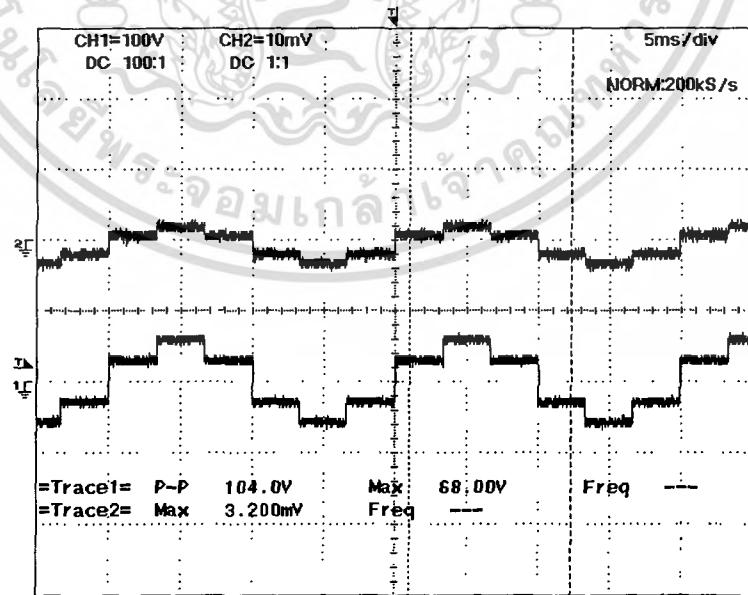
4.1.3 ผลการทดลองที่ได้จากวงจรขับ IGBT



รูปที่ 4.1.3 สัญญาณขับ IGBT ในกึ่งเดียวกัน

4.1.4 ผลการทดลองที่ได้จากวงจร Inverter ขับโหลดความต้านทานที่แรงดันอินพุตค่า

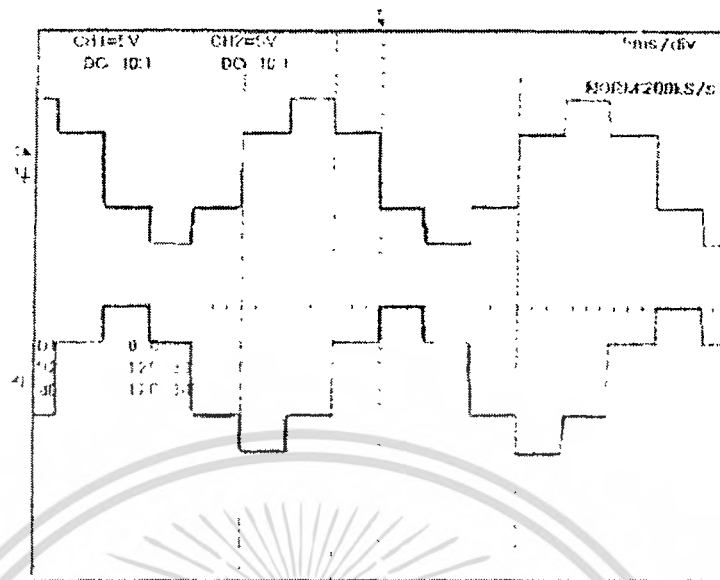
ต่างๆ



รูปที่ 4.1.4 สัญญาณ 6 step ของ V_{AN} และ I_A

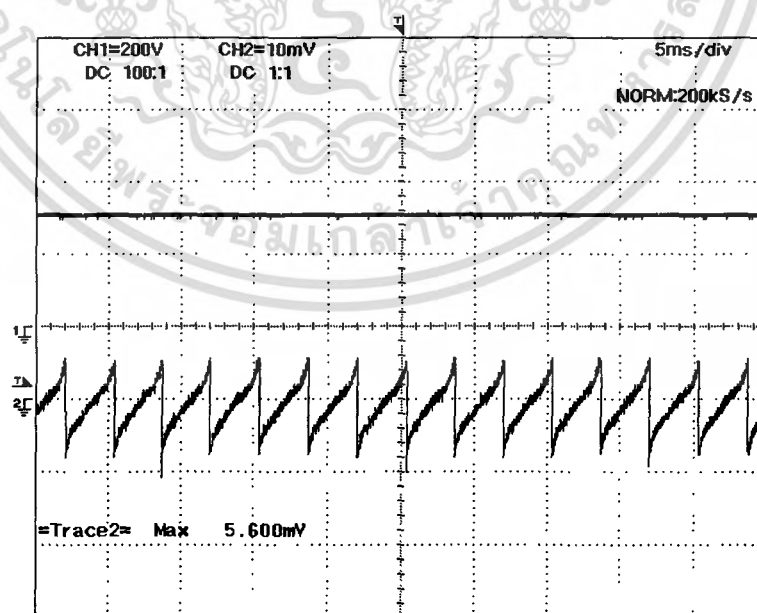
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 ผลการทดลองที่ได้จากวงจร Inverter 3 เฟส



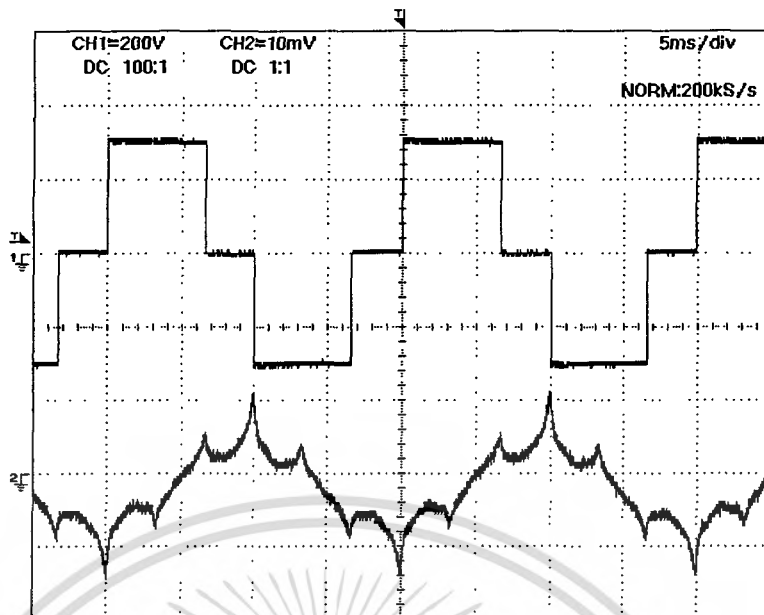
รูปที่ 4.1.5 สัญญาณ 6 step ของ V_{AN} เทียบกับ V_{BN}

4.2 ผลการทดลองที่ได้จากการต่อวงจรสำเร็จในการขับโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.2 สัญญาณของกระแสและแรงดันที่ได้จากขั้วมอเตอร์ทางด้านอินพุตของ Inverter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



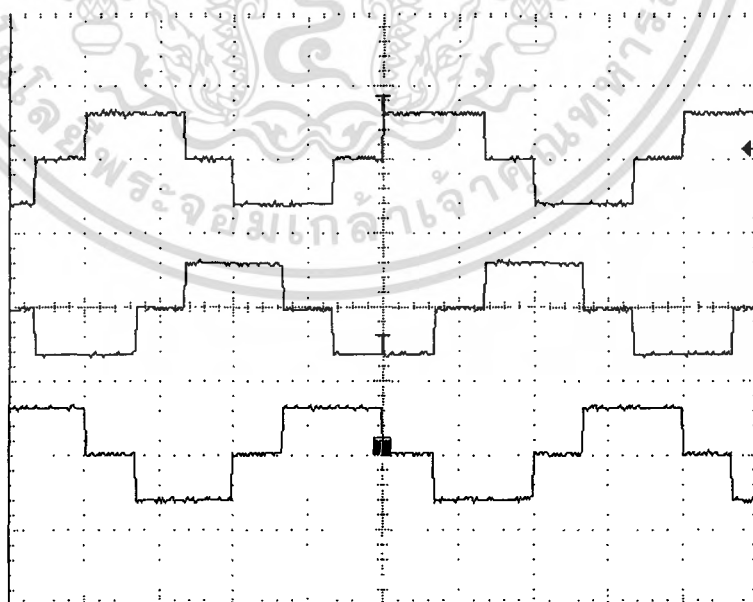
รูปที่ 4.2.1 สัญญาณของกระแสและแรงดันทางด้านเอาต์พุตของ Inverter

จากทดลองขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำให้ได้ผลดังนี้

แรงดันที่ได้รับจากวงจร Converter (V_{DC}) = 305 V

กระแสของโหลด (I_V) = 1.2 A

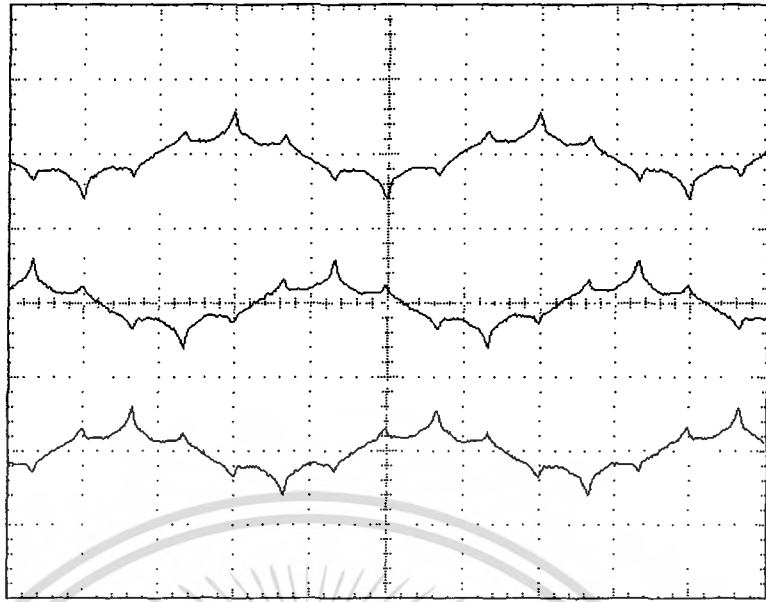
ความเร็วรอบของมอเตอร์ = 1500 rpm



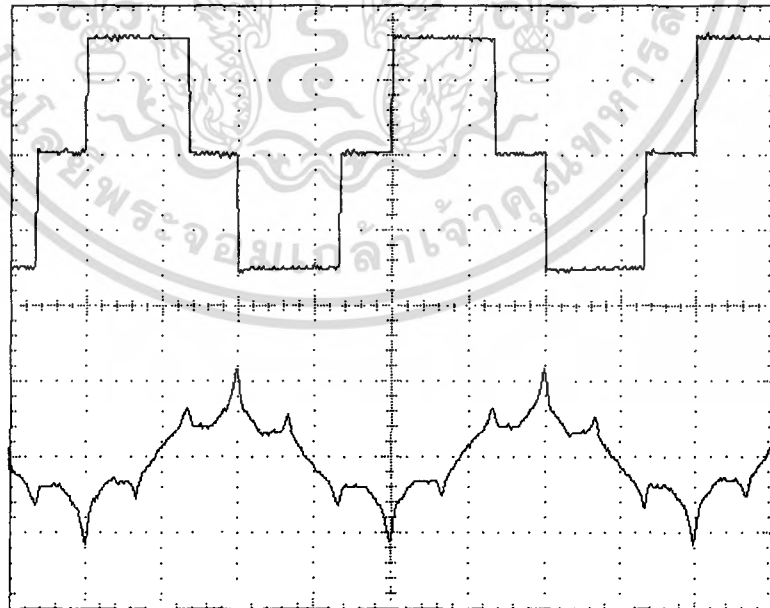
รูปที่ 4.2.2 V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} (line to line voltage) ที่ได้จากสัญญาณ 6-step

ในการขับอินดักชันมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพียงครั้งเดียวเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



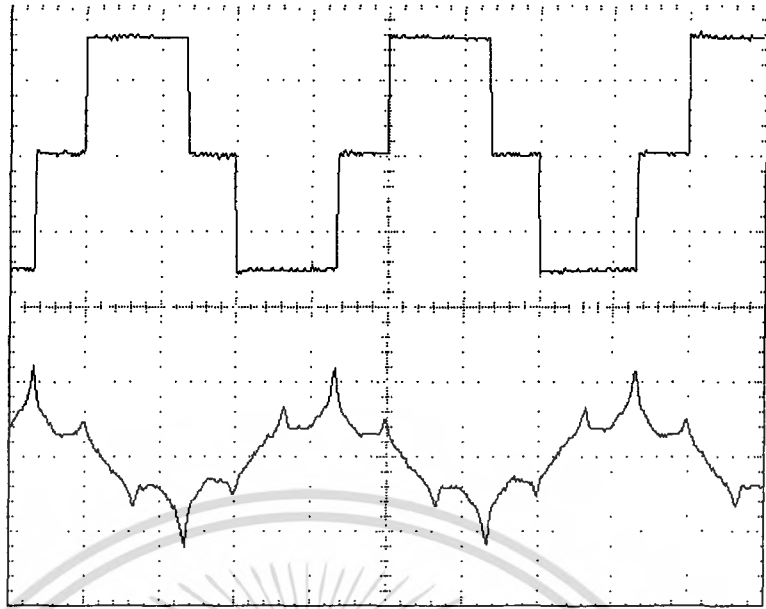
รูปที่ 4.2.3 กระแสทางด้านเอาต์พุต (i_a, i_b, i_c) ในแต่ละเฟส ที่ได้จากการส่งสัญญาณ 6-step ในการขับอินดักชั่นมอเตอร์



