สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ แบบเธตฮาร์โมนิคส์อินเจคชั่น ด้วยตัวประมวลผลเชิงเลข

DESIGN OF DSP-BASED THIRD-HARMONIC INJECTION CONTROL FOR INDUCTION MOTORS

T070924

ชัยวัฒน์ ศรีเพชร

CHAIWAT SRIPET

วพ.
ช432ก
2550

เลขหมู่.........................
เลขทะเบียน 70924
วัน,เดือน,ปี 22 ส.ค. 2550

.b 11590130
.i............................

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF DSP-BASED CONTROL FOR INDUCTION MOTORS

CHAIWAT SRIPET

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRONIC ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ ด้วยตัวประมวลผลเชิงเลข
นักศึกษา	นาย ชัยวัฒน์ ศรีเพชร
รหัสนักศึกษา	46060902
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.พลผดุง ผดุงกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอรูปแบบการสร้าง พี ดับบลิว เอ็ม แบบเธิดฮาร์มอนิกส์ อินเจ็คชั่น (Third-Harmonic Injection PWM) สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบแหล่งแรงดัน (voltage source inverter ,VSI) ในงานควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้การควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่คงที่ (Constant V/Hz) ซึ่งนิยมใช้วิธีการมอดูเลตแบบ ไซน์ พี ดับบลิว เอ็ม (SINE PWM) ทำให้ขนาดของแรงดันเฟสต่อเฟสสูงสุดถูกจำกัดที่ 86.6% ของแรงดันไฟตรง ด้วยเทคนิคนี้ทำให้สามารถเพิ่มขนาดของความถี่หลักมูล (Fundamental) สูงสุดเท่ากับแรงดันไฟตรงหรือเพิ่มขึ้น 15.4% จากวิธีการไซน์ พี ดับบลิว เอ็ม แบบเดิม โดยที่ไม่สร้างฮาร์มอนิกส์ต่ำ ระบบต้นแบบควบคุมการทำงานและสร้างสัญญาณ พี ดับบลิว เอ็ม ด้วยตัวประมวลผลเชิงเลข (DSP) ของบริษัท Microchip Technology เบอร์ dsPIC30F2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Design of DSP-Based Control for Induction Motors
Student	Mr. Chaiwat sripet
Student ID.	46060902
Degree	Master of Engineering
Program	Electronic Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Assist. Prof polphadung phadungkul

ABSTRACT

This thesis presents the switching method for generating the third-harmonic injection PWM (pulse width modulation) signal which is applicable for the three-phase VSI (voltage source inverter). The conventional method based on the constant V/Hz concept made use of the sine PWM. This caused the limitation in the amplitude of phase-to-phase voltage at 86.6% to the DC level. By using the proposed method, the limitation was eradicated. The amplitude of phase-to-phase voltage can be increased up to the DC level, another word was that the 15.4% better compared to the convention method. In addition, the lower harmonics were not generated. To enhance the system, the dsPIC30F2010 was used to generate the controlling PWM signal..

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยคำแนะนำ และการให้คำปรึกษาจาก ผศ.พลผดุง ผดุงกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ใน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ให้คำแนะนำและสนับสนุนเครื่องมือในการทดสอบ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ชัยวัฒน์ ศรีเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..II
กิตติกรรมประกาศ..III
สารบัญ...IV
สารบัญตาราง...VI
สารบัญรูป..VII
บทที่ 1 บทนำ...1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.......................................1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา..............................1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา...2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.......................................2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.......3
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์..3

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง...4
2.1 ชนิดของอินเวอร์เตอร์...4
2.2 การการมอดูเลตความกว้างพัลส์..5
2.3 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส...7
2.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส..14
2.5 ตัวเข้ารหัสความเร็วรอบ..24

บทที่ 3 หลักการทำงานและการออกแบบ...26
3.1 ระบบควบคุมมอเตอร์ 3 เฟส...26
3.2 วงจรส่วนติดต่อกับผู้ใช้...27
3.3 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส..28
3.4 วงจรรับส่งข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรม..29
3.5 วงจรป้อนกลับ...30

บทที่ 4 การพัฒนาโปรแกรม..33
4.1 ลำดับขั้นการทำงานของโปรแกรมส่วนติดต่อกับผู้ใช้.......................33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น สิ่งทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

4.2 ลำดับขั้นของโปรแกรมสร้างสัญญาณ PWM.....34

4.3 เทคนิคการสร้างสัญญาณ PWM 35

4.4 การออกแบบโปรแกรมส่วนการป้อนกลับสัญญาณ (feedback).....40

บทที่ 5 ผลการทดลอง.....41

5.1 สัญญาณทางเวลาและสัญญาณทางความถี่ภายในอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส.....41

5.2 ผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์กับการจ่ายโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้าที่มีภาระทางกล.....58

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....72

บรรณานุกรม.....74

ภาคผนวก.....75

ภาคผนวก ก. วงจรรวมที่ใช้ในระบบควบคุมมอเตอร์.....76

ภาคผนวก ข. โปรแกรมที่ใช้ในระบบควบคุมมอเตอร์.....79

ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....95

ประวัติผู้เขียน.....100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 อัตราส่วนระหว่างค่า RMS ของฮาร์มอนิกส์กับ V_S ของแรงดันสาย ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส.....9
2.2 แสดงผลรวมของการมอดูเลตประเภทต่างๆสำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟส ที่ $M = 1$.........13
4.1 ตัวอย่างขนาดของตัวแปรที่ $x_1 - x_{10}$.....36
4.2 ตัวอย่างค่าขนาดของสัดส่วนความกว้างพัลส์ $x_{p(1-10)}$.....37
5.1 ผลการทดสอบโดยใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าปกติเมื่อมอเตอร์มีภาระโหลดทางกล..........62
5.2 ผลการทดสอบโดยใช้ PWM แบบ Third-Harmonic Injection ด้วยมอเตอร์ที่ไม่มีภาระทางกล.....62
5.3 ผลการทดสอบโดยใช้ PWM แบบ Third-Harmonic Injection ด้วยมอเตอร์ที่มีภาระทางกล 50% ของพิกัด.....63
5.4 ผลการทดสอบโดยใช้ PWM แบบ Third-Harmonic Injection ด้วยมอเตอร์ที่มีภาระทางกล 100% ของพิกัด.....64
5.5 ผลการทดสอบโดยใช้ PWM แบบ SINE ด้วยมอเตอร์ที่ไม่มีภาระทางกล.....65
5.6 ผลการทดสอบโดยใช้ PWM แบบ SINE ด้วยมอเตอร์ที่มีภาระทางกล 50% ของพิกัด........66
5.7 ผลการทดสอบโดยใช้ PWM แบบ SINE ด้วยมอเตอร์ที่มีภาระทางกล 100% ของพิกัด......67

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 การใช้เทคนิค PWM กับวงจรทอนระดับ....6
2.2 วงจรและรูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ PWM....8
2.3 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แสดงช่วงพลังงานไม่ไหลสู่โหลด....10
2.4 แรงดันเฟสและแรงดันไลน์จากการมอดูเลตแบบ SINE PWM....11
2.5 เทคนิค Third-Harmonic Injection....12
2.6 แรงดันเฟสและแรงดันไลน์จากการมอดูเลตแบบ Third-Harmonic Injection PWM....13
2.7 ลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส....14
2.8 ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) ของมอเตอร์....15
2.9 ตัวหมุนแบบกรงกระรอก....15
2.10 ตัวหมุนที่มีขดลวดพันอยู่รอบๆ (Wound Rotor)....16
2.11 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ....17
2.12 แสดงการจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส....18
2.13 รูปคลื่นไซน์ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นโดยกระแสไฟฟ้า 3 เฟส....18
2.14 แสดงการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้ว....19
2.15 บล็อกไดอะแกรมการส่งผ่านกำลังงานของมอเตอร์สามเฟส....21
2.16 ลักษณะทางโครงสร้างของ Encoder แบบควอดราเจอร์ (QEI)....25
3.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมมอเตอร์ 3 เฟส....26
3.2 ส่วนประกอบของระบบควบคุม....27
3.3 วงจรส่วนติดต่อกับผู้ใช้....27
3.4 วงจรส่วนของตัว DSP....28
3.5 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ VSI ใช้ IGBT สำหรับควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ....28
3.6 วงจรแยกโดดสำหรับขับเกตของ IGBT....29
3.7 วงจรรับส่งข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรม....29
3.8 วงจรตรวจจับกระแสเฟสที่จ่ายให้มอเตอร์....30
3.9 วงจรตรวจจับระดับแรงดันไฟตรง....30
3.10 วงจรตรวจจับการช็อตกิ่งของ IGBT....31
3.11 วงจรตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์....32
3.12 บอร์ดต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ....32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างองถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.1 Flowchart สำหรับโปรแกรมส่วนติดต่อใช้....................................33
4.2 Flowchart สำหรับส่วนสร้าง Third-Harmonic Injection PWM....................34
4.3 โครงสร้างของส่วนอุปกรณ์สวิตช์....................................35
4.4 ขนาดของแรงดันไลน์เทียบกับความถี่หลักมูล....................................35
4.5 การเก็บค่าขนาดของฟังก์ชั่นไซน์ไว้ในตัวแปร....................................36
4.6 การสร้างสัญญาณ PWM แบบปรับสัญญาณกึ่งกลาง....................................38
4.7 การมอดูเลตแบบ Third-Harmonic Injection 38
4.8 สัญญาณ PWM ขับเกตที่มี delay time....................................39
5.1 บอร์ดที่ใช้ในการพัฒนาและมอเตอร์ 3 เฟส 1 แรงม้า....................................41
5.2 สัญญาณ PWM ความถี่ 10 kHz ที่ขาของ DSP (Active Low) โดย Ch1 เป็นเฟส U กิ่งล่าง Ch2 เป็นเฟส U กิ่งบน....................................42
5.3 สัญญาณ PWM ที่ขาของ DSP (Active Low) โดย Ch1 เป็นเฟส U กิ่งล่าง Ch2 เป็นเฟส V กิ่งล่าง....................................43
5.4 สัญญาณ PWM ที่ขาของ DSP (Active Low) โดย Ch1 เป็นเฟส U กิ่งล่าง Ch2 เป็นเฟส U กิ่งบนซึ่งกำหนดเวลาหยุดพัก (dead time) ไว้ที่ 3 uS....................................43
5.5 สัญญาณ PWM ที่ขาของ DSP (Active Low) โดย Ch1 เป็นเฟส U กิ่งบน Ch2 เป็นเฟส V กิ่งบน....................................44
5.6 สัญญาณ PWM เฟส U กิ่งล่าง Ch1 ที่ขาของ DSP (Active Low) Ch2 ที่ขา Gate ของ IGBT (Active High)....................................44
5.7 สัญญาณ PWM ที่ขาของ Gate ของ IGBT (Active High) โดย Ch1 เป็นเฟส U กิ่งล่าง Ch2 เป็นเฟส V กิ่งล่าง....................................45
5.8 สัญญาณ PWM ในมุมกว้างที่ขาของ Gate ของ IGBT (Active High) โดย Ch1 เป็นเฟส กิ่งล่าง Ch2 เป็นเฟส V กิ่งล่าง....................................45
5.9 สัญญาณ PWM เฟส U กิ่งล่าง (Active Low) Ch1 ที่ขาของ DSP Ch2 ที่ขา Collector ของ IGBT....................................46
5.10 สัญญาณ PWM ที่ขา Collector ของ IGBT (Active Low) โดย Ch1 เป็นเฟส U กิ่งล่าง Ch2 เป็นเฟส V กิ่งล่าง....................................46
5.11 สัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจจับความเร็วรอบที่ให้เอาต์พุต 9 พัลส์ต่อการหมุน 1 รอบ ด้วยความเร็วในการหมุน 1500 รอบต่อนาที....................................47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.12 สัญญาณ PWM เฟสต่อเฟสหรือแรงดันไลน์ ที่ความถี่หลักมูล 50 Hz Ch1เป็นการเปรียบเทียบระหว่างเฟส U กับ เฟส V Ch M เป็นการเปรียบเทียบระหว่างเฟส V กับ เฟส W.....47