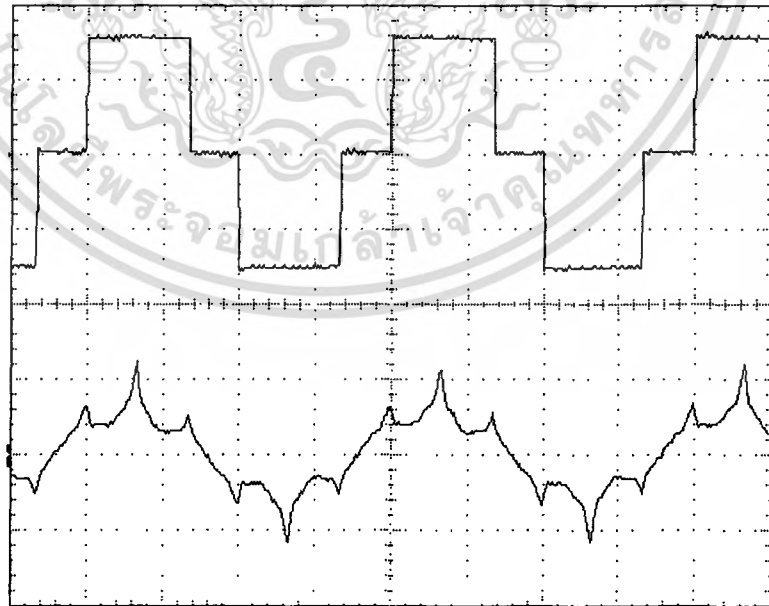
รูปที่ 4.2.4 แรงดันไฟฟ้า V_{ref} เทียบกับกระแสไฟฟ้า i_a ในการส่งสัญญาณ 6-step

ในการขับอินดักชั่นมอเตอร์สามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

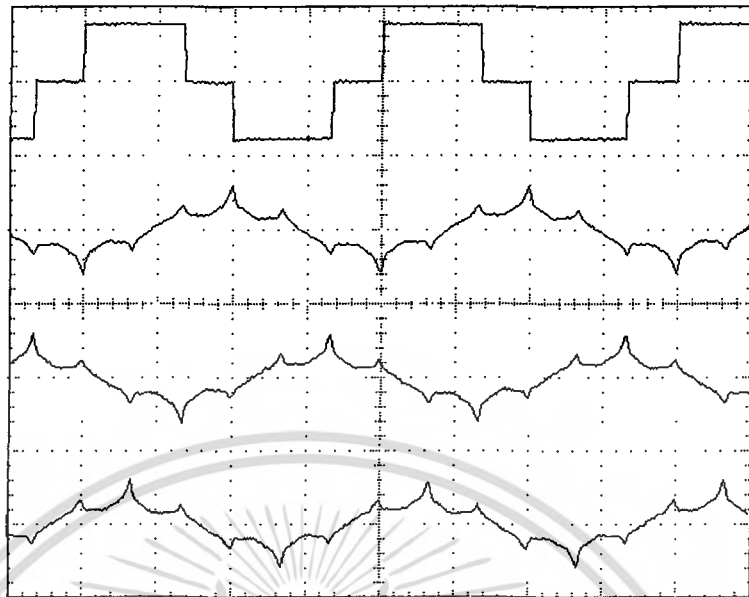


รูปที่ 4.2.5 แรงดันไฟฟ้า V_b เทียบกับกระแสไฟฟ้า i_a ในการส่งสัญญาณ 6-step ในการขับอินดักชั่นมอเตอร์



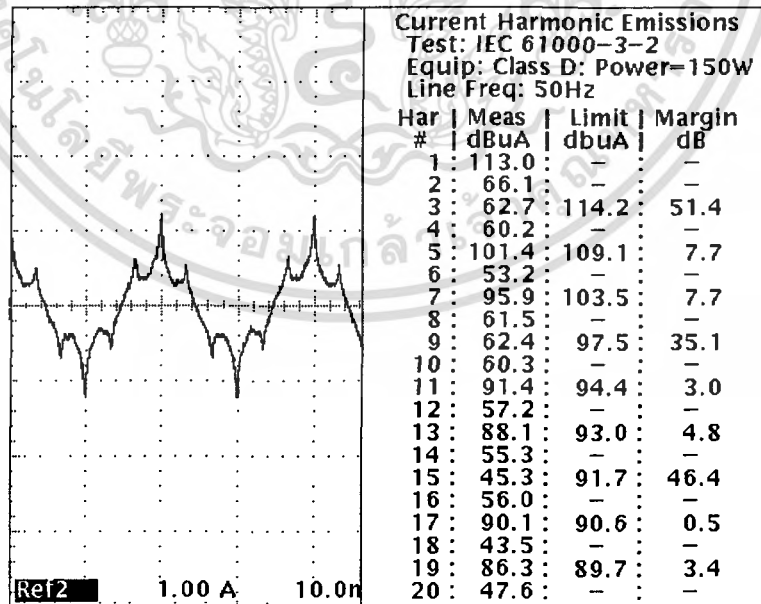
รูปที่ 4.2.6 แรงดันไฟฟ้า V_b เทียบกับกระแสไฟฟ้า i_a ในการส่งสัญญาณ 6-step ในการขับอินดักชั่นมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2.7 แรงดันไฟฟ้า V_{sb} เทียบกับกระแสไฟฟ้า i_a, i_b, i_c ในการส่งสัญญาณ 6-step ในการขับอินดักชั่นมอเตอร์

4.3 ผลการวัดค่าฮาร์โมนิกของกระแสที่ได้จากการป้อนสัญญาณแบบ 6-Step

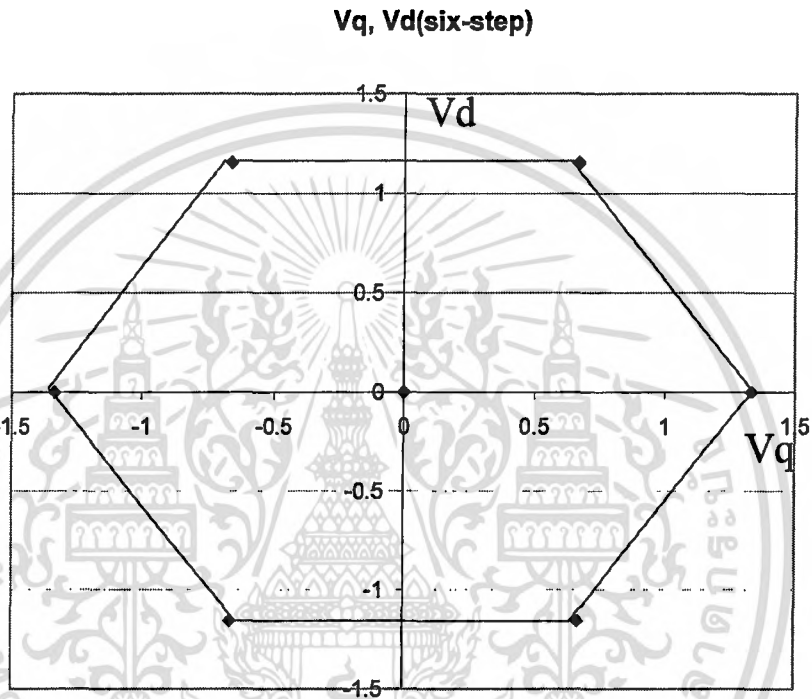


รูปที่ 4.3 แสดงการวัดค่าฮาร์โมนิกของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการป้อนสัญญาณแบบ 6-Step

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดลองและผลการทดลองที่ได้จากเทคนิค Space Vector Modulation จากการคำนวณโดยโปรแกรม Excel

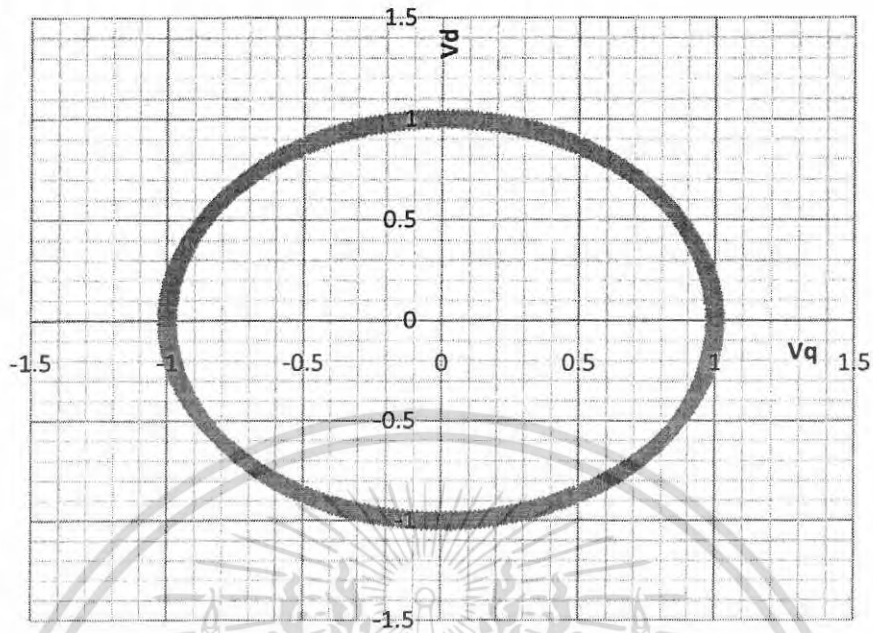
4.4.1 กราฟของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวิธีแบบ 6-Step



รูปที่ 4.4 กราฟสัญญาณแรงดันไฟฟ้าโดยวิธี 6-Step $V_{d(6-step)}$ $V_{q(6-step)}$ จากโปรแกรมExcel

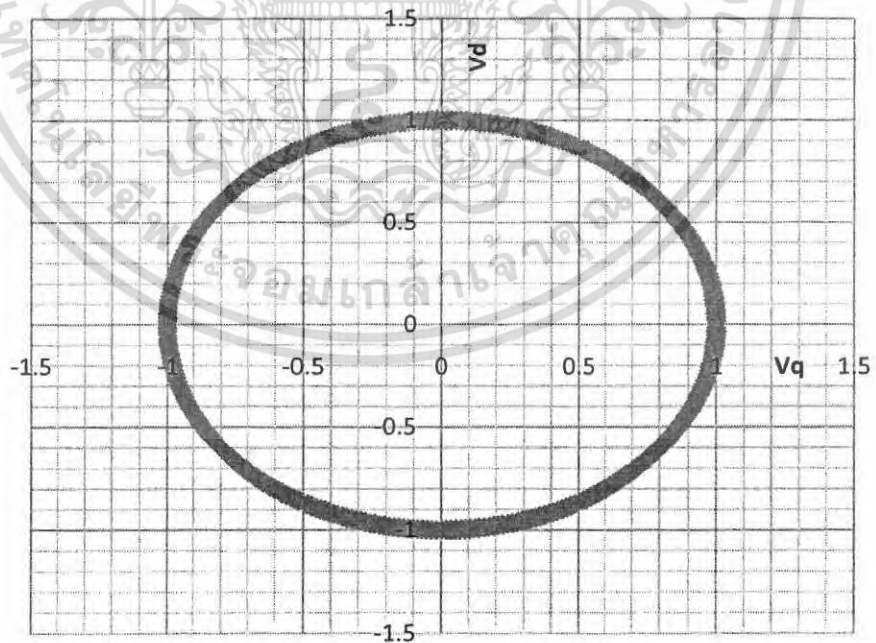
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 กราฟของแรงดันไฟฟ้า sine wave (V_{out} reference)



รูปที่ 4.4.1 กราฟสัญญาณแรงดันไฟฟ้า $V_{d(sin)}$, $V_{q(sin)}$ จากโปรแกรมExcel

4.4.3 กราฟของแรงดันไฟฟ้าที่ได้สร้างขึ้นโดยวิธี SVM

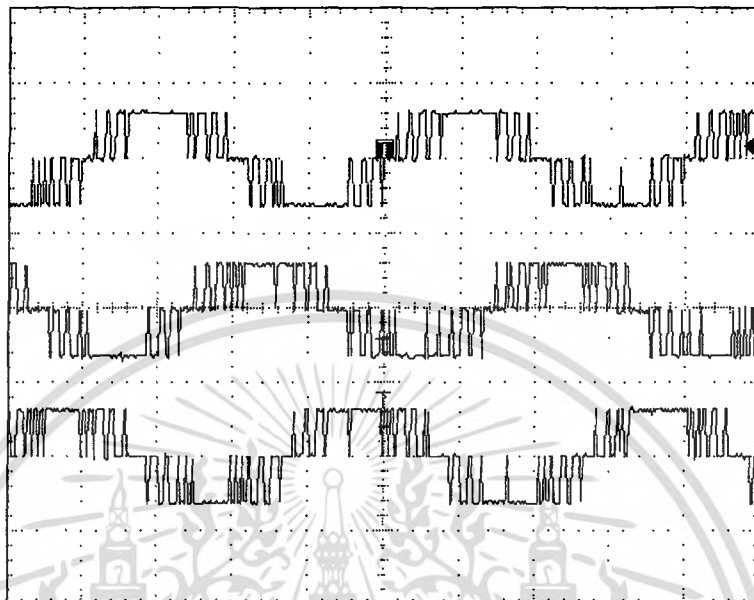


รูปที่ 4.4.2 กราฟสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการสร้างโดยวิธีSVM $V_{d(svm)}$, $V_{q(svm)}$

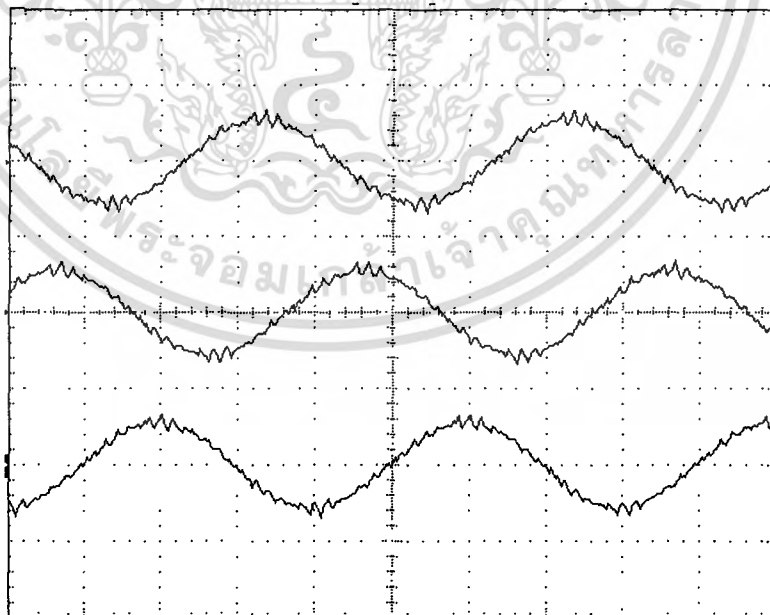
จากโปรแกรมExcel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การทดลองและผลการทดลองที่ได้จากเทคนิค Space Vector Modulation โดยการ ขับอินดักชันมอเตอร์

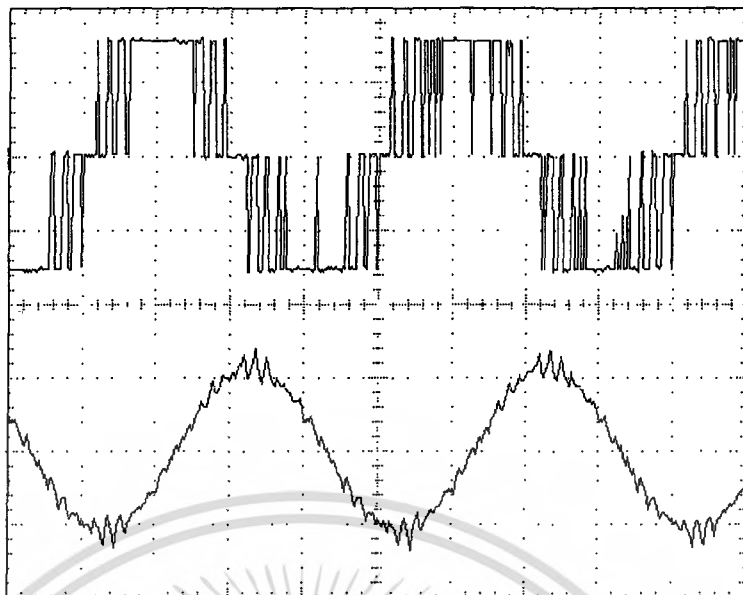


รูปที่ 4.5 V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} (line to line voltage) ที่ได้จาก Space Vector Modulation
ในการขับอินดักชันมอเตอร์

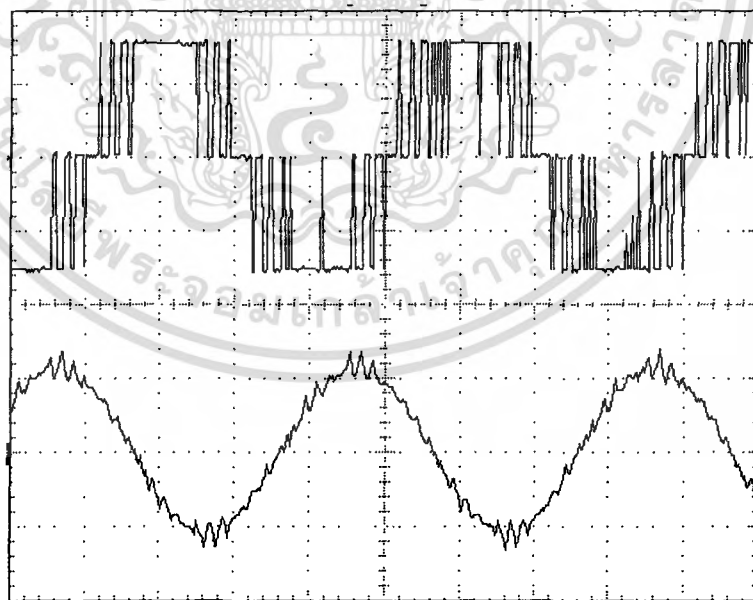


รูปที่ 4.5.1 กระแสทางด้านเอาต์พุต (i_a , i_b , i_c) ในแต่ละเฟส ที่ได้จาก Space Vector Modulation
ในการขับอินดักชันมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

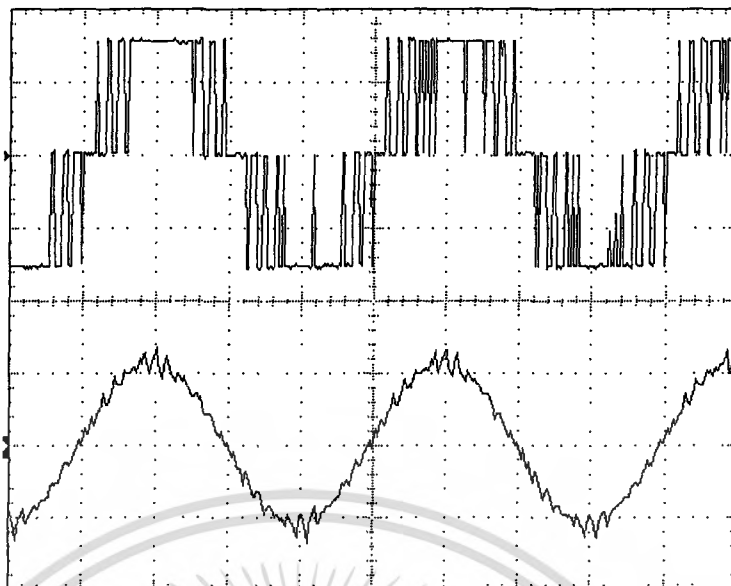


รูปที่ 4.5.2 แรงดันไฟฟ้า V_{ub} เทียบกับกระแสไฟฟ้า i_u ที่ได้จากรีชี Space Vector Modulation ในการขับอินดักชั่นมอเตอร์

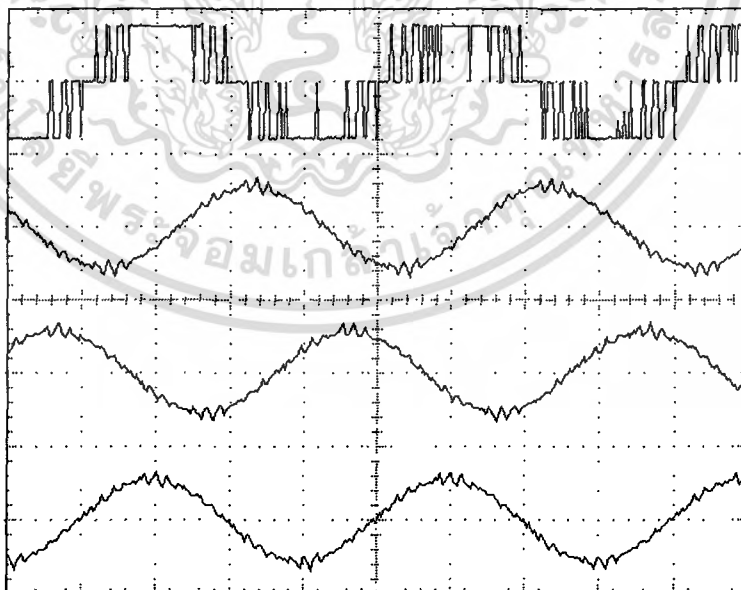


รูปที่ 4.5.3 แรงดันไฟฟ้า V_{vb} เทียบกับกระแสไฟฟ้า i_v ที่ได้จากรีชี Space Vector Modulation ในการขับอินดักชั่นมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



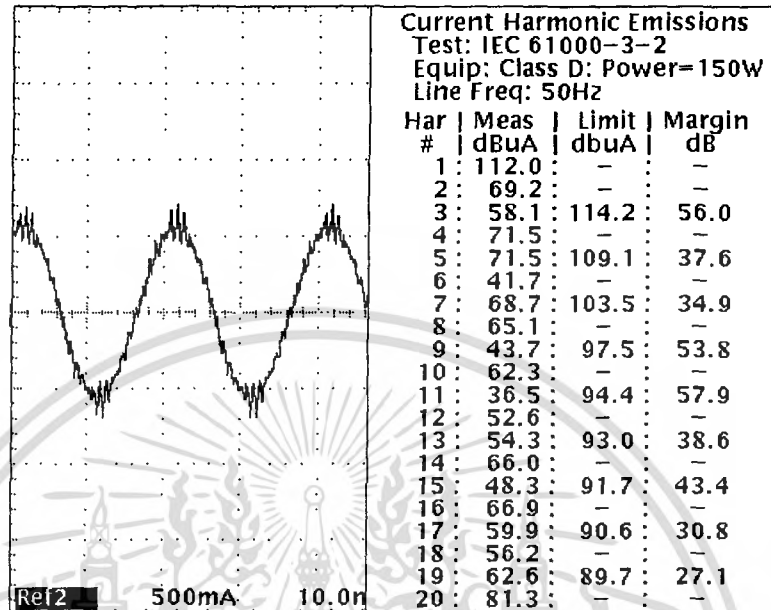
รูปที่ 4.5.4 แรงดันไฟฟ้า V_{ab} เทียบกับกระแสไฟฟ้า i_c ที่ได้จากวิธี Space Vector Modulation ในการขับอินดักชั่นมอเตอร์



รูปที่ 4.5.5 แรงดันไฟฟ้า V_{ab} เทียบกับกระแสไฟฟ้า i_a, i_b, i_c โดยวิธี Space Vector Modulation ในการขับอินดักชั่นมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ผลการวัดค่าฮาร์โมนิกของกระแสที่ได้จากวิธี Space Vector Modulation (SVM)



รูปที่ 4.6 แสดงการวัดค่าฮาร์โมนิกของกระแสที่ได้จากวิธี Space Vector Modulation (SVM)

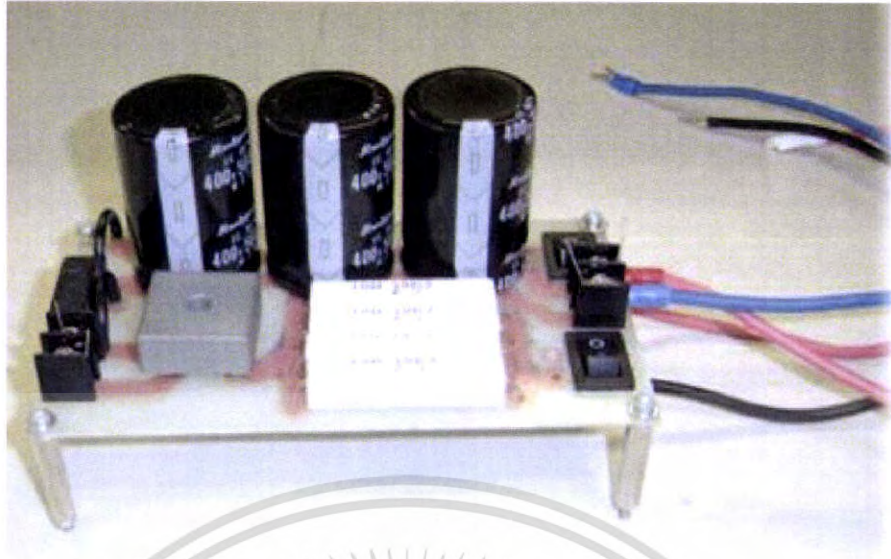
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

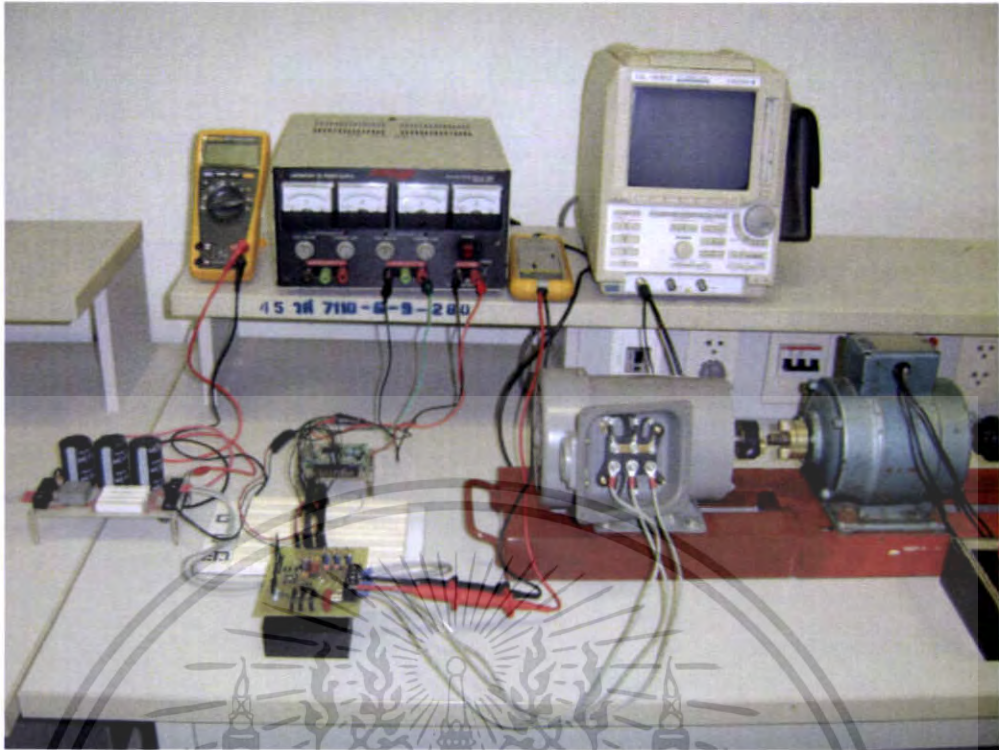
จากการออกแบบสร้าง Inverter โดยประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของ Converter ซึ่งจะใช้ วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอดพร้อมตัวกรองแรงดัน และในส่วนของ Inverter จะใช้ ไอซีเบอร์ FSBS5CH60 ในส่วนของ Converter นั้น เราได้ออกแบบวงจรเพื่อสร้างแรงดัน V_{DC} เพื่อจ่าย ให้กับ Inverter ที่แรงดัน 310 V_{DC} ในส่วนของ Inverter ได้ใช้ ไอซีเบอร์ FSBS5CH60 ทำให้ง่าย และสะดวกในการต่อใช้งาน ซึ่งเราต้องเขียนโปรแกรมสร้างวงจรประวิงเวลา (Dead Time) เพื่อ ป้องกันการลัดวงจรระหว่าง IGBT ตัวบนกับตัวล่างในกึ่งเดียวกันที่อยู่ภายในไอซี และได้สร้าง สัญญาณ ขับ IGBT โดยสัญญาณที่สร้างนั้นคือสัญญาณ 6 step