5.13 สัญญาณ เฟสต่อเฟสหรือแรงดันไลน์ขนาด 600 V_{peak} ที่ความถี่หลักมูล 50 Hz Ch1 เป็น Unipolar PWM Ch2 เมื่อนำสัญญาณใน Ch1 ผ่านวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ(LPF)......48

5.14 Ch1 สัญญาณแรงดันเฟสต่อเฟสหรือแรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 50 Hz เป็น Unipolar PWM Ch2 เป็นกระแสเฟสเมื่ออินเวอร์เตอร์มีภาระโหลด อัตราส่วน 100mV/A............48

5.15 Ch1 เป็นความถี่หลักมูลของ Unipolar PWM (V_{UV}) หลังผ่าน LPF Ch2 เป็นกระแสเฟส อัตราส่วน 100 mV/A..49

5.16 สัญญาณ output phase U 600 Vpeak ที่ความถี่หลักมูล 50 Hz Ch1 เป็นความถี่หลักมูลของ bipolar PWM หลังผ่าน LPF Ch2 เป็นกระแสเฟสอัตราส่วน 100 mV/A...................49

5.37 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 59 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW..................................50

5.37 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 55 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW..................................50

5.37 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 50 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW..................................51

5.37 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 45 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW..................................51

5.37 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 40 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW..................................52

5.37 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 35 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW..................................52

5.37 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 30 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW..................................53

5.37 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 25 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW..................................53

5.37 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 20 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW..................................54

5.37 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 15 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW..................................54

5.37 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 10 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW..................................55

5.37 สัญญาณรบกวนที่ current probe ขณะที่ไม่ได้วัดสัญญาณ..55

5.37 ความถี่หลักมูลของ Ch1,2 แรงดันเฟส Ch3 แรงดันไลน์ที่ได้จากการเปรียบเทียบแรงดันเฟส..56

5.37 แรงดันเฟสในเชิงความถี่ ซึ่งมีฮาร์มอนิกส์ที่ 3 อยู่ด้วย..56

5.37 แรงดันไลน์ในเชิงความถี่..57

5.37 สัญญาณความถี่หลักมูลในขณะเปลี่ยนความถี่ ด้วยเทคนิคทาง Software และการประมวลผลของ DSP ทำให้การเปลี่ยนความถี่ทำได้อย่างต่อเนื่อง..................................57

5.37 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบอินเวอร์เตอร์กับการจ่ายโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่มีภาระทางกล...59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.34 Digital Power Meter 3 Phase ยี่ห้อ YOKOKAWA รุ่น WT1030 ที่ใช้บันทึกผล............59

5.35 Siemens Measurement and Analyzing Unit (วัดทอร์ค, วัดความเร็วรอบ, วัดกำลังที่จ่ายโหลด จากการทำงานของมอเตอร์)..60

5.36 การต่อ Motor เข้ากับ Generator ผ่าน Coupling..60

5.37 Block Diagram การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ..............61

5.38 กราฟเปรียบเทียบการจ่ายภาระโหลดทางกลของมอเตอร์เมื่ออินพุตของมอเตอร์มาจากระบบไฟฟ้าปกติและจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิค Third-Harmonic Injection PWM , SINE PWM..68

5.39 กราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิค Third-Harmonic Injection กับ SINE PWM เมื่อเปลี่ยนความถี่หลักมูลในขณะที่มอเตอร์ไม่มีภาระทางกล..............69

5.40 กราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิค Third-Harmonic Injection กับ SINE PWM เมื่อเปลี่ยนความถี่หลักมูลในขณะที่มอเตอร์มีภาระทางกล 50% ของพิกัด..70

5.41 กราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิค Third-Harmonic Injection กับ SINE PWM เมื่อเปลี่ยนความถี่หลักมูลในขณะที่มอเตอร์มีภาระทางกล 100% ของพิกัด..70

5.42 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิค Third-Harmonic Injection เมื่อเปลี่ยนความถี่หลักมูลในขณะที่มอเตอร์มีภาระทางกลระดับต่างๆ........................71

5.43 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ใช้เทคนิค Third-Harmonic Injection เมื่อเปลี่ยนความถี่หลักมูลในขณะที่มอเตอร์มีภาระทางกลระดับต่างๆ........................71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นไปอย่างแพร่หลายในระบบอุตสาหกรรม เช่น ระบบลำเลียงในกระบวนการผลิต ระบบปั๊มน้ำ จนถึงพัดลมระบายอากาศ เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำมีราคาที่ไม่สูง รวมทั้งการบำรุงรักษาที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำอย่างง่ายที่สุดคือการต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้าโดยตรง แต่วิธีนี้ทำให้ระบบจะต้องจ่ายกระแสที่สูงให้กับมอเตอร์ในขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุนแต่กลับได้แรงบิดที่ต่ำ หรือวิธีการเริ่มหมุนด้วยการต่อแบบ Star-Delta Star ซึ่งสามารถลดกระแสจากแหล่งจ่ายได้ แต่วิธีนี้ใช้ได้กับมอเตอร์ที่ขับภาระเต็มด้วยการต่อแบบ Delta เท่านั้น ส่วนการปรับความเร็วรอบของโหลดนั้นค่อนข้างยาก โดยอาจจำเป็นต้องใช้ระบบเกียร์เข้ามาเสริมกับตัวมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งทำให้ต้นทุนของระบบสูงขึ้น ดังนั้นการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำร่วมกับอินเวอร์เตอร์จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม ทั้งลดกระแสที่ระบบต้องจ่ายให้มอเตอร์ขณะเริ่มหมุน ช่วงการปรับความเร็วกว้าง รวมทั้งการให้แรงบิดคงที่ตั้งแต่เริ่มหมุนจนถึงพิกัดความเร็ว ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งแรงดัน (Voltage Source Inverter, VSI) ที่ใช้การควบคุมแรงดันต่อความถี่คงที่ (Constant V/F) นั้นนิยมใช้การสร้างสัญญาณควบคุมแบบไซน์ พี ดับบลิว เอ็ม (SINE PWM) เป็นส่วนใหญ่ทำให้ขนาดความถี่หลักมูล (Fundamental Amplitude) ของแรงดันระหว่างเฟสหรือแรงดันไลน์ถูกจำกัดที่ 86.6%[6] ของระดับแรงดันไฟตรงเป็นผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบลดลง ซึ่งแต่เดิมอาจใช้วิธีการมอดูเลตเกิน (Overmodulation) เพื่อเพิ่มขนาดความถี่หลักมูลของแรงดันไลน์ดังกล่าว แต่ก็มีผลทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของความถี่หลักมูล (Fundamental) เกิดเป็นฮาร์มอนิกส์ต่ำขึ้นที่มอเตอร์เป็นผลให้กำลังงานสูญเสีย (Power loss) ในมอเตอร์เพิ่มขึ้น

วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้จึงนำเสนอวิธีการสร้างสัญญาณ พี ดับบลิว เอ็ม แบบเธิดฮาร์มอนิกส์อินเจ็คชั่น (Third-Harmonic Injection PWM) เพื่อเพิ่มขนาดแรงดันระหว่างเฟสหรือแรงดันไลน์ให้สูงสุดเท่าแรงดันไฟตรง โดยที่ฮาร์มอนิกส์ที่เพิ่มเข้าไปสามารถหักล้างกันหมดทำให้ไม่เกิดความผิดเพี้ยนของความถี่หลักมูลที่ตัวมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบควบคุมแรงดันต่อความถี่คงที่ การสร้าง พี ดับ บลิว เอ็ม แบบไซน์ มีข้อจำกัดคือให้ขนาดของความถี่หลักมูลของแรงดันไลน์ที่ 86.6% ซึ่งทำให้การสร้างสัญญาณ PWM ที่ความถี่หลักมูลตั้งแต่ 43.3-50Hz[6] ไม่สามารถรักษาสัดส่วนของแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ได้(ต่ำกว่าสัดส่วน) เป็นผลให้ช่วงความถี่ดังกล่าวมอเตอร์เหนี่ยวนำจ่ายภาระทางกลได้น้อยกว่าที่ระบุไว้ที่ตัวมอเตอร์ แต่ด้วยวิธีการสร้าง พี ดับ บลิวเอ็ม แบบเธิดฮาร์มอนิกส์อินเจ็คชั่น นั้นสามารถรักษาสัดส่วนของแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ได้ตลอดย่านของความถี่หลักมูลจนถึงความถี่พิกัดของมอเตอร์ ในขณะที่ไม่มีผลของกำลังงานสูญเสียที่เกิดจากการเพิ่มฮาร์มอนิกส์ที่สามเข้าไปกับความถี่หลักมูลเนื่องจากสามารถหักล้างกันหมดเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างเฟส

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ระบบควบคุมมอเตอร์ที่ใช้การสร้าง พี ดับบลิว เอ็ม มีการประยุกต์ใช้ตัวประมวลผลต่างๆ เข้ามาเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการควบคุม เช่น

- การใช้งานอุปกรณ์พื้นฐานทางดิจิตอล อาทิเช่น หน่วยความจำแบบ ROM ทำงานร่วมกับวงจรนับ ซึ่งทำให้วงจรของทั้งระบบไม่ซับซ้อน โดยค่าเวลาในการสวิตช์ จะถูกคำนวณไว้ล่วงหน้าและนำไปเก็บไว้ใน ROM อย่างไรก็ตามรูปแบบนี้มีข้อด้อยในด้านการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆทำได้ไม่สะดวกนัก เนื่องจากจะต้องนำอุปกรณ์ ROM ไปโปรแกรมใหม่

- การประยุกต์ใช้ Microcontroller ขนาด 8 bit เช่น MCS-51, PIC แต่มีข้อจำกัดคือ อาจจำเป็นต้องคำนวณและเก็บตารางการสวิตช์ไว้ในหน่วยความจำและจำเป็นต้องใช้ขนาดของหน่วยความจำที่ใหญ่ เพื่อให้สามารถเก็บตารางการสวิตช์ของความถี่หลักมูลตลอดย่านที่ใช้งาน ซึ่งทำให้การออกแบบและพัฒนาทำได้ไม่ค่อยสะดวก รวมทั้งขนาดของระบบจะใหญ่ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น