Space Vector Modulation (SVM) เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากวิธีหนึ่งเนื่องจาก ให้ผลคุณลักษณะที่ดี และให้สัญญาณที่ใกล้เคียงสัญญาณ Sine มากกว่าวิธี 6-Step โดยให้ช่วงความถี่ มอดูเลชันกว้าง ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับวิธี PWM แบบ third-harmonic injection และให้ Harmonics ต่ำกว่าวิธีแบบ 6-Step อีกทั้งให้แรงดันเอาต์พุตสูงกว่าวิธีแบบ 6-Step โดยประมาณ 15% จึงไม่ จำเป็นต้องอาศัยวงจรทวีแรงดัน ปราศจากผลการลดทอนของสัญญาณแรงดันระหว่างสายการ ประยุกต์ใช้งานง่ายและให้สัญญาณมอดูเลชันมีความแน่นอนกว่า และมีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธี แบบ 6-Step สามารถป้องกัน ไม่ให้เกิดการสวิตช์ โดยไม่จำเป็น ได้ และจากผลการทดลองจะเห็น ได้ว่าสัญญาณของกระแสในการขับอินดักชันมอเตอร์สามเฟส โดยวิธี 6-step กับวิธี Space Vector Modulation (SVM) โดยวิธี Space Vector Modulation (SVM) จะให้สัญญาณที่ออกมาใกล้เคียง สัญญาณ sine มากกว่า วิธี 6-step



รูปB INVERTER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป C การทดลองขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ประสูตร เดชสุวรรณ. “การควบคุมอินดักชั่นมอเตอร์ด้วยเทคนิคเวกเตอร์มอดดูเลชั่น โดยใช้ FPGA.” วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
2. คำรงฤทธิ วันจะกำ, ชีระบุทธิ์ สุขพุดผล. “การควบคุมความเร็วรอบอินดักชั่นมอเตอร์.” ปรียญานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
3. ประจักษ์ จันคำ. “การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการควบคุม แบบ สไลด์คิง.” วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
4. วีระเชษฐ์ ชันเงิน, วุฒพล ธาราธิรเศรษฐ์. “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง.” 4. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
5. Hamid A. Toliyat, Steven Campbell. “**DSP-BASED ELECTROMECHANICAL MOTION CONTROL**”, Texas A&M University Department of Electrical Engineering College Station, Texas.
6. Via Cantonale. “**SVM Space Vector Modulation**”, Improved output performance through advanced inverter control. GE Industrial System, 50 6595 Riazzino, Switzerland.
7. Zhenyu Yu. “**Space Vector PWM with TMS320C24x/F24x using Hardware and Software Determined Switching patterns**”. Texas Instruments , March, 1999.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR®

June 2007

Motion-SPM™

FSBF10CH60BT Smart Power Module

Features

- UL Certified No.E209204(SPM27-JA package)
- 600V-10A 3-phase IGBT inverter bridge including control ICs for gate driving and protection
- Easy PCB layout due to built in bootstrap diode
- Divided negative dc-link terminals for inverter current sensing applications
- Single-grounded power supply due to built-in HVIC
- Isolation rating of 2500Vrms/min.

Applications

- AC 100V ~ 253V three-phase inverter drive for small power ac motor drives
- Home appliances applications like air conditioner and washing machine

General Description

It is an advanced motion-smart power module (Motion-SPM™) that Fairchild has newly developed and designed to provide very compact and high performance ac motor drives mainly targeting low-power inverter-driven application like air conditioner and washing machine. It combines optimized circuit protection and drive matched to low-loss IGBTs. System reliability is further enhanced by the integrated under-voltage lock-out and short-circuit protection. The high speed built-in HVIC provides opto-coupler-less single-supply IGBT gate driving capability that further reduce the overall size of the inverter system design. Each phase current of inverter can be monitored separately due to the divided negative dc terminals.

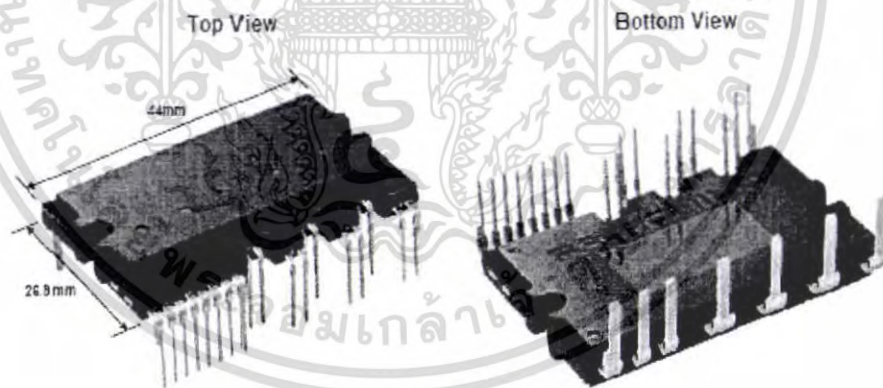


Figure 1.

Integrated Power Functions

- 600V-10A IGBT inverter for three-phase DC/AC power conversion (Please refer to Figure 3)

Integrated Drive, Protection and System Control Functions

- For inverter high-side IGBTs: Gate drive circuit, High voltage (isolated high-speed level: shifting Control circuit under-voltage (UV) protection
Note) Available bootstrap circuit example is given in Figures 12 and 13.
- For inverter low-side IGBTs: Gate drive circuit, Short circuit protection (SC)
Control supply circuit under-voltage (UV) protection
- Fault signaling: Corresponding to UV (Low-side supply) and SC fault
- Input interface: 3.3/5V CMOS/STTL compatible, Schmitt trigger input

Pin Configuration

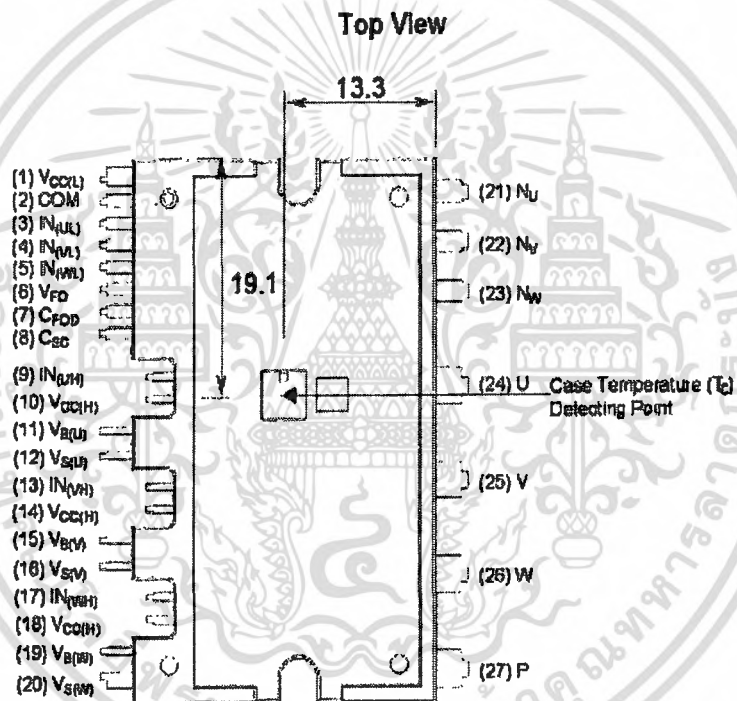


Figure 2.

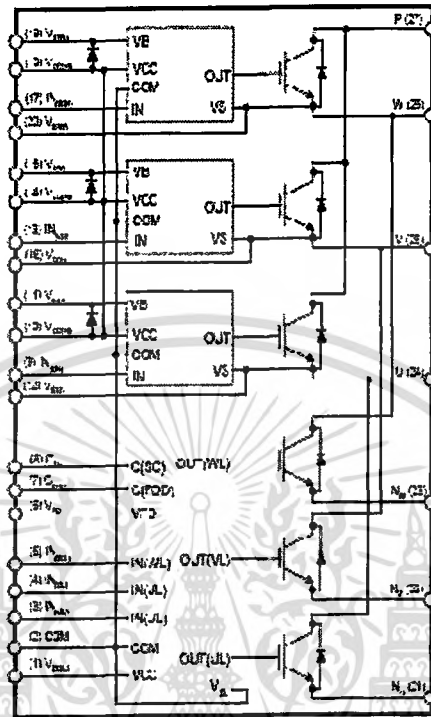
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pin Descriptions

Pin Number	Pin Name	Pin Description
1	$V_{CC(L)}$	Low-side Common Bias Voltage for IC and IGBTs Driving
2	COM	Common Supply Ground
3	$IN_{(UL)}$	Signal Input for Low-side U Phase
4	$IN_{(VL)}$	Signal Input for Low-side V Phase
5	$IN_{(WL)}$	Signal Input for Low-side W Phase
6	V_{FO}	Fault Output
7	C_{POD}	Capacitor for Fault Output Duration Time Selection
8	C_{SC}	Capacitor (Low-pass Filter) for Short-Current Detection Input
9	$IN_{(UH)}$	Signal Input for High-side U Phase
10	$V_{CC(H)}$	High-side Common Bias Voltage for IC and IGBTs Driving
11	V_{BU}	High-side Bias Voltage for U Phase IGBT Driving
12	V_{SN}	High-side Bias Voltage Ground for U Phase IGBT Driving
13	$IN_{(VH)}$	Signal Input for High-side V Phase
14	$V_{CC(H)}$	High-side Common Bias Voltage for IC and IGBTs Driving
15	V_{BV}	High-side Bias Voltage for V Phase IGBT Driving
16	V_{SN}	High-side Bias Voltage Ground for V Phase IGBT Driving
17	$IN_{(WH)}$	Signal Input for High-side W Phase
18	$V_{CC(H)}$	High-side Common Bias Voltage for IC and IGBTs Driving
19	V_{BW}	High-side Bias Voltage for W Phase IGBT Driving
20	V_{SN}	High-side Bias Voltage Ground for W Phase IGBT Driving
21	N_U	Negative DC-Link Input for U Phase
22	N_V	Negative DC-Link Input for V Phase
23	N_W	Negative DC-Link Input for W Phase
24	U	Output for U Phase
25	V	Output for V Phase
26	W	Output for W Phase
27	P	Positive DC-Link Input

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Internal Equivalent Circuit and Input/Output Pins



- Note:
1. Inverter low-side is composed of three IGBTs, freewheeling diodes for each IGBT and one control IC. This gate drive and protection functions.
 2. Inverter power side is composed of two inverter control input terminals and three inverter output terminals.
 3. Gate to high-side is composed of three IGBTs, freewheeling diodes for each IGBT and one control IC.

Figure 3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings ($T_J = 25^\circ\text{C}$, Unless Otherwise Specified)

Inverter Part

Symbol	Parameter	Conditions	Rating	Units
V_{PI}	Supply Voltage	Applied between P- N_{U1} , N_V , N_W	450	V
$V_{PI(Surge)}$	Supply Voltage (Surge)	Applied between P- N_{U1} , N_V , N_W	500	V
V_{CES}	Collector-emitter Voltage		600	V
$\pm I_C$	Each IGBT Collector Current	$T_C = 25^\circ\text{C}$	10	A
$\pm I_{CP}$	Each IGBT Collector Current (Peak)	$T_C = 25^\circ\text{C}$, Under 1ms Pulse Width	20	A
P_C	Collector Dissipation	$T_C = 25^\circ\text{C}$ per One Chip	20	W
$T_{J(Power\ chips)}$	Operating Junction Temperature	(Note 1)	-40 ~ +50	$^\circ\text{C}$

Note

1. The maximum junction temperature rating of the power chips integrated within the SPM is 175°C .

Control Part

Symbol	Parameter	Conditions	Rating	Units
V_{CC}	Control Supply Voltage	Applied between $V_{CC(H)}$, $V_{CC(L)}$ - COM	20	V
V_{BS}	High-side Control Bias Voltage	Applied between $V_{BS(U)}$ - $V_{BS(D)}$, $V_{BS(P)}$ - $V_{BS(N)}$, $V_{BS(W)}$ - $V_{BS(W)}$	20	V
V_{IH}	Input Signal Voltage	Applied between $IN_{U1(H)}$, $IN_{V1(H)}$, $IN_{W1(H)}$, $IN_{U1(L)}$, $IN_{V1(L)}$, $IN_{W1(L)}$ - COM	-0.3-17	V
V_{FO}	Fault Output Supply Voltage	Applied between V_{FO} - COM	-0.3- $V_{CC}+0.3$	V
I_{FL}	Fault Output Current	Sink Current at V_{FO} Pin	5	mA
V_{SC}	Current Sensing Input Voltage	Applied between C_{SC} - COM	-0.3- $V_{CC}+0.3$	V
$T_{J(Driver\ IC)}$	Operating Junction Temperature		-40 ~ +50	$^\circ\text{C}$

Bootstrap Diode Part

Symbol	Parameter	Conditions	Rating	Units
V_{RRM}	Maximum Repetitive Reverse Voltage		600	V
I_F	Forward Current	$T_C = 25^\circ\text{C}$	0.5	A
I_{FP}	Forward Current (Peak)	$T_C = 25^\circ\text{C}$, Under 1ms Pulse Width	2	A
T_J	Operating Junction Temperature		-40 ~ +50	$^\circ\text{C}$

Total System

Symbol	Parameter	Conditions	Rating	Units
$V_{PM(Prot)}$	Self Protection Supply Voltage Limit (Short Circuit Protection Capability)	$V_{CC} = V_{GS} = 13.5 \sim 16.5\text{V}$, $T_J = 150^\circ\text{C}$, Non-repetitive, less than 2 μs	400	V
T_C	Module Case Operation Temperature	$-40^\circ\text{C} \leq T_C \leq 150^\circ\text{C}$, See Figure 2	-40 ~ +25	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature		-40 ~ +50	$^\circ\text{C}$
V_{ISO}	Isolation Voltage	60Hz, Sinusoidal, AC 1 minute, Connection Pins to heat sink plate	2500	V_{RMS}

Thermal Resistance

Symbol	Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{th(j-c)}$	Junction to Case Thermal Resistance	Inverter IGBT part (per 1/6 module)	-	-	6.2	$^\circ\text{C/W}$
$R_{th(j-f)}$		Inverter FWD part (per 1/6 module)	-	-	6.5	$^\circ\text{C/W}$

Note

2. For the measurement point of case temperature (T_C), please refer to Figure 2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Characteristics (T_J = 25°C, Unless Otherwise Specified)

Inverter Part

Symbol	Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units	
V _{CE(SAT)}	Collector-Emitter Saturation Voltage	V _{CC} = V _{BS} = 15V V _N = 5V I _C = 10A, T _J = 25°C	-	-	2.2	V	
V _F	FWD Forward Voltage	V _N = 0V I _F = 10A, I _J = 25°C	-	-	2.6	V	
HS	Switching Times	V _{DN} = 300V, V _{CC} = V _{BS} = 15V I _C = 10A V _N = 0V ↔ 5V, inductive Load (Note 3)	t _{ON}	-	0.75	-	μs
			t _{CON}	-	0.15	-	μs
			t _{OFF}	-	0.50	-	μs
			t _{C(OFF)}	-	0.15	-	μs
			t _{rr}	-	0.10	-	μs
LS	Switching Times	V _{DN} = 300V, V _{CC} = V _{BS} = 15V I _C = 10A V _N = 0V ↔ 5V, inductive Load (Note 3)	t _{ON}	-	0.50	-	μs
			t _{CON}	-	0.25	-	μs
			t _{OFF}	-	0.50	-	μs
			t _{C(OFF)}	-	0.15	-	μs
			t _{rr}	-	0.10	-	μs
I _{CES}	Collector-Emitter Leakage Current	V _{CE} = V _{CES}	-	-	1	mA	

NOTE:

3. t_{ON} and t_{OFF} include the propagator delay time of the internal drive IC. t_{CON} and t_{C(OFF)} are the switching time of IGBT itself under the given gate driving condition internally. For the detailed information, please see Figure 4.

Control Part

Symbol	Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
I _{CC(L)}	Quiescent V _{CC} Supply Current	V _{CC} = 15V I _{N(U/L, V/L, W/L)} = 0V	-	-	23	mA
I _{CC(H)}	Quiescent V _{CC} Supply Current	V _{CC} = 15V I _{N(U/H, V/H, W/H)} = 0V	-	-	600	μA
I _{CS}	Quiescent V _{SS} Supply Current	V _{SS} = 15V I _{N(U/L, V/L, W/L)} = 0V	-	-	500	μA
V _{F(ON)}	Fault Output Voltage	V _{SC} = 0V, V _{FO} Circuit 4.7kΩ to 5V Pull-up	4.5	-	-	V
V _{F(O)}	Fault Output Voltage	V _{SC} = 1V, V _{FO} Circuit 4.7kΩ to 5V Pull-up	-	-	0.6	V
V _{SC(trip)}	Short Circuit Trip Level	V _{CC} = 15V (Note 4)	0.45	0.5	0.55	V
TSD	Over-temperature protection	Temperature of LVIC	-	160	-	°C
ΔTSD	Over-temperature protection hysteresis	Temperature of LVIC	-	5	-	°C
UV _{CCD}	Supply Circuit Under-Voltage Protection	Detection Level	10.7	11.0	13.0	V
UV _{CCR}		Reset Level	11.2	12.4	13.4	V
UV _{BSD}	Supply Circuit Under-Voltage Protection	Detection Level	10	11	12	V
UV _{BSR}		Reset Level	10.5	11.5	12.5	V
t _{FO}	Fault-out Pulse Width	C _{FO} = 33nF (Note 5)	1.0	1.5	-	ms
V _{IN(ON)}	ON Threshold Voltage	Applied between I _{N(U/H)} , I _{N(V/H)} , I _{N(W/H)} , I _{N(U/L)}	2.8	-	-	V
V _{IN(OFF)}	OFF Threshold Voltage	I _{N(V/L)} , I _{N(W/L)} - COM	-	-	0.6	V

NOTE:

4. Short-circuit current protection is functioning only at the on-states

5. The fault-out pulse width t_{FO} depends on the capacitance value of C_{FO} according to the following approximate equation: t_{FO} = 18.3 × 10⁻³ × (C_{FO}/nF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

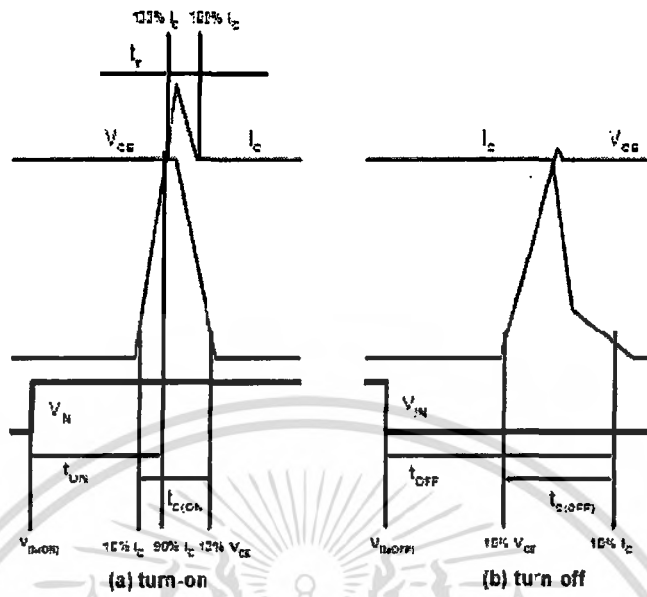


Figure 4. Switching Time Definition

Switching Loss (Typical)

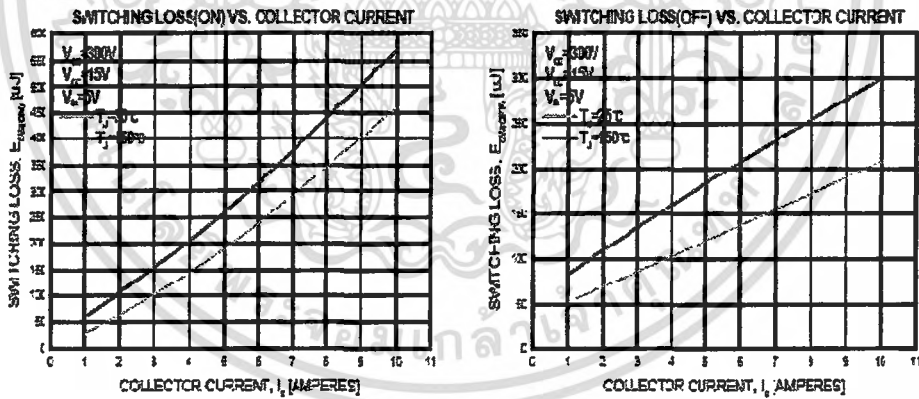
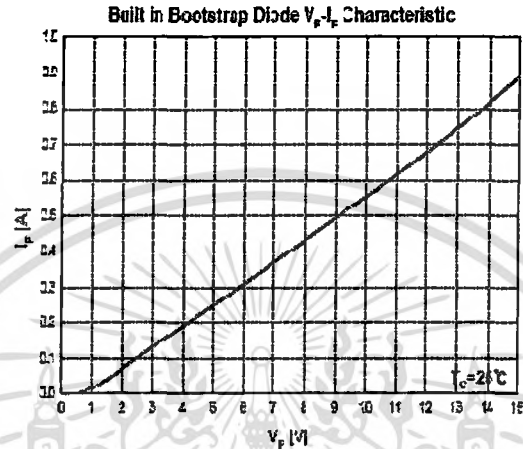


Figure 5. Switching Loss Characteristic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bootstrap Diode Part

Symbol	Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
V_F	Forward Voltage	$I_F = 0.1A, T_C = 25^\circ C$	-	2.5	-	V
t_r	Reverse Recovery Time	$I_F = 0.1A, T_C = 25^\circ C$	-	80	-	ns



Note:

6. Built in bootstrap diode includes around 16 Ω resistance characteristic.

Figure 6. Built in Bootstrap Diode Characteristics

Recommended Operating Conditions

Symbol	Parameter	Conditions	Value			Units
			Min	Typ.	Max.	
V_{FH}	Supply Voltage	Applied between P - Nu, Nv, Nw	-	300	400	V
V_{CC}	Control Supply Voltage	Applied between $V_{CC(H)}$, $V_{CC(L)}$ - COM	13.5	15	16.5	V
V_{GS}	High-side bias Voltage	Applied between $V_{E(U)}$ - $V_{S(U)}$, $V_{E(V)}$ - $V_{S(V)}$, $V_{E(W)}$ - $V_{S(W)}$	13.0	15	16.5	V
$\frac{dV_{CC}/dt}$, $\frac{dV_{GS}/dt}$	Control supply variation		-1	-	1	V/ μ s
t_{dead}	Blanking Time for Preventing Arm-short	For Each Input Signal	1.5	-	-	μ s
f_{PWM}	FWM Input Signal	$-40^\circ C \leq T_C \leq 125^\circ C$, $-40^\circ C \leq T_J \leq 150^\circ C$	-	-	20	kHz
V_{SEN}	Voltage for Current Sensing	Applied between Nu, Nv, Nw - COM (Including surge voltage)	-4		4	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mechanical Characteristics and Ratings

Parameter	Conditions		Limits			Units
			Min.	Typ.	Max.	
Mounting Torque	Mounting Screw, - M3	Recommended 0.82N·m	0.51	0.82	1.00	N·m
Device Flatness		Note Figure 7	0	-	+120	µm
Weight			-	15.4	-	g

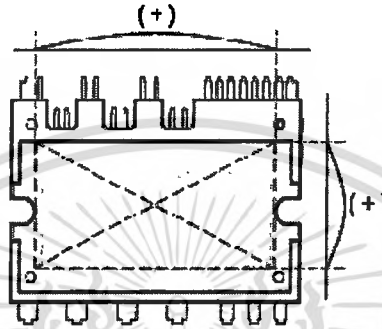


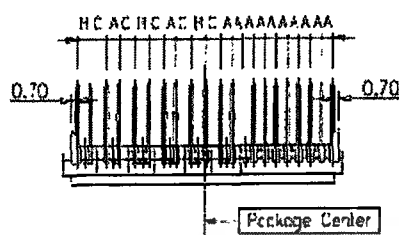
Figure 7. Flatness Measurement Position

Package Marking and Ordering Information

Device Marking	Device	Package	Reel Size	Tape Width	Quantity
FSBF10CH60BT	FSBF10CH60BT	SPM27-JA	-	-	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