- การประยุกต์ใช้วงจรรวมทางดิจิตอล (FPGA) เป็นตัวควบคุม โดยปัจจุบันอุปกรณ์ประเภทนี้มีความเร็วในการทำงานที่สูง แต่ข้อมีข้อจำกัดคือถ้าต้องการสร้าง พี ดับบลิว เอ็ม ที่มีการปรับเปลี่ยนความถี่หลักมูลที่มีความละเอียด อาจต้องใช้ FPGA เบอร์ที่มีเกตจำนวนมาก[1] เป็นเหตุให้ราคาของระบบสูงขึ้น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะออกแบบระบบควบคุมที่ใช้ตัวประมวลผลเชิงเลขขนาด 16 bit เป็นตัวสร้าง พี ดับบลิว เอ็ม รวมทั้งเวลาหยุดพัก (dead time) โดยที่ไม่จำเป็นต้องเก็บตารางการสวิตช์ไว้ในหน่วยความจำและสามารถเปลี่ยนความถี่หลักมูลได้ที่ความละเอียดน้อยกว่า 0.01Hz ทำให้การควบคุมมีความน่าเชื่อถือ อีกทั้งตัวประมวลผล DSP มีราคาที่ไม่สูงมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

วิธีการสร้าง พี ดับบลิว เอ็ม แบบเธิดฮาร์มอนิกส์ อินเจ็คชั่น (Third-Harmonic Injection PWM) ในการควบคุมมอเตอร์แบบแรงดันต่อความถี่คงที่ สามารถให้ขนาดของความถี่หลักมูลของแรงดันไลน์สูงสุดเท่ากับระดับแรงดันไฟตรง นั่นหมายความว่าขนาดของความถี่หลักมูลของแรงดันไลน์เอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ จะมีขนาดสูงสุดเท่ากับแรงดันไลน์ด้านเข้าอินเวอร์เตอร์ที่มาจากระบบไฟฟ้าปกติผ่านวงจรเร็คติไฟล์เข้ามา ขณะที่รูปแบบการสร้าง พี ดับ บลิวเอ็ม แบบไซน์ นั้นสามารถให้ขนาดของความถี่หลักมูลของแรงดันไลน์สูงสุดที่ 86.6% ของระดับแรงดันไฟตรง

1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

สำหรับรายละเอียดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเป็น 6 บทดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ

บทที่ 2 กล่าวถึงชนิดของอินเวอร์เตอร์, การมอดูเลตความกว้างพัลส์(PWM), อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส, หลักการ ของ Third-Harmonic Injection PWM, มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส, โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส สนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส, ค่าสลิปของมอเตอร์, ตัวเข้ารหัสความเร็วรอบ

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบวงจรที่ใช้ในระบบ ซึ่งประกอบไปด้วย การออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ กับชุด DSP ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ การออกแบบภาคขับสวิตช์ IGBT การออกแบบวงจรส่วนรับค่าการป้อนกลับ

บทที่ 4 อธิบายลำดับขั้นการทำงานของโปรแกรมส่วนติดต่อกับผู้ใช้ ซึ่งใช้ไมโครคอนโทลเลอร์เป็นตัวประมวลผล และอธิบายลำดับขั้นการทำงานของส่วนสร้าง PWM ที่ใช้ DSP เป็นตัวประมวลผล รวมถึงวิธีการคำนวณหาขนาดความกว้างพัลส์ของ PWM

บทที่ 5 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบระบบอินเวอร์เตอร์ ทั้งสัญญาณทางเวลาและผลของแรงบิดเมื่ออินเวอร์เตอร์ขับมอเตอร์ที่มีภาระทางกล

บทที่ 6 สรุปการวิจัย และข้อเสนอแนะที่เกิดจากการทดลอง

ส่วนในภาคผนวก ก. จะเป็นรายละเอียดของวงจรทั้งหมด ภาคผนวก ข. เป็นรายละเอียดของโปรแกรมในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ และ DSP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชนิดของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์สามารถแบ่งตามชนิดของแหล่งจ่ายได้ 2 ชนิดคือ

1. อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งแรงดัน (Voltage Source Inverter ,VSI)

2. อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งกระแส (Current Source Inverter ,CSI)

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งแรงดัน

2.1.1 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งแรงดัน (Voltage Source Inverter)

อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งแรงดันใช้แรงดันไฟตรงค่าคงที่ ทำให้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์คงที่ด้วย ซึ่งไม่ขึ้นกับโหลด โดยใช้การมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation, PWM)

ข้อดีของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งแรงดัน

- สามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้ง่าย
- ปรับความถี่ได้ในย่านกว้างๆ
- ใช้กับมอเตอร์พร้อมกันหลายๆ ตัวพร้อมกันได้

ข้อเสียของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้แหล่งแรงดันคือ

- มักมีปัญหาในเรื่องการลัดวงจร (Short Through) ของอุปกรณ์สวิทช์ภายในกิ่งเดียวกันของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในทางปฏิบัติมีการสร้างเวลาหยุดพัก (Dead Time) เป็นตัวช่วยป้องกัน

2.1.2 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งกระแส (Current Source Inverter)

อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งกระแสประกอบด้วยไทริสเตอร์เร็คติไฟร์เออร์ ที่สามารถควบคุมได้โดยควบคุมเฟสของเอซีไลน์ และยังมีอินดัคเตอร์ตัวใหญ่ต่ออนุกรมอยู่แต่ไม่มีตัวเก็บประจุต่อขนานเพื่อสร้างแหล่งจ่ายกระแสซึ่งแตกต่างจากอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งแรงดัน ส่วนควบคุมสัญญาณกระแสที่เปลี่ยนความถี่ได้อาจใช้อุปกรณ์ไทริสเตอร์ร่วมกับไดโอด

ข้อดีของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งกระแส

- ไม่มีโอกาสที่จะมีการลัดวงจรเหมือนใน VSI
- กำลังสูญเสียต่ำเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ไทริสเตอร์

ข้อเสียของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วงจรมีขนาดใหญ่ราคาแพง
- ไม่สามารถทำงานในขณะไม่มีโหลดได้
- ไม่สามารถใช้กับมอเตอร์หลายตัวพร้อมกันได้

2.2 การมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulate, PWM)

การมอดูเลตความกว้างของพัลส์ (PWM) เป็นเทคนิคการแบ่งรูปคลื่นใน 1 คาบ ออกเป็นพัลส์ย่อยๆ หลายพัลส์ โดยที่แต่ละพัลส์อาจมีความกว้างไม่เท่ากัน

2.2.1 การเฉลี่ยเฉพาะที่ของสัญญาณ PWM

แรงดันเอาท์พุท V_o ของวงจรทอนระดับสัญญาณ (buck converter) ดังรูป 2.1(ก) สามารถเปลี่ยนแปลงได้ระหว่างค่า 0 ถึงค่า V_s โดยที่วัฏจักรงาน D มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้าให้ D เป็นฟังก์ชั่นของเวลา $d(t)$ โดยที่ $d(t)$ มีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างช้าๆ เมื่อเทียบกับคาบของการสวิตซ์ ซึ่งถ้าเป็นในกรณีเช่นนี้เราสามารถสังเคราะห์แรงดันเอาท์พุท V_o ซึ่งมีค่าเฉลี่ยจะเป็นฟังก์ชั่นของเวลาและมีค่าเท่ากับ $d(t)V_s$ อย่างไรก็ตามเวลาในการเฉลี่ยค่า V_o จำเป็นต้องเป็นช่วงเวลาที่นานเมื่อเทียบกับคาบเวลาของการสวิตช์ T แต่คาบเวลาดังกล่าวจะต้องสั้นกว่าเมื่อเทียบกับคาบเวลาของ $d(t)$

D คือความกว้างของพัลส์ความถี่การสวิตช์ (0-1)

$d(t)$ คือฟังก์ชั่นทางเวลาของ D

การเฉลี่ยค่าแรงดันเอาท์พุท V_o ในที่นี้หมายถึงการเฉลี่ยเฉพาะที่ (local averaging) และจะใช้สัญลักษณ์ $\overline{V_o}(t)$ สำหรับสัญลักษณ์ $<V_o>$ หมายถึงค่าเฉลี่ยจริงซึ่งเป็นค่าคงตัว หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ค่าเฉลี่ยดังกล่าวเป็นค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ ซึ่งได้จากการกรองสัญญาณแรงดันเอาท์พุทด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยขจัดความถี่สูงออกและคงเหลือไว้แต่สัญญาณความถี่ต่ำๆ เช่น องค์ประกอบหลักมูล (fundamental component) ในขณะที่ถ้าส่วนค่าเฉลี่ยที่ได้จากการกรองทุกความถี่ออก จะคงเหลือไว้แต่องค์ประกอบไฟตรง

สำหรับวงจรทอนระดับสัญญาณแสดงในรูปที่ 2.1(ก) ถ้าเราให้วัฏจักรงาน D เป็นฟังก์ชั่นไซนูซอยด์ $d(t)$

$$d(t) = 0.5 + m_a \sin(\omega_a t) \tag{2.1}$$

เราจะได้แรงดันเอาท์พุทที่เป็นองค์ประกอบไฟตรงบวกกับไซนูซอยด์ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = 0.5V_s + m_a V_s \sin(\omega_a t) \tag{2.2}$$

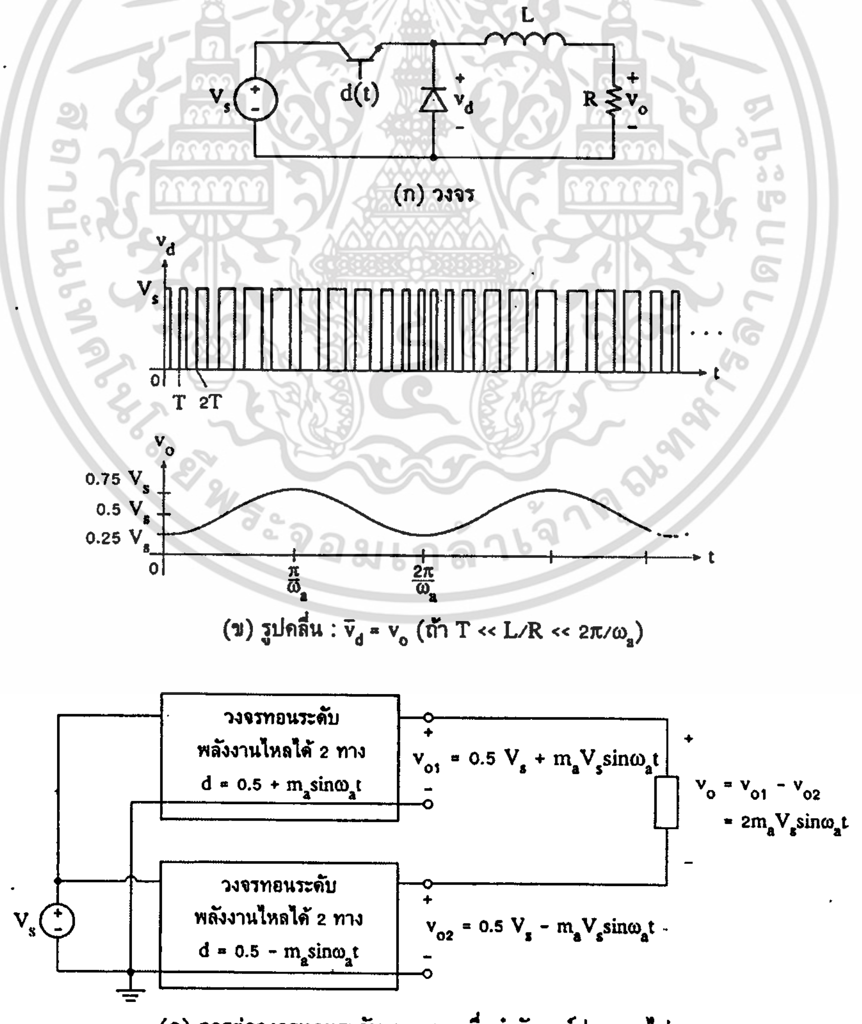
m_a คือ อัตราการมอดูเลตขนาด $m_a \leq 0.5$