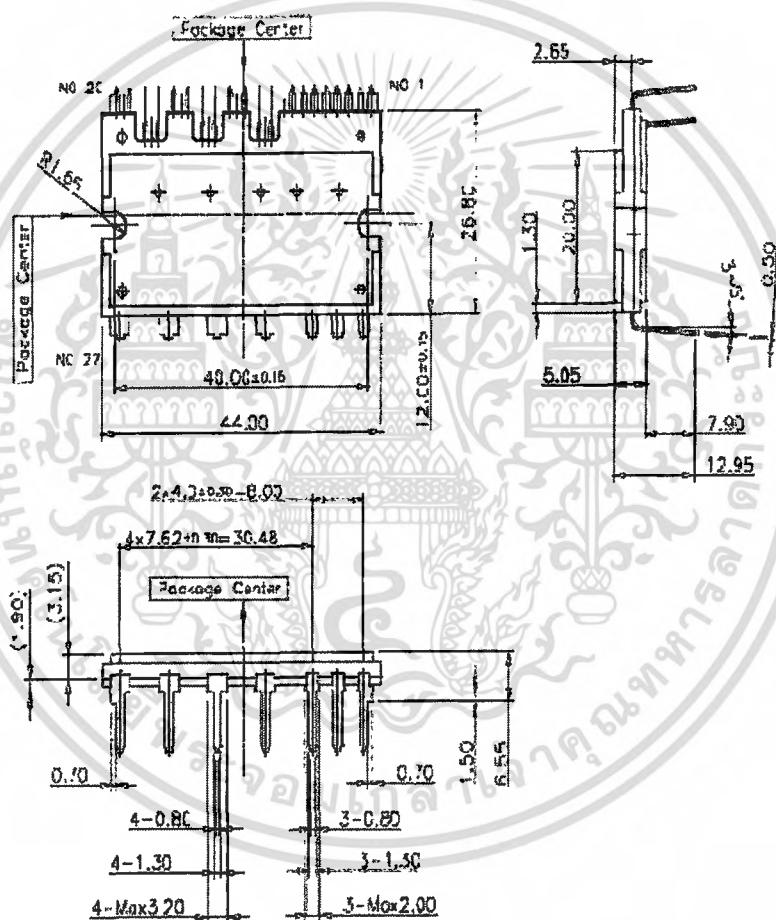
Detailed Package Outline Drawings

Lead Pitch : ± 0.30

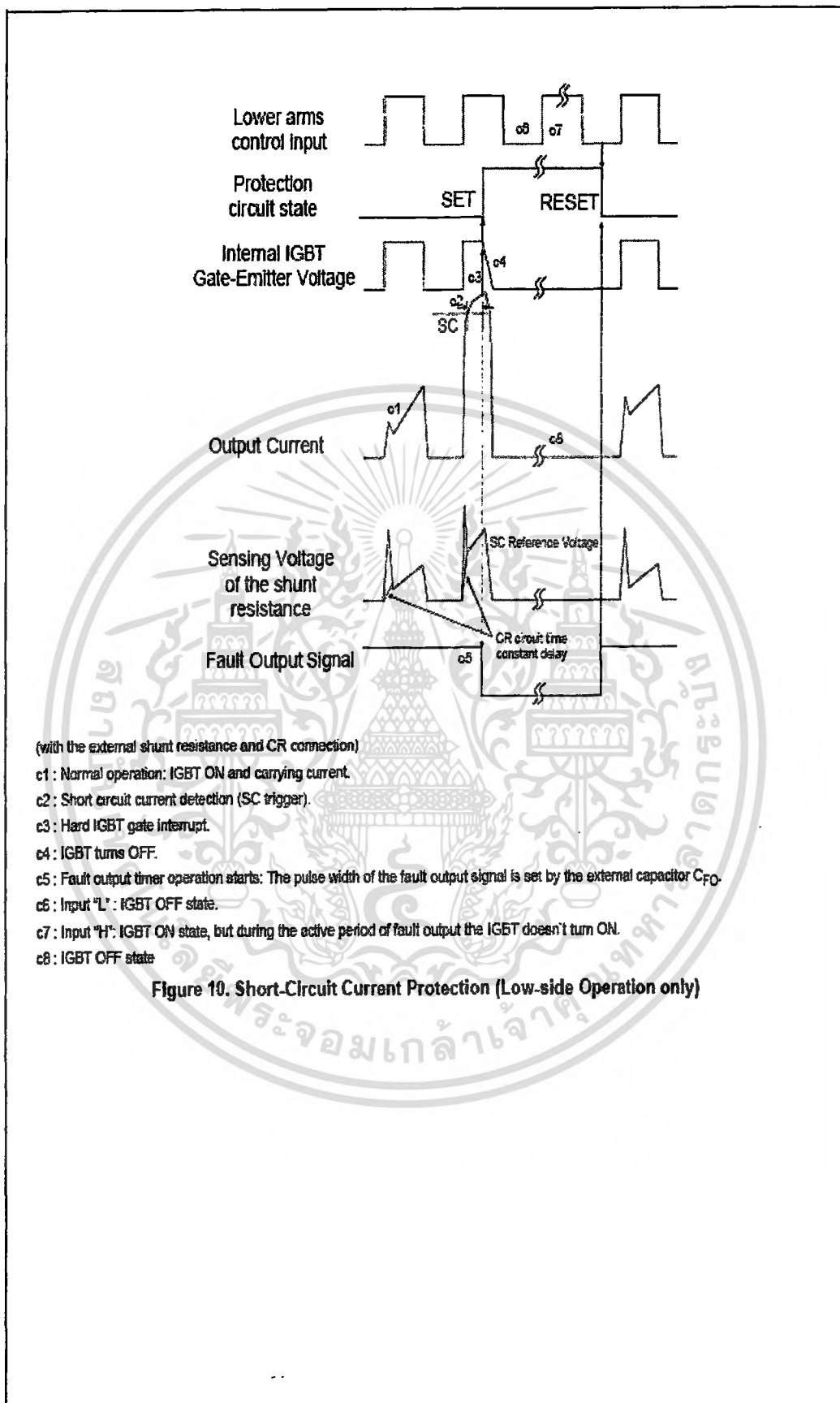
A : 1.778

B : 2.050

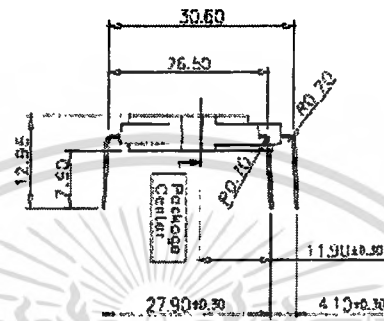
C : 2.531



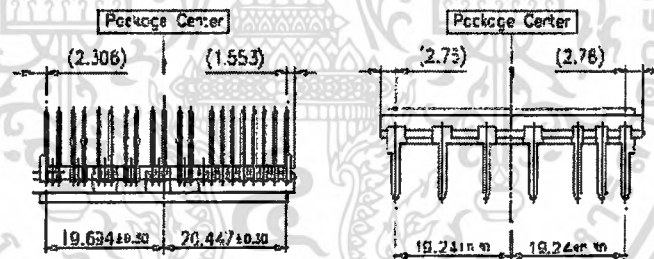
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Detailed Package Outline Drawings (continued)

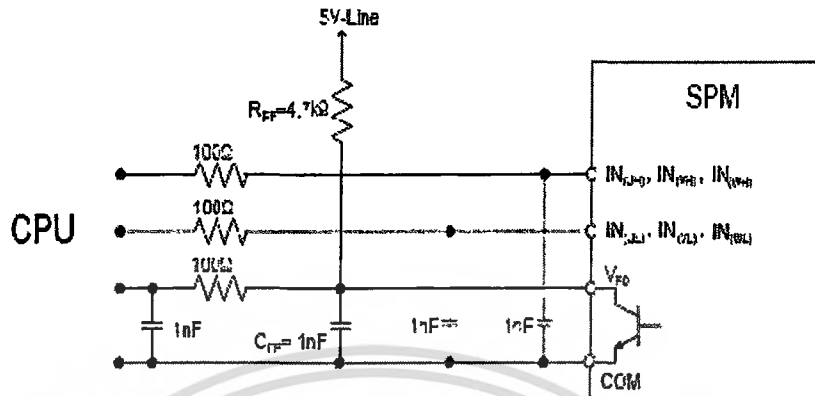


Lead Forming Dimension



PKG Center to Lead Distance

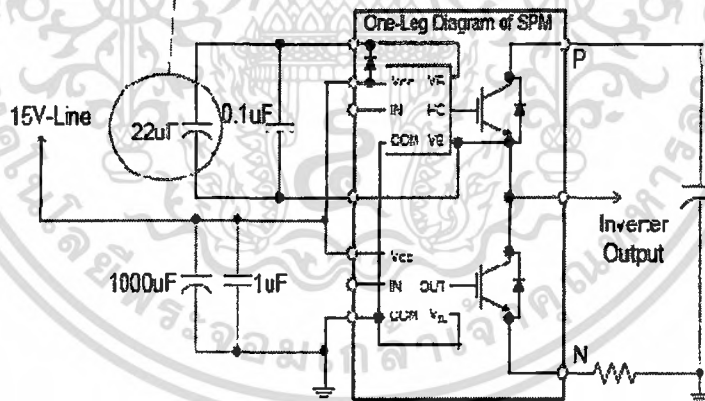
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- Notes:**
- 1: RC coupling at each input might change depending on the PWM control scheme used in the application and the wiring impedance of the application printed circuit board. The CPU input signal section integrate 6kΩ (typ.) pull down resistor. Therefore, when using an external filtering module, please pay attention to the digital voltage drop at input for input.
 - 2: The logic inputs compatible with standard CMOS or LSTTL outputs.

Figure 11. Recommended CPU I/O Interface Circuit

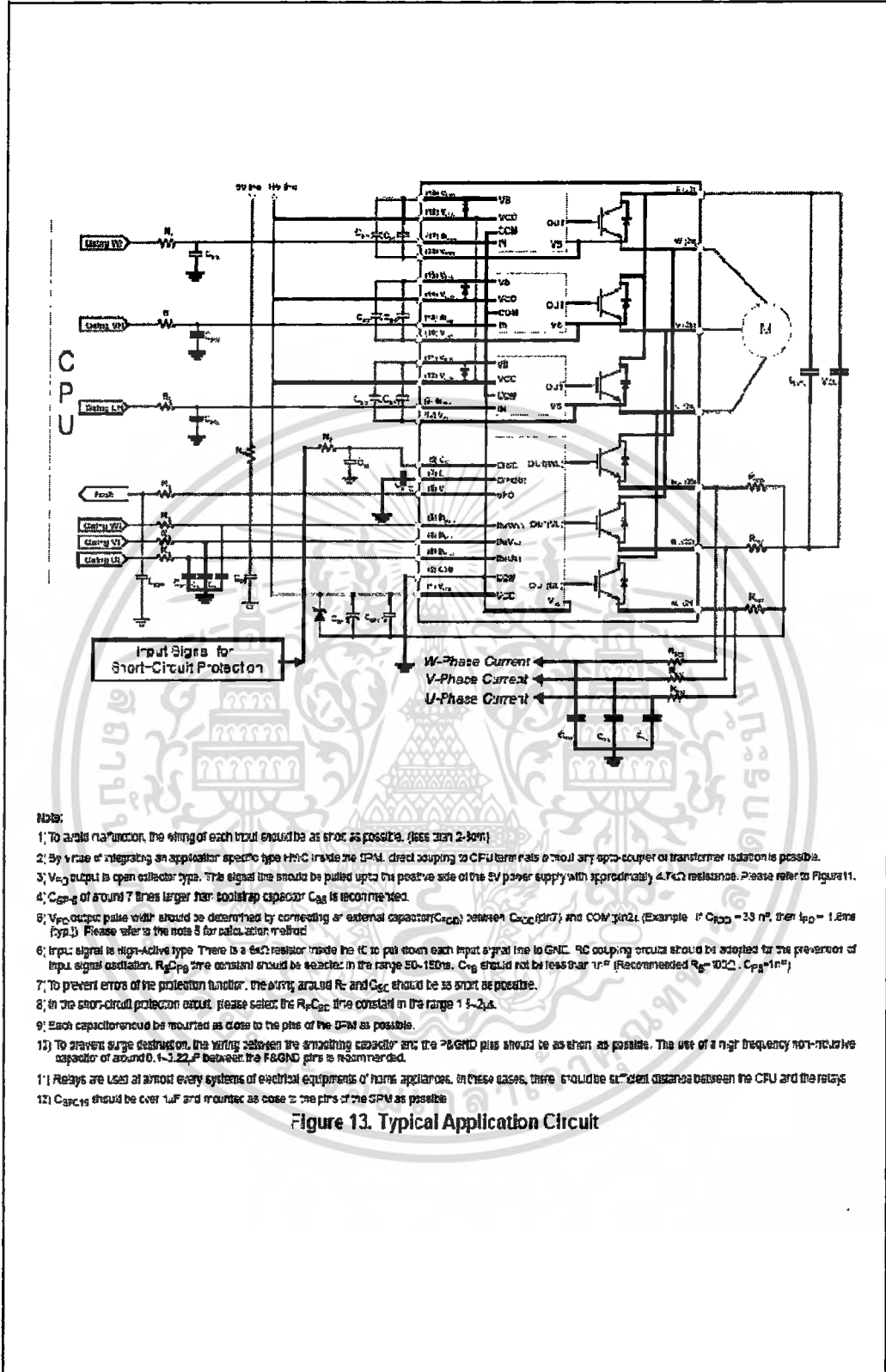
These Values depend on PWM Control Algorithm



- Notes:**
- 1: The ceramic capacitor placed between V_{CC}-COM should be over 1μF and mounted as close to the pins of the CPU as possible.

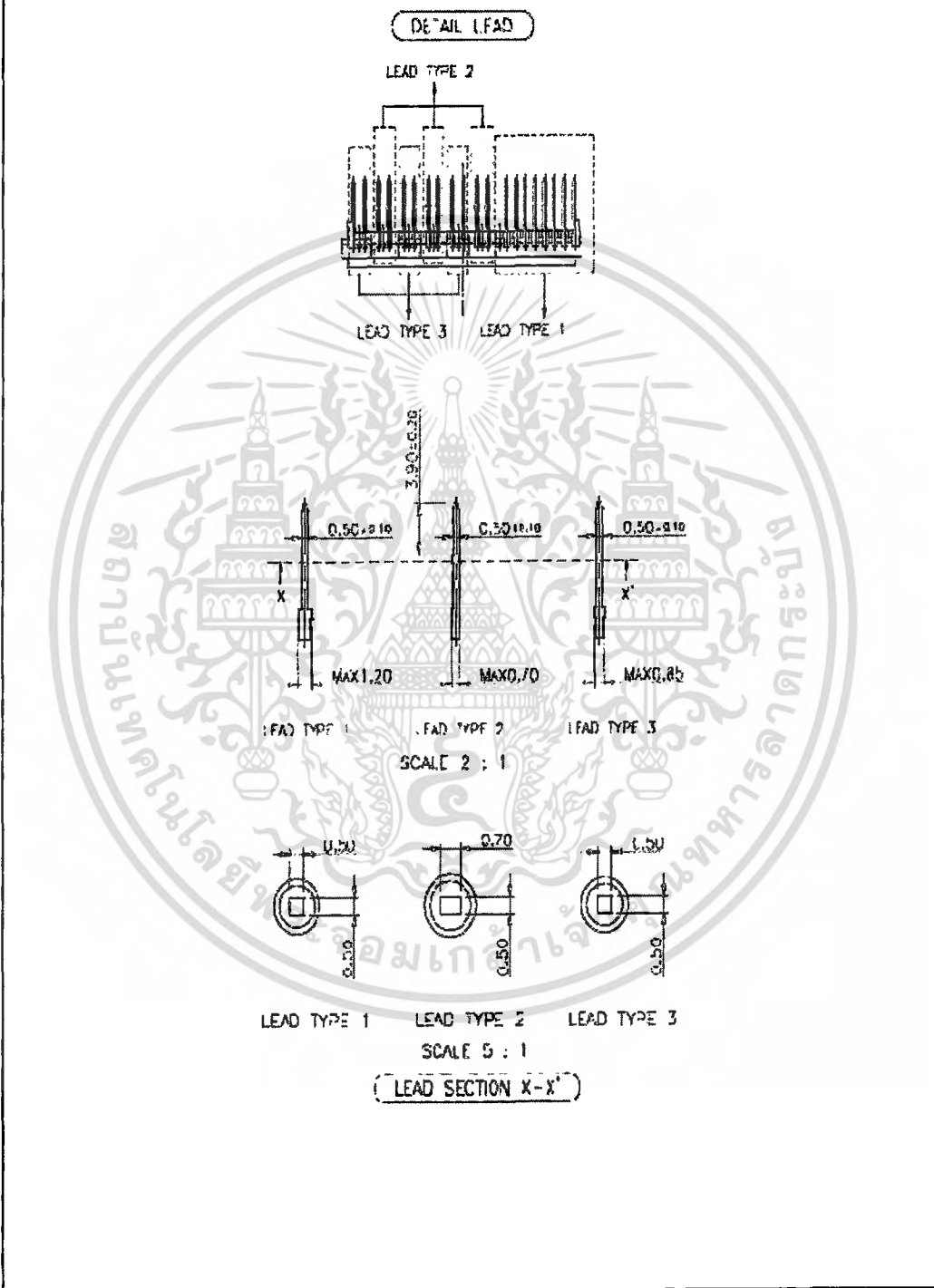
Figure 12. Recommended Bootstrap Operation Circuit and Parameters

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Detailed Package Outline Drawings (Continued)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TRADEMARKS

The following are registered and unregistered trademarks and service marks Fairchild Semiconductor owns or is authorized to use and is not intended to be an exhaustive list of all such trademarks.

ACEX [®]	Green FPS [™] e-Series [™]	POWEREDGE [®]	SuperSOT [™] -9
Build it Now [™]	GTO [™]	Power-SPM [™]	SymFET [™]
CorePLUS [™]	i-Lo [™]	PowerTrench [®]	The Power Franchise [®]
CROSSVOL [™]	IntelliMAX [™]	Programmable Active Droop [™]	
CTL [™]	ISOPLANAR [™]	QFET [®]	TinyBoost [™]
Current Transfer Logic [™]	MegaBuck [™]	QS [™]	TinyBuck [™]
EcoSPARK [®]	MICROCOUPLER [™]	QT Optoelectronics [™]	TinyLogic [®]
FACT Quiet Series [™]	MicroFET [™]	Quiet Series [™]	TINYOPTO [™]
FACT [®]	MicroPak [™]	RapidConfigure [™]	TinyPower [™]
FAST [®]	Motion-SPM [™]	SMART START [™]	TinyVVM [™]
FastvCore [™]	OPTOLOGIC [®]	SPM [®]	TinyWire [™]
FPS [™]	OPTOPLANAR [®]	STEALTH [™]	μSerDes [™]
FRFET [®]	PDP-SPM [™]	SuperFET [™]	UHC [®]
Global Power Resource [™]	Power220 [®]	SuperSOT [™] -3	UniFET [™]
Green FPS [™]	Power247 [®]	SuperSOT [™] -6	VCM [™]

DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION, OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS. THESE SPECIFICATIONS DO NOT EXPAND THE TERMS OF FAIRCHILD'S WORLDWIDE TERMS AND CONDITIONS, SPECIFICALLY THE WARRANTY THEREIN, WHICH COVERS THESE PRODUCTS.

LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION.

As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body or (b) support or sustain life, and (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury of the user.
2. A critical component in any component of a life support device, or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

PRODUCT STATUS DEFINITIONS

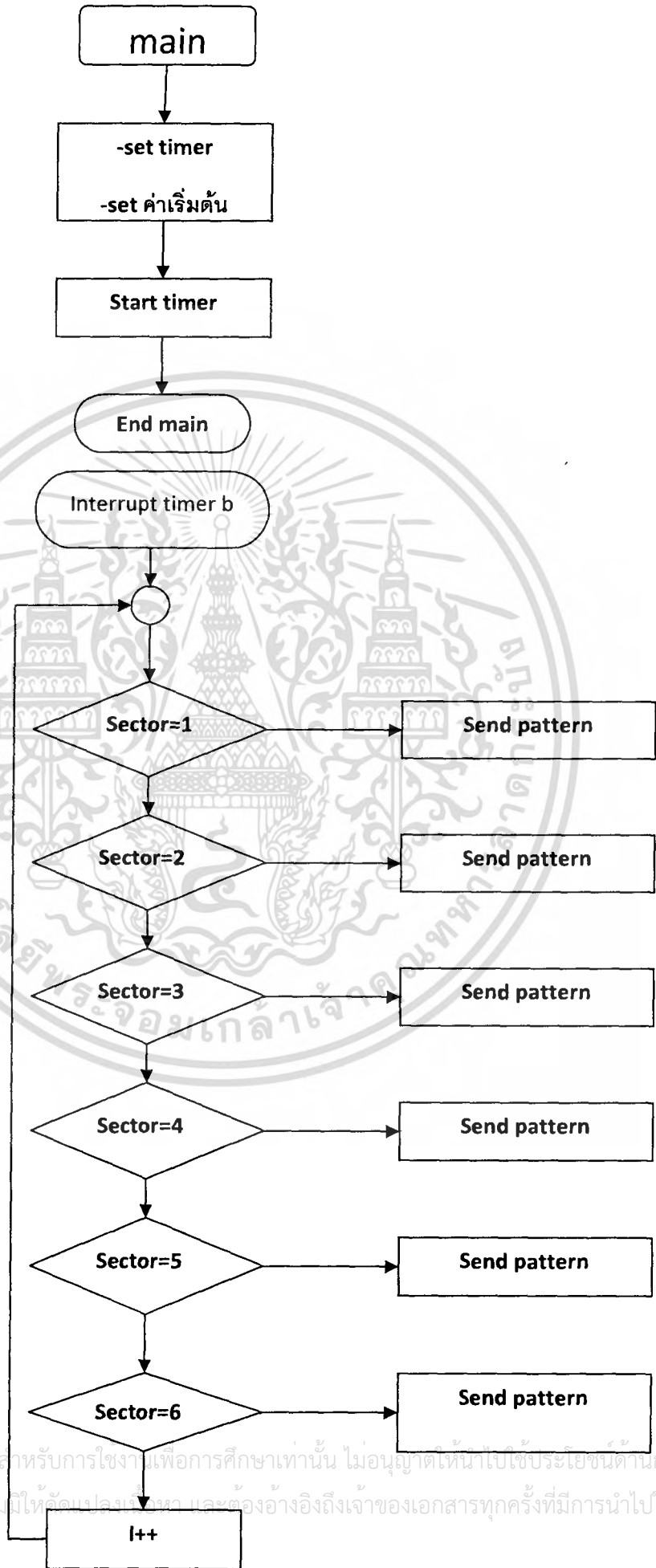
Definition of Terms

Datasheet Identification	Product Status	Definition
Advance Information	Formative or In Design	This datasheet contains the design specifications for product development. Specifications may change in any manner without notice.
Preliminary	First Production	This datasheet contains preliminary data; supplementary data will be published at a later date. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice to improve design.
No Identification Needed	Full Production	This datasheet contains final specifications. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice to improve design.
Obsolete	Not in Production	This datasheet contains specifications on a product that has been discontinued by Fairchild Semiconductor. The datasheet is printed for reference information only.