ω_a คือ ความถี่ในการมอดูเลต

โดยมีเงื่อนไขดังนี้

$$T \leq \frac{L}{R} \leq \frac{2\pi}{\omega_a} \tag{2.3}$$

แรงดัน V_d เป็นพัลส์ที่มีความถี่เท่ากับ $1/T$ แต่มีความกว้างพัลส์ที่ไม่คงตัว เราเรียกรูปคลื่นที่วัฏจักรงานเป็นฟังก์ชั่นทางเวลาของรูปคลื่นสัญญาณ PWM ค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของรูปคลื่น PWM หรือ $\bar{V}_d$ จะเป็นฟังก์ชั่นทางเวลา ถ้ากรอง V_d ด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ L และ R โดยมีพารามิเตอร์เป็นไปตามเงื่อนไขสมการที่ (2.3) ดังนั้นค่าความถี่การสวิตช์จะถูกกรองออกไป แต่ความถี่ ω_a ไม่ถูกลดทอน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 2.1 การใช้เทคนิค PWM กับวงจรทอนระดับ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.1(ข) V_o คือค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของรูปคลื่น PWM เนื่องจาก $d(t)$ เป็นฟังก์ชั่นไซนูซอยด์ ค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของรูปคลื่น PWM จึงเป็นรูปไซนูซอยด์ด้วย แต่ $d(t)$ อาจเป็นฟังก์ชั่นของเวลาใดๆ (ที่เป็นไปตามเงื่อนไขสมการที่ (2.3)) $V_o(t)$ ก็จะเป็นฟังก์ชั่นที่เหมือนกับ $d(t)$

อย่างไรก็ดี แรงดันเอาท์พุท V_o ของวงจรทอนระดับสัญญาณยังมีองค์ประกอบไฟตรงผสมอยู่ (เป็นไปตามสมการที่ (2.2) และรูปที่ 2.1 (ข)) ดังนั้นการกำจัดองค์ประกอบไฟตรงสามารถทำได้โดยการต่อวงจรทอนระดับ 2 วงจร โดยที่สัญญาณมอดูเลต $\bar{V}_d$ ของวงจรทั้งสองมีเฟสต่างกัน 180^o (ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ค)) เมื่อนำสัญญาณด้านเอาท์พุทมาลบกัน จะส่งผลให้แรงดันไฟตรงก็จะหักล้างกันไปเหลือแต่แรงดันไฟสลับ อย่างไรก็ดี เนื่องจากกระแสด้านออก i_o เป็นกระแสสลับวงจรทอนระดับที่ใช้จะต้องเป็นชนิดที่พลังงานไหลได้ 2 ทิศทาง กล่าวคือ แต่ละวงจรใช้สวิตช์ ที่กระแสไหลได้ 2 ทางจำนวน 2 ตัวถ้าให้สัญญาณมอดูเลตเป็นฟังก์ชั่นใดๆ แต่องค์ประกอบความถี่สูงสุดยังเป็นไปตามเงื่อนไขสมการที่ (2.3) แรงดันด้านออกจะเป็นฟังก์ชั่นเดียวกับสัญญาณมอดูเลตเพียงแต่จ่ายกำลังได้มากขึ้น ในแง่นี้วงจรทำหน้าที่เป็นวงจรขยายกำลังแบบวิธีสวิตช์ (Switchmode power amplifier)

$$m_f = \frac{f}{f_a} \qquad (2.4)$$

m_f = อัตราการมอดูเลตความถี่

f = ความถี่การสวิตช์

f_a = ความถี่การมอดูเลต

2.3 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

2.3.1 วงจรและรูปคลื่นสัญญาณ

อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเหมาะสำหรับกรณีที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง ซึ่งโครงสร้าง และรูปคลื่นสัญญาณของวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแสดงอยู่ในรูปที่ 2.2 (ก)

เทคนิค PWM สามารถใช้ได้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ไม่ว่าจะเป็นเทคนิคไซน์ตัดสามเหลี่ยม หรือเทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ต่ำ หรือการควบคุมรูปคลื่นของกระแส

รูปที่ 2.2 (ข) แสดงหลักการของเทคนิคไซน์ตัดสามเหลี่ยม เรามีรูปสามเหลี่ยม V_T ซึ่งมีความถี่เท่ากับความถี่การสวิตช์ และมีสัญญาณอ้างอิงรูปไซน์ 3 สัญญาณได้แก่คือ V_{rA} , V_{rB} และ V_{rC} ซึ่งมีมุมเฟสต่างกัน 120^o โดยมีจุดตัดระหว่าง V_T กับ V_{rA} (V_{rB} และ V_{rC}) เป็นตัวกำหนดการตัดต่อวงจรของสวิตช์ Q_1 Q_4 (Q_3 Q_6 และ Q_5 Q_2 ตามลำดับ) รูปคลื่นของแรงดัน V_{AG} , V_{BG} (G คือสายลบของแหล่งแรงดันไฟตรง) และ V_{AB} แสดงอยู่ในรูปที่ 2.2(ค) สังเกตได้ว่าองค์ประกอบหลัก

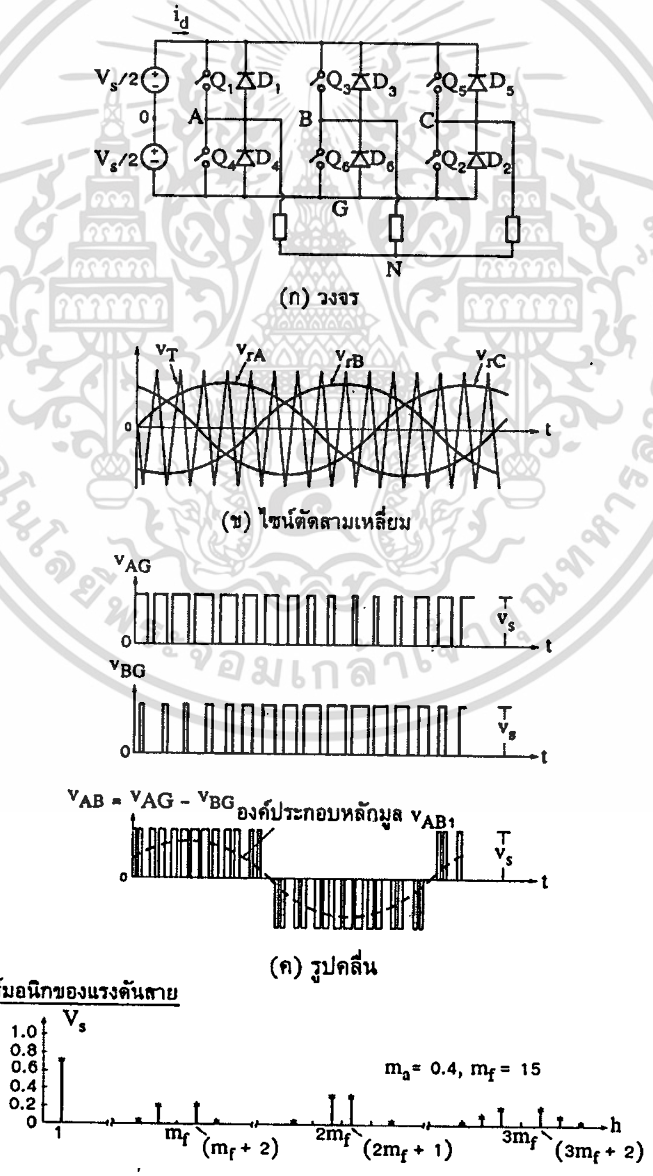
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนสิทธิ์... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มูลของ V_{AG} หรือ V_{AG1} มีแอมพลิจูดเท่ากับค่าที่แสดงในสมการที่(2.5) (V_{AG} ต่างกับ V_{A0} เพียงค่าแรงดันไฟตรง $V_s/2$)

$$V_{AG1} = m_a V_s \qquad ;m_a \leq 0.5 \tag{2.5}$$

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} มีเฟสล้าหลัง V_{AG1} อยู่ 30° (แสดงในรูปที่ 2.2(ค)) ดังนั้น

$$V_{AB1} = \sqrt{3} m_a V_s \qquad ;m_a \leq 0.5 \tag{2.6}$$



(ง) สเปกตรัม

รูปที่ 2.2 วงจรและรูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบระบบ โดยทั่วไปนิยมเลือกอัตราการมอดูเลตความถี่ m_f เป็นเลขคี่[9] และเป็นพหุคูณของ 3 และให้ความลาดชันของ V_T และ V_r ณ จุดที่แรงดันทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกัน(แสดงในรูปที่ 2.2 (ข)) ในกรณีนี้ถ้า $m_a \leq 0.5$ สเปกตรัมของ V_{AB} จะเป็นดังแสดงในรูปที่2.2 (ง) นอกจากนี้สังเกตได้ว่าฮาร์มอนิกส์ต่ำสุดเกิดขึ้นที่ความถี่ $(m_f \pm 2k)f_a$ ตารางที่ 1 แสดงฮาร์มอนิกส์ของแรงดันสายของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเราอาจจะออกแบบให้วงจรทำงานถึงในย่านการมอดูเลตเกิน เพื่อให้ได้แรงดันเอาท์พุทที่มีค่าสูงขึ้น ส่วนข้อเสียมีเนื่องมาจากฮาร์มอนิกส์ที่เพิ่มขึ้น แต่มักจะพอยอมรับได้[9]

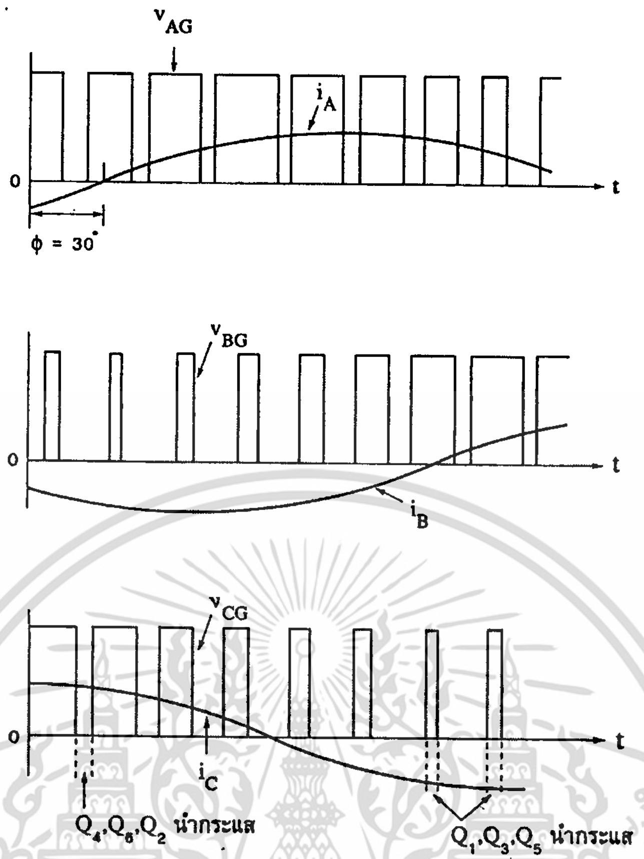
ถ้าโหลดมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำโดยมีค่าคงตัวเวลาที่เป็นไปตามเงื่อนไขสมการที่ (2.3) กระแสโหลดจะเป็นรูปใกล้เคียงไซน์โดย ทิศทางของกระแสโหลดเป็นตัวกำหนดการนำกระแสของไดโอด เช่น กรณีที่เฟสของโหลดเท่ากับ 30^o (ตามล้าหลัง) รูปคลื่นจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยสังเกตได้ว่าในช่วงเวลาที่ $i_c > 0$ และ $V_{CG} = 0$ (Q_2 หรือ D_2 นำกระแส) แต่ทิศทางของ i_c แสดงว่า D_2 นำกระแส (แสดงในรูปที่2.2 (ก))

เมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณในรูปที่ 2.2 จะพบว่า ในบางช่วงเวลาดังแสดงในรูปล่างสวิตช์จะต่อกิ่งทั้งสามของโหลดเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่าย V_s (เช่น เมื่อ Q_4,Q_6,Q_2 นำกระแส) และบางช่วงเวลาสวิตช์จะต่อกิ่งทั้งสามของโหลดเข้ากับขั้วบวกของแหล่ง V_s (เช่น เมื่อ Q_1,Q_3,Q_6 นำกระแส) ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าว กระแสอินพุทของอินเวอร์เตอร์ (i_d ในรูปที่ 2.2 (ก)) มีค่าเป็นศูนย์ หมายความว่าพลังงานไม่ไหลจากแหล่งจ่ายสู่โหลด ซึ่งระยะเวลาของการควบคุมช่วงเวลาดังกล่าวเป็นการควบคุมพลังงานที่จ่ายให้แก่โหลดหรือควบคุมค่าองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันเอาท์พุทนั่นเอง

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนระหว่างค่า RMS ของฮาร์มอนิกส์กับ V_S ของแรงดันไลน์ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

h	m_a	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
1		0.122	0.245	0.367	0.490	0.612
$m_f \pm 2$		0.010	0.037	0.080	0.135	0.195
$m_f \pm 4$					0.005	0.011
$2m_f \pm 1$		0.116	0.200	0.227	0.192	0.111
$2m_f \pm 5$					0.008	0.020
$3m_f \pm 2$		0.027	0.085	0.124	0.108	0.038
$3m_f \pm 4$			0.007	0.029	0.064	0.096
$4m_f \pm 1$		0.100	0.096	0.005	0.064	0.042
$4m_f \pm 5$				0.021	0.051	0.073
$4m_f \pm 7$					0.010	0.030

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แสดงช่วงพลังงานไม่ไหลสู่โหลด

2.3.2 เทคนิคการมอดูเลตแบบ SINE PWM

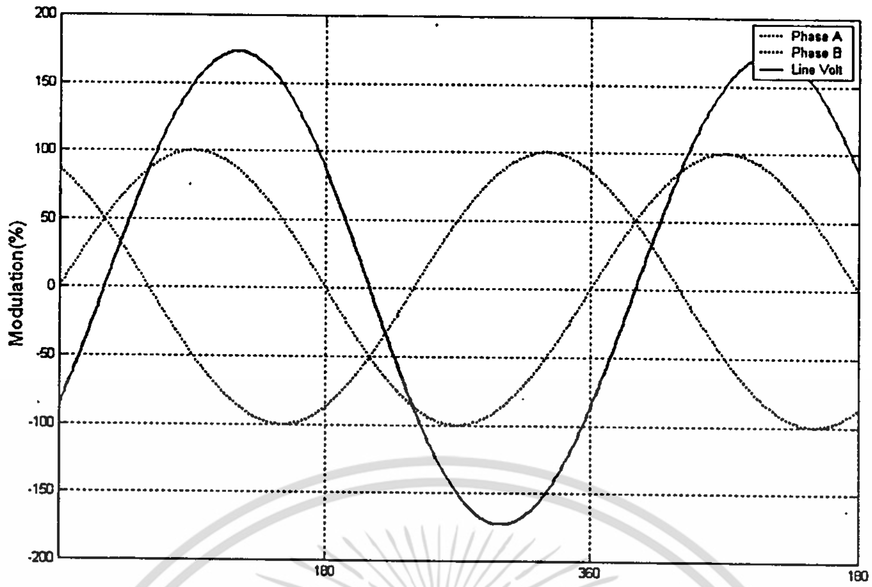
การมอดูเลตแบบ SINE PWM จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.2 สัญญาณ PWM ที่ได้ก็เป็นไปตามสมการที่ (2.2) ซึ่งเป็นแรงดัน V_o เฉลี่ยของเฉพาะเฟส และเมื่อต้องการค่าแรงดันของ 3 เฟสที่ต่างกันก็สามารถหาได้จากสมการที่ (2.7) (โดยเฟส U, V, W ในสมการที่ (2.7) เป็นตัวเดียวกับเฟส A,B,C ในรูปที่ 2.2)

$$\begin{aligned} V_u &= 0.5V_s + m_a V_s \sin(\omega_a t) \\ V_v &= 0.5V_s + m_a V_s \sin(\omega_a t + 120°) \\ V_w &= 0.5V_s + m_a V_s \sin(\omega_a t - 120°) \end{aligned} \tag{2.7}$$

จากสมการที่ (2.7) สามารถหาแรงดันระหว่างเฟสหรือแรงดันไลน์สูงสุด ($m_a = 0.5$) ได้จากสมการที่ (2.8)

$$V_{uv} = 0.866V_s \sin(\omega_a t - 30) \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



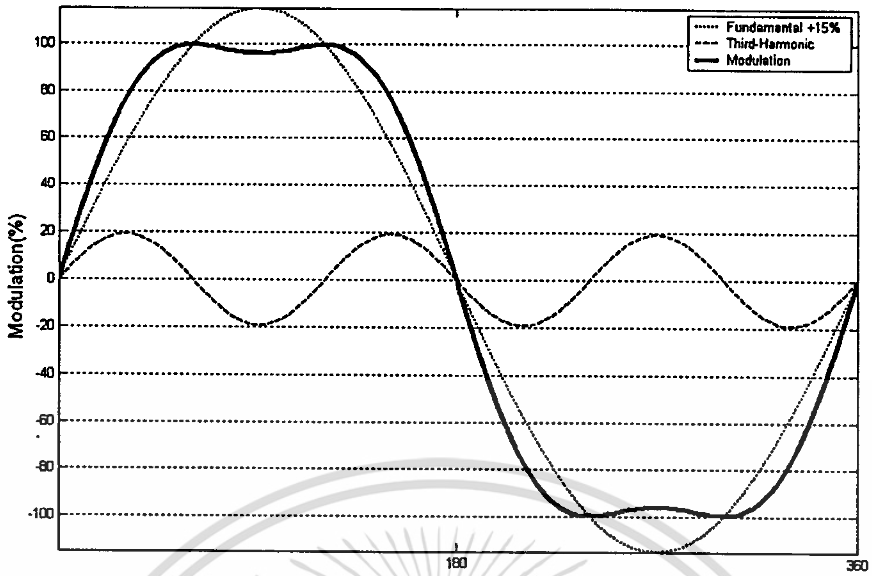
รูปที่ 2.4 แรงดันเฟสและแรงดันไลน์จากการมอดูเลตแบบ SINE PWM

รูปที่ 2.4 นั้นเป็นสัญญาณความถี่หลักมูลจากการมอดูเลตแบบ SINE PWM ในสมการที่ 2.7-2.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าด้วยวิธีการมอดูเลตแบบนี้มีข้อจำกัดคือ สามารถให้ขนาดของความถี่หลักมูลของแรงดันไลน์ (Line Volttage) สูงสุดที่ 86.6 % ของแรงดันไฟตรง ตามสมการที่ 2.8 ซึ่งอาจจะต้องใช้วิธีการที่สามารถเพิ่มขนาดของแรงดันไลน์ให้สูงขึ้น เช่น การมอดูเลตเกิน (Overmod) ส่งผลให้เกิดฮาร์มอนิกส์ต่ำขึ้นที่มอเตอร์ ทำให้กำลังงานสูญเสียที่มอเตอร์เพิ่มขึ้น

2.3.3 เทคนิคการมอดูเลตแบบ Third-Harmonic Injection PWM

จากเทคนิค SINE PWM ถ้าเราต้องการแรงดันระหว่างเฟส V_{uv} ในสมการที่ 2.8 เท่ากับแรงดันไฟตรง เราต้องเพิ่มอัตราการมอดูเลต *ma* ขึ้น 15.4% แต่การเพิ่มอัตราการมอดูเลตนั้น ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของความถี่หลักมูลเนื่องจากการมอดูเลตเกิน แต่ถ้าพิจารณารูปที่ 2.5 ประกอบด้วย จะเห็นว่าการเพิ่มฮาร์มอนิกส์ที่ 3 ที่มีขนาดเหมาะสมเข้าไปกับความถี่หลักมูล สามารถแก้ไขความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้น จากการมอดูเลตเกินนี้ได้ จึงให้ขนาดของแรงดันเฟสต่อเฟส หรือแรงดันไลน์สูงสุดเท่ากับแรงดันไฟตรง ดังรูปที่ 2.5 มีผลให้สนามแม่เหล็ก (Flux) สูงขึ้น แรงบิด (Torque) มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 เทคนิค Third-Harmonic Injection

การหาขนาดของฮาร์มอนิกส์ลำดับที่สาม ที่เหมาะสมด้วยการจำลองการทำงานบนโปรแกรม MicroSim Eval 8 จะได้ค่าอยู่ในช่วง 18.5%-20% ของความถี่หลักมูลและค่าที่ให้ผลดีที่สุดคือ 19.2% จากสมการที่ 2.2 สามารถคำนวณหาขนาดของแรงดันชั่วขณะต่อเฟส V_o เมื่อใช้วิธี Third-Harmonic Injection PWM ได้ดังสมการที่ 2.9