Rev. 129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FLOWCHART



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม SVM

```

/* FILE      :InductionMotor.c          */
/* DATE      :Wed, Feb 06, 2008        */
/* DESCRIPTION :main program file.     */
/* CPU GROUP  :62A(ROM128K)           */
/*
/*
/* This file is generated by Renesas Project Generator (Ver.4.5). */
/*
/*****
#include "InductionMotor.h"
void initial(void);
void tb2_int(void);
#pragma INTERRUPT/B      tb2_int
#pragma rom tb[400][3]
const int tb[400][3]=
{
{ 7 , 108 , 692 } ,
{ 1 , 100 , 686 } ,
{ 1 , 96 , 678 } ,
{ 1 , 88 , 674 } ,
{ 1 , 84 , 666 } ,
{ 1 , 76 , 660 } ,
{ 1 , 72 , 652 } ,
{ 1 , 68 , 644 } ,
{ 1 , 64 , 636 } ,
{ 1 , 56 , 630 } ,
{ 1 , 52 , 622 } ,
{ 1 , 48 , 614 } ,
{ 1 , 44 , 606 } ,
{ 1 , 40 , 598 } ,
{ 1 , 36 , 588 } ,

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

{	1	,	32	,	580	}	,
{	1	,	28	,	572	}	,
{	1	,	28	,	560	}	,
{	1	,	24	,	552	}	,
{	1	,	20	,	544	}	,
{	1	,	16	,	536	}	,
{	1	,	16	,	524	}	,
{	1	,	12	,	516	}	,
{	1	,	12	,	506	}	,
{	1	,	8	,	496	}	,
{	1	,	8	,	486	}	,
{	1	,	8	,	474	}	,
{	1	,	8	,	464	}	,
{	1	,	8	,	454	}	,
{	1	,	8	,	442	}	,
{	1	,	8	,	432	}	,
{	1	,	8	,	422	}	,
{	1	,	8	,	410	}	,
{	1	,	8	,	400	}	,
{	1	,	8	,	388	}	,
{	1	,	8	,	378	}	,
{	1	,	8	,	368	}	,
{	1	,	8	,	356	}	,
{	1	,	8	,	346	}	,
{	1	,	8	,	334	}	,
{	1	,	8	,	324	}	,
{	1	,	8	,	314	}	,
{	1	,	8	,	302	}	,
{	1	,	8	,	292	}	,
{	1	,	12	,	278	}	,
{	1	,	12	,	268	}	,
{	1	,	16	,	256	}	,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

{	1	,	20	,	244	}	,
{	1	,	20	,	232	}	,
{	1	,	24	,	220	}	,
{	1	,	28	,	208	}	,
{	1	,	32	,	194	}	,
{	1	,	36	,	182	}	,
{	1	,	36	,	172	}	,
{	1	,	40	,	160	}	,
{	1	,	44	,	148	}	,
{	1	,	52	,	134	}	,
{	1	,	56	,	122	}	,
{	1	,	60	,	108	}	,
{	1	,	64	,	96	}	,
{	1	,	68	,	84	}	,
{	1	,	76	,	72	}	,
{	1	,	80	,	58	}	,
{	1	,	84	,	48	}	,
{	1	,	92	,	34	}	,
{	1	,	96	,	22	}	,
{	1	,	104	,	8	}	,
{	2	,	104	,	6	}	,
{	2	,	100	,	16	}	,
{	2	,	92	,	30	}	,
{	2	,	88	,	42	}	,
{	2	,	80	,	56	}	,
{	2	,	76	,	68	}	,
{	2	,	72	,	80	}	,
{	2	,	64	,	94	}	,
{	2	,	60	,	106	}	,
{	2	,	56	,	118	}	,
{	2	,	52	,	130	}	,
{	2	,	48	,	142	}	,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

{	2	,	44	,	154	}	,
{	2	,	40	,	166	}	,
{	2	,	36	,	178	}	,
{	2	,	32	,	190	}	,
{	2	,	28	,	204	}	,
{	2	,	24	,	216	}	,
{	2	,	24	,	228	}	,
{	2	,	20	,	240	}	,
{	2	,	16	,	252	}	,
{	2	,	16	,	264	}	,
{	2	,	12	,	274	}	,
{	2	,	8	,	288	}	,
{	2	,	8	,	298	}	,
{	2	,	8	,	310	}	,
{	2	,	8	,	320	}	,
{	2	,	8	,	332	}	,
{	2	,	8	,	342	}	,
{	2	,	8	,	354	}	,
{	2	,	8	,	364	}	,
{	2	,	8	,	374	}	,
{	2	,	8	,	386	}	,
{	2	,	8	,	396	}	,
{	2	,	8	,	406	}	,
{	2	,	8	,	418	}	,
{	2	,	8	,	428	}	,
{	2	,	8	,	438	}	,
{	2	,	8	,	450	}	,
{	2	,	8	,	460	}	,
{	2	,	8	,	472	}	,
{	2	,	8	,	482	}	,
{	2	,	8	,	494	}	,
{	2	,	8	,	504	}	,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

{	2	,	12	,	514	}	,
{	2	,	16	,	520	}	,
{	2	,	16	,	532	}	,
{	2	,	20	,	540	}	,
{	2	,	24	,	548	}	,
{	2	,	24	,	560	}	,
{	2	,	28	,	568	}	,
{	2	,	32	,	578	}	,
{	2	,	36	,	586	}	,
{	2	,	40	,	594	}	,
{	2	,	44	,	602	}	,
{	2	,	48	,	610	}	,
{	2	,	52	,	618	}	,
{	2	,	56	,	626	}	,
{	2	,	60	,	634	}	,
{	2	,	64	,	642	}	,
{	2	,	72	,	648	}	,
{	2	,	76	,	656	}	,
{	2	,	80	,	664	}	,
{	2	,	88	,	670	}	,
{	2	,	92	,	678	}	,
{	2	,	100	,	684	}	,
{	2	,	104	,	690	}	,
{	3	,	104	,	688	}	,
{	3	,	96	,	682	}	,
{	3	,	92	,	674	}	,
{	3	,	84	,	668	}	,
{	3	,	80	,	662	}	,
{	3	,	76	,	652	}	,
{	3	,	68	,	648	}	,
{	3	,	64	,	640	}	,
{	3	,	60	,	632	}	,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

{	3	,	56	,	622	}	,
{	3	,	52	,	614	}	,
{	3	,	44	,	608	}	,
{	3	,	40	,	600	}	,
{	3	,	36	,	592	}	,
{	3	,	36	,	582	}	,
{	3	,	32	,	574	}	,
{	3	,	28	,	564	}	,
{	3	,	24	,	556	}	,
{	3	,	20	,	548	}	,
{	3	,	20	,	536	}	,
{	3	,	16	,	528	}	,
{	3	,	12	,	520	}	,
{	3	,	12	,	510	}	,
{	3	,	8	,	500	}	,
{	3	,	8	,	490	}	,
{	3	,	8	,	478	}	,
{	3	,	8	,	468	}	,
{	3	,	8	,	458	}	,
{	3	,	8	,	446	}	,
{	3	,	8	,	436	}	,
{	3	,	8	,	424	}	,
{	3	,	8	,	414	}	,
{	3	,	8	,	404	}	,
{	3	,	8	,	392	}	,
{	3	,	8	,	382	}	,
{	3	,	8	,	370	}	,
{	3	,	8	,	360	}	,
{	3	,	8	,	350	}	,
{	3	,	8	,	338	}	,
{	3	,	8	,	328	}	,
{	3	,	8	,	318	}	,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

{	3	,	8	,	306	}	,
{	3	,	8	,	296	}	,
{	3	,	12	,	282	}	,
{	3	,	12	,	272	}	,
{	3	,	16	,	260	}	,
{	3	,	16	,	248	}	,
{	3	,	20	,	236	}	,
{	3	,	24	,	224	}	,
{	3	,	28	,	212	}	,
{	3	,	28	,	200	}	,
{	3	,	32	,	188	}	,
{	3	,	36	,	176	}	,
{	3	,	40	,	162	}	,
{	3	,	44	,	150	}	,
{	3	,	48	,	138	}	,
{	3	,	52	,	126	}	,
{	3	,	56	,	114	}	,
{	3	,	64	,	100	}	,
{	3	,	68	,	88	}	,
{	3	,	72	,	76	}	,
{	3	,	76	,	64	}	,
{	3	,	84	,	50	}	,
{	3	,	88	,	38	}	,
{	3	,	96	,	26	}	,
{	3	,	100	,	14	}	,
{	8	,	108	,	692	}	,
{	4	,	100	,	14	}	,
{	4	,	96	,	26	}	,
{	4	,	88	,	38	}	,
{	4	,	84	,	50	}	,
{	4	,	76	,	64	}	,
{	4	,	72	,	76	}	,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

{	4	,	68	,	88	}	,
{	4	,	64	,	100	}	,
{	4	,	56	,	114	}	,
{	4	,	52	,	126	}	,
{	4	,	48	,	138	}	,
{	4	,	44	,	150	}	,
{	4	,	40	,	162	}	,
{	4	,	36	,	176	}	,
{	4	,	32	,	188	}	,
{	4	,	28	,	200	}	,
{	4	,	28	,	212	}	,
{	4	,	24	,	224	}	,
{	4	,	20	,	236	}	,
{	4	,	16	,	248	}	,
{	4	,	16	,	260	}	,
{	4	,	12	,	272	}	,
{	4	,	12	,	282	}	,
{	4	,	8	,	296	}	,
{	4	,	8	,	306	}	,
{	4	,	8	,	318	}	,
{	4	,	8	,	328	}	,
{	4	,	8	,	338	}	,
{	4	,	8	,	350	}	,
{	4	,	8	,	360	}	,
{	4	,	8	,	370	}	,
{	4	,	8	,	382	}	,
{	4	,	8	,	392	}	,
{	4	,	8	,	404	}	,
{	4	,	8	,	414	}	,
{	4	,	8	,	424	}	,
{	4	,	8	,	436	}	,
{	4	,	8	,	446	}	,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

{	4	,	8	,	458	}	,
{	4	,	8	,	468	}	,
{	4	,	8	,	478	}	,
{	4	,	8	,	490	}	,
{	4	,	8	,	500	}	,
{	4	,	12	,	510	}	,
{	4	,	12	,	520	}	,
{	4	,	16	,	528	}	,
{	4	,	20	,	536	}	,
{	4	,	20	,	548	}	,
{	4	,	24	,	556	}	,
{	4	,	28	,	564	}	,
{	4	,	32	,	574	}	,
{	4	,	36	,	582	}	,
{	4	,	36	,	592	}	,
{	4	,	40	,	600	}	,
{	4	,	44	,	608	}	,
{	4	,	52	,	614	}	,
{	4	,	56	,	622	}	,
{	4	,	60	,	632	}	,
{	4	,	64	,	640	}	,
{	4	,	68	,	648	}	,
{	4	,	76	,	652	}	,
{	4	,	80	,	662	}	,
{	4	,	84	,	668	}	,
{	4	,	92	,	674	}	,
{	4	,	96	,	682	}	,
{	4	,	104	,	688	}	,
{	5	,	104	,	690	}	,
{	5	,	100	,	684	}	,
{	5	,	92	,	678	}	,
{	5	,	88	,	670	}	,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

{	5	,	80	,	664	}	,
{	5	,	76	,	656	}	,
{	5	,	72	,	648	}	,
{	5	,	64	,	642	}	,
{	5	,	60	,	634	}	,
{	5	,	56	,	626	}	,
{	5	,	52	,	618	}	,
{	5	,	48	,	610	}	,
{	5	,	44	,	602	}	,
{	5	,	40	,	594	}	,
{	5	,	36	,	586	}	,
{	5	,	32	,	578	}	,
{	5	,	28	,	568	}	,
{	5	,	24	,	560	}	,
{	5	,	24	,	548	}	,
{	5	,	20	,	540	}	,
{	5	,	16	,	532	}	,
{	5	,	16	,	520	}	,
{	5	,	12	,	514	}	,
{	5	,	8	,	504	}	,
{	5	,	8	,	494	}	,
{	5	,	8	,	482	}	,
{	5	,	8	,	472	}	,
{	5	,	8	,	460	}	,
{	5	,	8	,	450	}	,
{	5	,	8	,	438	}	,
{	5	,	8	,	428	}	,
{	5	,	8	,	418	}	,
{	5	,	8	,	406	}	,
{	5	,	8	,	396	}	,
{	5	,	8	,	386	}	,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

{	5	,	8	,	364	}	,
{	5	,	8	,	354	}	,
{	5	,	8	,	342	}	,
{	5	,	8	,	332	}	,
{	5	,	8	,	320	}	,
{	5	,	8	,	310	}	,
{	5	,	8	,	298	}	,
{	5	,	8	,	288	}	,
{	5	,	12	,	274	}	,
{	5	,	16	,	264	}	,
{	5	,	16	,	252	}	,
{	5	,	20	,	240	}	,
{	5	,	24	,	228	}	,
{	5	,	24	,	216	}	,
{	5	,	28	,	204	}	,
{	5	,	32	,	190	}	,
{	5	,	36	,	178	}	,
{	5	,	40	,	166	}	,
{	5	,	44	,	154	}	,
{	5	,	48	,	142	}	,
{	5	,	52	,	130	}	,
{	5	,	56	,	118	}	,
{	5	,	60	,	106	}	,
{	5	,	64	,	94	}	,
{	5	,	72	,	80	}	,
{	5	,	76	,	68	}	,
{	5	,	80	,	56	}	,
{	5	,	88	,	42	}	,
{	5	,	92	,	30	}	,
{	5	,	100	,	16	}	,
{	5	,	104	,	6	}	,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

{	6	,	96	,	22	}	,
{	6	,	92	,	34	}	,
{	6	,	84	,	48	}	,
{	6	,	80	,	58	}	,
{	6	,	76	,	72	}	,
{	6	,	68	,	84	}	,
{	6	,	64	,	96	}	,
{	6	,	60	,	108	}	,
{	6	,	56	,	122	}	,
{	6	,	52	,	134	}	,
{	6	,	44	,	148	}	,
{	6	,	40	,	160	}	,
{	6	,	36	,	172	}	,
{	6	,	36	,	182	}	,
{	6	,	32	,	194	}	,
{	6	,	28	,	208	}	,
{	6	,	24	,	220	}	,
{	6	,	20	,	232	}	,
{	6	,	20	,	244	}	,
{	6	,	16	,	256	}	,
{	6	,	12	,	268	}	,
{	6	,	12	,	278	}	,
{	6	,	8	,	292	}	,
{	6	,	8	,	302	}	,
{	6	,	8	,	314	}	,
{	6	,	8	,	324	}	,
{	6	,	8	,	334	}	,
{	6	,	8	,	346	}	,
{	6	,	8	,	356	}	,
{	6	,	8	,	368	}	,
{	6	,	8	,	378	}	,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

{	6	,	8	,	400	}	,
{	6	,	8	,	410	}	,
{	6	,	8	,	422	}	,
{	6	,	8	,	432	}	,
{	6	,	8	,	442	}	,
{	6	,	8	,	454	}	,
{	6	,	8	,	464	}	,
{	6	,	8	,	474	}	,
{	6	,	8	,	486	}	,
{	6	,	8	,	496	}	,
{	6	,	12	,	506	}	,
{	6	,	12	,	516	}	,
{	6	,	16	,	524	}	,
{	6	,	16	,	536	}	,
{	6	,	20	,	544	}	,
{	6	,	24	,	552	}	,
{	6	,	28	,	560	}	,
{	6	,	28	,	572	}	,
{	6	,	32	,	580	}	,
{	6	,	36	,	588	}	,
{	6	,	40	,	598	}	,
{	6	,	44	,	606	}	,
{	6	,	48	,	614	}	,
{	6	,	52	,	622	}	,
{	6	,	56	,	630	}	,
{	6	,	64	,	636	}	,
{	6	,	68	,	644	}	,
{	6	,	72	,	652	}	,
{	6	,	76	,	660	}	,
{	6	,	84	,	666	}	,
{	6	,	88	,	674	}	,
{	6	,	96	,	678	}	,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{ 6 , 100 , 686 } ,
};

int i;

void main(void)
{
    initial();
}

void initial(void)
{
    i = 0;
    pd7 = 0x83; /* Set p71 - p76 input ports */
    pd8 = 0xe0; /* Set p80, p81 input ports */
    invc0 = 0x5c; /* Triangular */
    invc1 = 0x04; /* Triangular */
    dtt = 16; /* Dead time 2 us*/
    ictb2 = 1; /* Interrupt occurrence frequency */
    idb0 = 0x2a; /* Pettern */
    idb1 = 0x15;
    ta1mr = 0x12; /* One-shot timer mode, count source f1 */
    ta2mr = 0x12; /* One-shot timer mode, count source f1 */
    ta4mr = 0x12; /* One-shot timer mode, count source f1 */
    trgsr = 0x45;
    asm(" fclr i");
    tb2ic = 6;
    tb2mr = 0x00; /* Timer mode, count source f1 */
    asm(" fset i");

    tb2 = carrier_2; /* fsw = 20 kHz */
    ta4 = tb[0][1]; /* U phase */
    ta1 = 0; /* V phase */
    ta2 = 0; /* W phase */

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    tabsr    =    0x96;                /* Count start flag */
}

void tb2_int(void)
{
    idb0    =    0x2a;                /* Pettern */
    idb1    =    0x15;
    i++;
    if(i >= 400)
    {
        i    =    0;
    }
    if(tb[i][0] == 1)
    {
        ta4    =    tb[i][1];
        ta1    =    tb[i][1] + tb[i][2];
        ta2    =    0;
    }
    else if(tb[i][0] == 2)
    {
        ta4    =    tb[i][1] + tb[i][2];
        ta1    =    tb[i][1];
        ta2    =    0;
    }
    else if(tb[i][0] == 3)
    {
        ta4    =    0;
        ta1    =    tb[i][1];
        ta2    =    tb[i][1] + tb[i][2];
    }
    else if(tb[i][0] == 4)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        ta4         =      0;
        ta1         =      tb[i][1] + tb[i][2];
        ta2         =      tb[i][1];
    }
else if(tb[i][0] == 5)
{
        ta4         =      tb[i][1] + tb[i][2];
        ta1         =      0;
        ta2         =      tb[i][1];
}
else if(tb[i][0] == 6)
{
        ta4         =      tb[i][1];
        ta1         =      0;
        ta2         =      tb[i][1] + tb[i][2];
}
else if(tb[i][0] == 7)
{
        ta4         =      tb[i][1];
        ta1         =      0;
        ta2         =      0;
}
else
{
        ta4         =      0;
        ta1         =      tb[i][1];
        ta2         =      tb[i][1];
}
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้