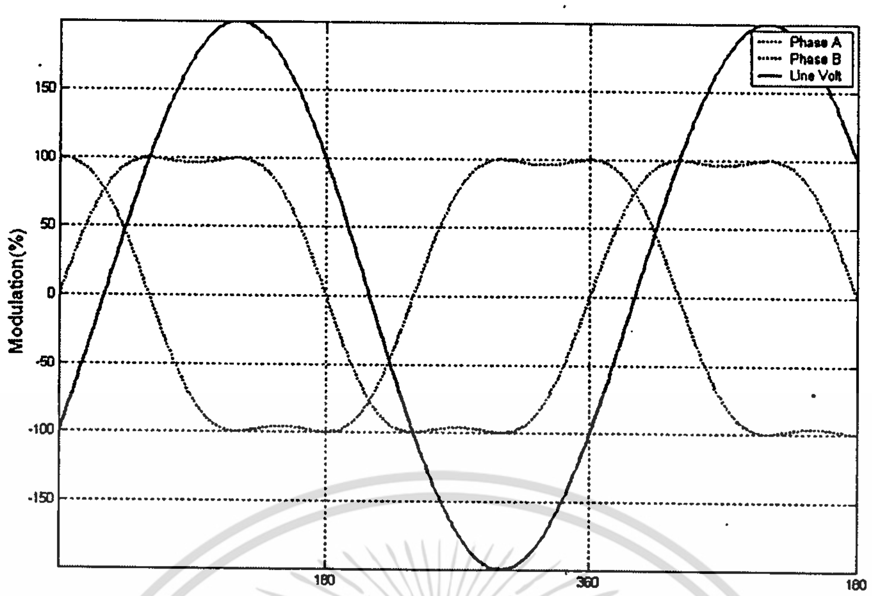
$$V_o = 0.5V_s + (1.154m_aV_s\sin(\omega_a t) + 0.192m_aV_s\sin(3\omega_a t)) \quad (2.9)$$

ทำให้แรงดันเฟสต่อเฟสไม่มีเทอมของฮาร์มอนิกส์ที่ 3 และมีขนาดเพิ่มขึ้นจากสมการที่ 2.8 ($m_a = 0.5$)

$$V_{uv} = V_s\sin(\omega_a t - 30) \quad (2.10)$$

รูปที่ 2.5 นั้นเป็นสัญญาณความถี่หลักมูลจากการมอดูเลตแบบ Third-Harmonic Injection PWM ในสมการที่ 2.9-2.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าด้วยวิธีการมอดูเลตแบบนี้ให้ขนาดของความถี่หลักมูลของแรงดันไลน์ (Line Volttage) สูงสุดที่ 100 % ของแรงดันไฟตรง ตามสมการที่ 2.10 ซึ่งสูงกว่าในรูปที่ 2.4 ที่ให้แรงดันไลน์แค่ 86.6% ของแรงดันไฟตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แรงดันเฟสและแรงดันไลน์จากการมอดูเลตแบบ Third-Harmonic Injection PWM

การเปรียบเทียบเทคนิค PWM

เทคนิคการมอดูเลตถูกนำมาใช้ในการสร้างรูปสัญญาณความถี่หรือรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าสัญญาณมอดูเลต PWM ที่ใช้ในการสวิตช์อินเวอร์เตอร์นั้นถูกสร้างมาจากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณพาห์รูปคลื่นสามเหลี่ยมความถี่สูงและสัญญาณไซนูซอยด์อ้างอิงสามสัญญาณ ซึ่งหลักการพื้นฐานนี้ได้ถูกนำมาพัฒนาสร้างทั้งทางแอนาลอกและดิจิตอลสำหรับการแปลงพลังงาน

สำหรับวิธี Third-Harmonic สามารถให้แรงดันไลน์สูงเท่ากับแรงดันไฟตรงเหมือนกับวิธี 60° PWM และ SVM และให้เอาท์พุตเป็นไซนูซอยด์ แต่การใช้เทคนิคนี้อาจต้องใช้วงจรที่มีความซับซ้อนมากหรือใช้ตัวประมวลผลที่มีความสามารถในทางคำนวณที่สูงเพื่อให้ได้สัญญาณ PWM ที่ถูกต้อง

ตารางที่ 2.2 แสดงผลรวมของการมอดูเลตประเภทต่างๆสำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟส ที่ $M = 1$

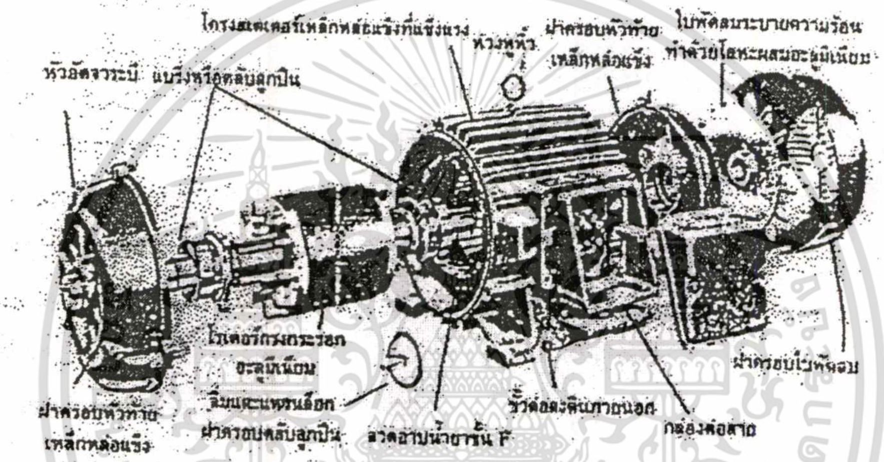
Modulation Type	Normalized Phase Voltage, V_P/V_S	Normalized Line Voltage, V_L/V_S	Output Waveform
Sinusoidal PWM	0.5	$0.5 \times \sqrt{3} = 0.8666$	Sinusoidal
60° PWM	$1/\sqrt{3} = 0.57735$	1	Sinusoidal
Third-harmonic PWM	$1/\sqrt{3} = 0.57735$	1	Sinusoidal
SVM	$1/\sqrt{3} = 0.57735$	1	Sinusoidal
Overmodulation	Higher than the value for $M = 1$	Higher than the value for $M = 1$	Nonsinusoidal
Six-step	$\sqrt{2}/3 = 0.4714$	$\sqrt{(2/3)} = 0.81645$	Nonsinusoidal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ตั้งแต่โรงงานอุตสาหกรรม ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ ซึ่งโดยส่วนมากจะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเพราะมีราคาที่ไม่แพง ต้องการการบำรุงรักษาน้อย และมีความเร็วรอบเกือบคงที่ตลอดย่านโหลด แต่มีข้อเสียคือ

- ควบคุมความเร็วได้ยาก
- ขณะมีโหลดน้อยจะทำงานที่ Power Factor ต่ำและล้าหลัง
- กระแสเริ่มหมุนมักเป็น 5 เท่า หรือ 7 เท่าของกระแสขับโหลดเต็มที่

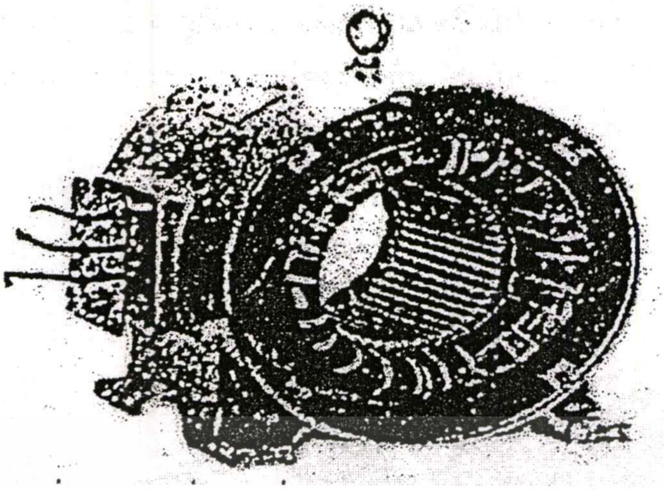


รูปที่ 2.7 ลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสประกอบด้วยส่วนสำคัญสองส่วนคือ ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) และส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotor)

- ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสใช้หลักการเดียวกับซิงโครนัสมอเตอร์ หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับโดยทำจากแผ่นเหล็กบางๆอัดซ้อนเข้าด้วยกันและเป็นช่องสล๊อตไว้บรรจุขดลวด ส่วนจำนวนขั้วแม่เหล็กจะเป็นตัวกำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ เมื่อเราจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดที่สเตเตอร์ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง และสนามแม่เหล็กนี้จะหมุนด้วยความเร็วค่าหนึ่งที่เรียกว่าความเร็วซิงโครนัส สนามแม่เหล็กหมุนดังกล่าวจะทำการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่โรเตอร์

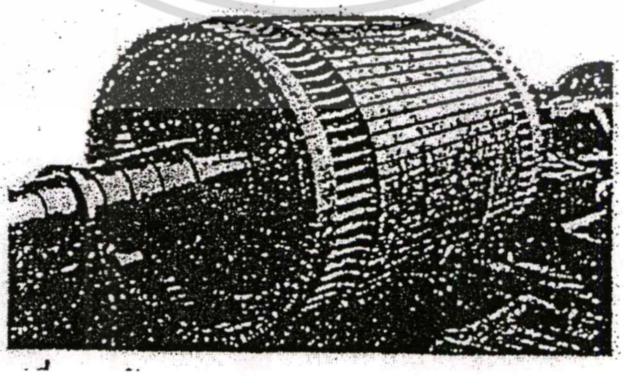
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) ของมอเตอร์

- ส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotor) แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ แบบที่มีตัวหมุนคล้ายกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) และส่วนที่ตัวหมุนมีขดลวดพันอยู่รอบๆ (Wound Rotor)

ตัวหมุนแบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์แบบนี้ซึ่งมีชื่อเรียกว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำกรงกระรอก โรเตอร์ชนิดนี้สร้างง่ายที่สุด ประกอบด้วยแท่งอลูมิเนียมฝังอยู่ในทุ่นโรเตอร์ ซึ่งเป็นแผ่นเหล็กอ่อนบางๆ ประกอบเป็นทุ่นโรเตอร์ ปลายทั้งสองด้านของแท่งอลูมิเนียมจะเชื่อมด้วยกันกับวงแหวน ดังนั้นจึงมีรูปร่างคล้ายกรงกระรอก เนื่องจากวงแหวนนี้ถูกต่อให้ครบวงจรด้วยวงแหวนตลอดเวลา จึงไม่มีทางต่อความต้านทานภายนอกเข้าไปกับโรเตอร์ เพื่อให้ความต้านทานของวงจรโรเตอร์มากขึ้นในตอนเริ่มหมุน เป็นการลดกระแสและทำให้แรงบิดเริ่มหมุนดีขึ้น แท่งอลูมิเนียมที่ฝังอยู่กับโรเตอร์นี้จะวางเฉียงกับแนวแกนเพลาเพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กข้ามช่องอากาศ (Air Gap) จากสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.9 ตัวหมุนแบบกรงกระรอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวหมุนแบบมีขดลวดพันอยู่รอบๆ (Wound Rotor) บนโรเตอร์จะมีช่องสเตเตอร์สำหรับพันขดลวดโดยพันให้มีจำนวนขั้วแม่เหล็กเท่ากับทางด้านสเตเตอร์ ปลายด้านหนึ่งของขดลวดโรเตอร์จะต่อร่วมกันเป็นจุดสตาร์ และปลายที่เหลือทั้งสาม จะไปต่อกับวงแหวนลื่น (Slip Ring) ที่ยึดติดอยู่กับเพลาของตัวโรเตอร์ แปลงถ่านทั้งหมดที่ต่ออยู่วงแหวนลื่นจะไปต่อยังตัวต้านทานแปรค่า 3 ตัวที่ต่อร่วมกันเป็นแบบสตาร์เพื่อปรับความต้านทานในวงจรโรเตอร์ให้เพิ่มขึ้นในตอนเริ่มหมุน ทำให้กระแสในตอนเริ่มหมุนต่ำลง ทำให้แรงบิดเริ่มหมุนสูงขึ้นในสภาวะมอเตอร์ทำงาน

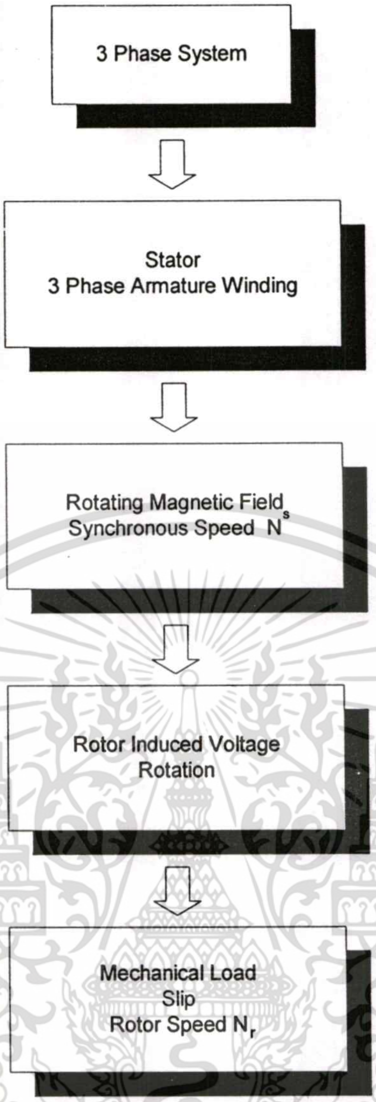
รูปที่ 2.10 ตัวหมุนที่มีขดลวดพันอยู่รอบๆ (Wound Rotor)

2.4.1 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อป้อนไฟสามเฟสให้กับขดลวดสเตเตอร์ จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นที่สเตเตอร์เคลื่อนที่หมุนไปรอบช่องว่างอากาศ ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส (N_s) สนามแม่เหล็กหมุนนี้จะไปเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้าขึ้นที่โรเตอร์ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนจากสเตเตอร์ จะดึงดูดให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนจากโรเตอร์ ซึ่งความเร็วของโรเตอร์จะต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสเสมอ หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

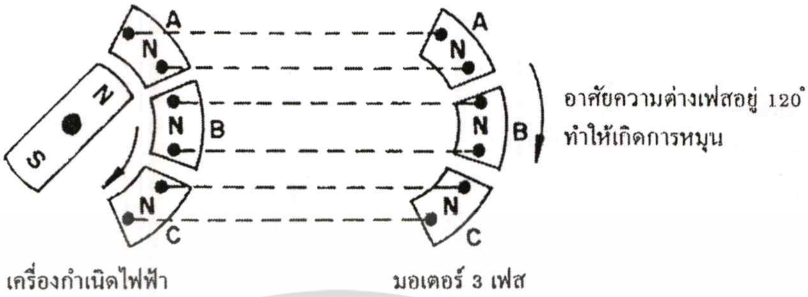
2.4.2 สนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

สนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อมีกระแสไฟฟ้าระบบ 3 เฟสจ่ายให้กับขดลวด 3 เฟส เป็นผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์นั้น สนามแม่เหล็กหมุนจะตัดกับตัวนำในโรเตอร์ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์ และจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในโรเตอร์ เพราะที่โรเตอร์มีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลอยู่ ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือและขั้วใต้เช่นเดียวกับที่สเตเตอร์ และสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์นั้นจะเกิดการผลัก และดูดกับขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ในทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุน ผลที่ได้ของการดูด และผลักระหว่างขั้วแม่เหล็กบนสเตเตอร์และโรเตอร์ทำให้เกิดแรงบิดขึ้น

หลักการหมุนของสนามแม่เหล็กโดยกระแสไฟฟ้า 3 เฟสจากรูปที่ 2.12 เป็นการแสดงให้เห็นว่าถ้าเราจ่ายกระแสไฟฟ้าในระบบ 3 เฟสให้กับขดลวดในสเตเตอร์ ในช่วงขณะหนึ่ง สมมติให้เป็นครึ่งไซเคิลบวกดังแสดงในรูปที่ 2.12 ด้านขวามือ โดยการต่อไฟฟ้าเฟส A เข้ากับเฟส A

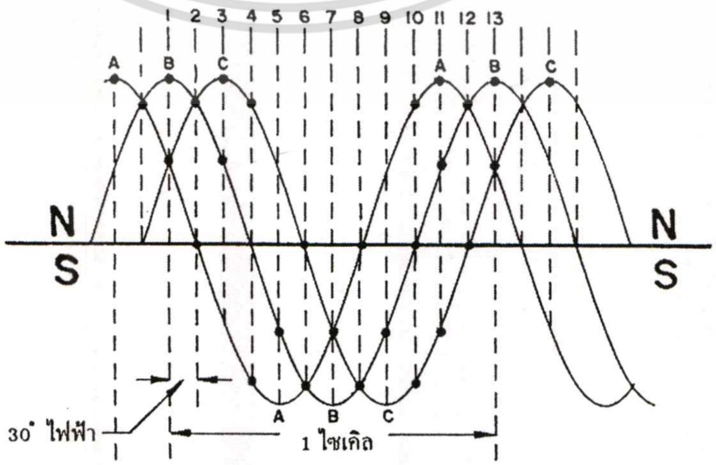
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

ของมอเตอร์ และเฟส B เฟส C เข้ากับมอเตอร์ในเฟสถัดไป เมื่อกระแสไฟฟ้าในครึ่งไซเคิลบวก เฟส A ไหลเข้า



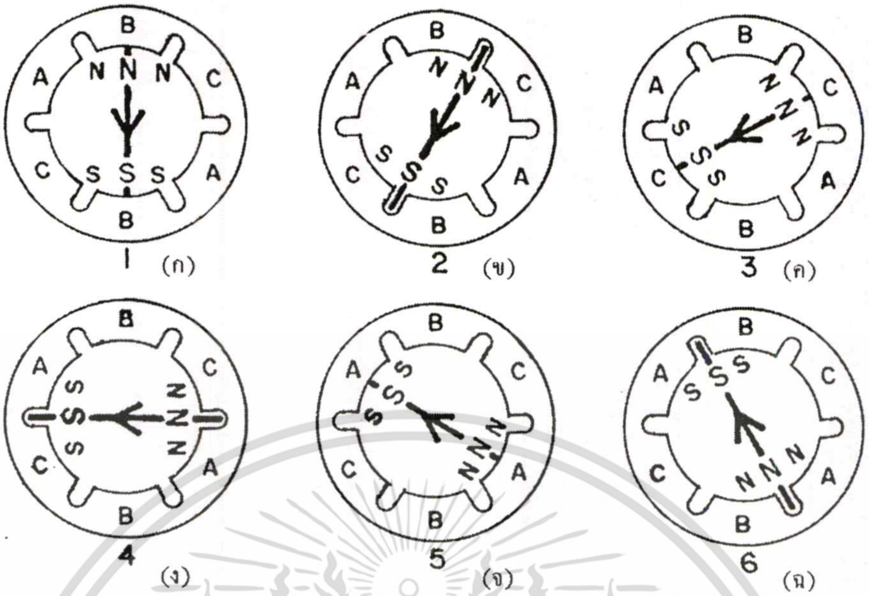
รูปที่ 2.12 แสดงการจ่ายแรงดันไฟฟ้า3เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ไปในขดลวดของเฟส A มอเตอร์จะทำให้เกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดในเฟส A ของมอเตอร์นั้นทำให้เกิดขั้ว N ขึ้น และเมื่อแรงดันไฟฟ้าในเฟส A ที่จ่ายให้กับเฟส A มอเตอร์ค่อยๆ ลดลงอำนาจแม่เหล็กขั้ว N ก็จะค่อยๆ ลดอำนาจ หรือความเข้มลง และในขณะเดียวกันที่เฟสถัดไปก็จะมีอำนาจแม่เหล็กคล้ายๆกับเฟส A แต่ในเวลาถัดไปจนครบ 3 เฟสในหนึ่งขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ (คือเฟส A เฟส B และเฟส C) และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในครึ่งไซเคิลบวกสิ้นสุดเรียบร้อยแล้ว ในครึ่งไซเคิลลบถัดไปที่ขั้วแม่เหล็กดังกล่าวข้างต้นก็จะเปลี่ยนสภาวะจากขั้ว N ไปเป็นขั้ว S และในอีกหนึ่งขั้วแม่เหล็กถัดไปก็มีลักษณะเช่นเดียวกันกับขั้วแม่เหล็กแรกที่กล่าวถึง ซึ่งลักษณะเช่นนี้เหมือนกับว่าสนามแม่เหล็กหมุนไปรอบๆ สเตเตอร์ ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เหมือนกับหมุนไปรอบๆนี้เรียกสั้นๆว่าสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetic Field)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

รูปที่ 2.13 รูปคลื่นไซน์ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นโดยกระแสไฟฟ้า 3 เฟส



รูปที่ 2.14 แสดงการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้ว

จากรูปที่ 2.13 และรูปที่ 2.14 เป็นการแสดงถึงการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้ว ที่สามารถพิจารณาทีละขั้นได้คือ

ที่จุดที่ 1 บนรูปไซเคิลไซน์จะเห็นได้ว่าเฟส B อยู่ที่ตำแหน่งความเข้มสูงสุดของขั้วเหนือ เฟส A ก็เป็นขั้วเหนือ แต่ลดลงจากจุดสูงสุดและเฟส C เป็นขั้วเหนือและกำลังเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ก) ของสเตเตอร์คือเฟส B เป็นขั้วเหนือมาก เฟส A และเฟส C เป็นขั้วเหนือน้อย

ที่จุดที่ 2 บนรูปคลื่นไซน์ เฟส A เป็น 0 (Zero) เฟส B เป็นขั้วเหนือแต่กำลังลดลง ส่วนเฟส C เป็นขั้วเหนือแต่กำลังเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ข) ของสเตเตอร์ เฟส A เป็น 0 เฟส B และเฟส C เป็นขั้วเหนือและมีความเข้มเท่ากัน ซึ่งจะเกิดขึ้นระหว่าง 2 เฟสคือ เฟส B กับเฟส C ดังนั้นจากจุดที่ 1 ไปจุดที่ 2 ขั้วเหนือจะเคลื่อนที่ไป 30 องศาไฟฟ้า ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (30 Electrical Degree Clockwise)

ที่จุดที่ 3 บนรูปคลื่นไซน์ เฟส C จะมีความเข้มสูงสุดของขั้วเหนือ เฟส B ลดลงจากสูงสุด และเฟส A เพิ่มขึ้นแต่ เฟส A เป็นขั้วใต้ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ค) ของสเตเตอร์เฟส C จะเป็นขั้วเหนือและมีความเข้มมาก ส่วนเฟส B มีความเข้มของขั้วเหนือน้อย และเฟส A เป็นขั้วใต้น้อย ดังนั้นจากจุดที่ 2 ไปจุดที่ 3 ขั้วเหนือจะเคลื่อนที่ไป 30 องศาไฟฟ้า ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

บนรูปคลื่นไซน์ที่จุดต่างๆในไซเคิลก็จะเกิดหมุนเวียนกันไปเช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้ว ตัวอย่างเช่น ที่จุดที่ 6 ในรูปที่ 2.13 บนรูปคลื่นไซน์ เฟส A และ เฟส B จะเป็นขั้วใต้ ส่วนเฟส C จะเป็น 0 ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ฉ) ของสเตเตอร์ขั้วเหนือจะเคลื่อนที่ไป 150 องศาไฟฟ้าในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจากจุดที่ 1 เป็นอันว่าครบไซเคิลของขั้วเหนือ หรือหมุนครบ 1 รอบ 360 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น

2.4.3 ชนิดฉนวนของมอเตอร์

ฉนวนที่ใช้ในการพันขดลวดและส่วนอื่นๆ ของมอเตอร์จะต้องสามารถทนอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นได้ โดยเมื่ออุณหภูมิสูงฉนวนจะเสื่อมสภาพ ทำให้เกิดการเสียไดอิเล็กทริกขึ้นที่ฉนวนในที่สุดก็มีผลทำให้มอเตอร์ไหม้ วัสดุฉนวนจะแยกออกเป็นชนิด (Class) ตามสภาพการทนความร้อนโดยที่ไม่เสื่อมสภาพ

- Class Y อุณหภูมิใช้งานสูงสุด 90 °C ใช้วัสดุที่ทำจากฝ้ายชนิดที่ไม่มีวัสดุอื่นเจือปน เช่น ไหมธรรมชาติ กระดาษเซลลูโลสอาซิเตต ใยวัลคาไนซ์ ฯลฯ ไม่มีการชุบวานิช หรือน้ำมัน เช่น กระดาษคร๊าฟ ไฟเบอร์แข็ง

- Class A ปัจจุบันมีใช้งานน้อยมาก อุณหภูมิใช้งานสูงสุด 105 °C ใช้วัสดุคล้ายกับ Class Y แต่มีการชุบวานิชหรือน้ำมัน เช่น ผ้าชุบวานิช กระดาษชุบวานิช และผ้าไหมชุบวานิช ฯลฯ

- Class E อุณหภูมิใช้งานสูงสุด 120 °C ใช้วัสดุ เช่น โพลิยูริเทน โพลิเอสเตอร์(ไมลาร์) อีป๊อกซี่ เมลาไมน์ และฟีนอลเรซิน ฯลฯ ตัวอย่างเช่น โพลิเอสเตอร์ฟิล์ม ที่ใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า

- Class B อุณหภูมิใช้งานสูงสุด 130 °C ใช้วัตถุดิบที่ทำมาจากไมก้า ใยหิน ใยแก้ว ผสมด้วยกาว ตัวอย่าง เช่น ใยแก้ว เอสเบสตอสและเมลาไมน์ ชนิดมีสารอินทรีย์ ฯลฯ

- Class F อุณหภูมิใช้งานสูงสุด 155 °C ใช้วัตถุดิบที่ทำจากไมก้า ใยหิน ใยแก้วผสมกับกาวพวกซิลิโคนเรซิน ตัวอย่างเช่น วานิชใยแก้ว วานิชใยหิน และฟิล์มโพลิเอไมด์ (เคฟตอน โนเมก)

- Class H อุณหภูมิใช้งานสูงสุด 180 °C ใช้วัตถุที่ทำจากไมก้า ใยหิน ใยแก้ว ผสมกับกาวพวกซิลิโคนเรซิน หรือกาวอื่นที่คุณสมบัติเทียบเท่า ตัวอย่างเช่น ยางซิลิโคนไมก้า แผ่นซิลิโคน (Flexible Silicone, Silicone Vanish Glass Cloth, Mica,)

- Class N อุณหภูมิใช้งานสูงสุด 200 °C ทำจากวัตถุที่ได้ทดสอบแล้วว่ามี Thermal life 200 °C

- Class R อุณหภูมิใช้งานสูงสุด 220 °C ทำจากวัตถุที่ได้ทดสอบแล้วว่ามี Thermal life 220 °C

- Class S อุณหภูมิใช้งานสูงสุด 240 °C ทำจากวัตถุที่ได้ทดสอบแล้วว่ามี Thermal life 240 °C

- Class C อุณหภูมิใช้งานสูงกว่า 240 °C ใช้วัสดุเช่น ไมก้า กระเบื้อง เคลือบแก้วควอตซ์ และสารอื่นๆ ที่ได้ทำการทดสอบแล้วว่ามี Thermal life สูงกว่า 240 °C

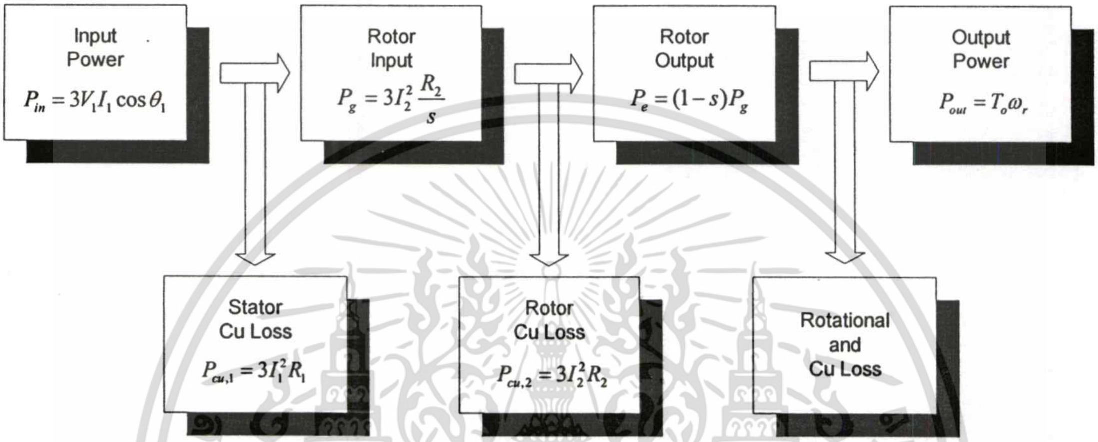
สำหรับฉนวนมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็น Class F อุณหภูมิใช้งานสูงสุด 155 °C

2.4.4 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าและกำลังสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การเปลี่ยนกำลังงานไฟฟ้าให้เป็นกำลังงานกลของมอเตอร์นั้น จะเกิดขึ้นที่โรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ กำลังอินพุทไม่ได้เกิดจากการป้อนไฟฟ้าให้กับโรเตอร์โดยตรง แต่เป็นการ

ถ่ายทอดผ่านทางช่องว่างอากาศด้วยการเหนี่ยวนำ ไฟสลับที่ป้อนให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และความถี่ขึ้นที่โรเตอร์

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามอเตอร์จะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานชนิดอื่นกระจายอยู่ตามส่วนต่างๆ ของมอเตอร์ ได้แก่ กำลังสูญเสียในรูปความร้อน ในขดลวดสเตเตอร์ และโรเตอร์ กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ส่วนที่เหลือจะเป็นกำลังกลที่ขับโหลด ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่มอเตอร์แบบสามเฟสและกำลังงานกลที่จ่ายโหลดดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 บล็อกไดอะแกรมการส่งผ่านกำลังงานของมอเตอร์สามเฟส

จากบล็อกไดอะแกรม กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ (Input Power) ในรูปที่แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ ซึ่งส่วนใหญ่จะสูญเสียในแกน (Core Loss) ในรูปความร้อนกำลังส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านช่องว่างอากาศให้กับโรเตอร์ เรียกว่ากำลังงานในช่องว่างอากาศ (Power Across air gap) เมื่อถ่ายเทกำลังงานให้กับโรเตอร์ ส่วนหนึ่งจะเกิดกำลังงานสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน (Rotor Copper Loss) ส่วนที่เหลือจะเป็นกำลังงานที่ส่งออกจากโรเตอร์ (Electromagnetic Power) ซึ่งเป็นกำลังงานกล ในส่วนนี้จะสูญเสียกำลังงานไปเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านลมขณะมอเตอร์หมุน (Friction and Windage Loss) จากนั้นกำลังงานที่เหลือจะเป็นกำลังงานกลที่ไปขับภาระทางกล (Output Power)

การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) เกิดขึ้นที่โรเตอร์และสเตเตอร์ แต่ในขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วใกล้ความเร็วซิงโครนัส การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิวของโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กหมุนน้อยมาก เมื่อเทียบกับส่วนที่เกิดขึ้นในสเตเตอร์ด้วยเหตุนี้การสูญเสียที่เกิดขึ้นจึงรวมไว้ด้วยกันในสเตเตอร์เท่านั้น

ในขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วเพิ่มขึ้นทำให้เกิดความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านลมมากขึ้น แต่จะทำให้การสูญเสียในแกนลดลง จึงได้รวมการสูญเสียเหล่านี้เข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยกันเรียกว่า Rotational and Losses และพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลง

กำลังไฟฟ้าอินพุทที่ป้อนให้กับมอเตอร์ (Input Power)

$$P_{in} = 3V_1 I_1 \cos\theta_1 \tag{2.11}$$

กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในขดลวดสเตเตอร์ (Stator Copper Loss)

$$P_{cu,1} = 3I_1^2 R_1 \tag{2.12}$$

กำลังในช่องว่างอากาศ (Power Across Air-gap)

$$P_g = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \tag{2.13}$$

กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในโรเตอร์ (Rotor Copper Loss)

$$P_{cu,2} = 3I_2^2 R_2 = sP_g \tag{2.14}$$

กำลังที่ออกจากโรเตอร์ (Electromagnetic Power)

$$P_e = P_g - P_{cu,2} = (1-s)P_g \tag{2.15}$$

แรงบิดที่ได้จากการเหนี่ยวนำในโรเตอร์ (Electromagnetic torque)

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} = \frac{P_g}{\omega_s} \tag{2.16}$$

กำลังที่ไปขับโหลด (Output Power)

$$P_{out} = P_e - P_r = T_o \omega_r \tag{2.17}$$

แรงบิดทางกล (Output Torque)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_o = \frac{P_{out}}{\omega_r} \quad (2.18)$$

เมื่อ

$$\omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} = \frac{4\pi f}{P} \quad (2.19)$$

$$\omega_r = \frac{2\pi N_r}{60} = (1-s)\omega_s \quad (2.20)$$

โดยที่ ω_s คือ ความเร็วซิงโครนัสเชิงมุม, rad/s

ω_r คือ ความเร็วโรเตอร์เชิงมุม, rad/s

พลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียที่เกิดขึ้นในมอเตอร์

- การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss)
- การสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ (Stator Copper Loss)
- การสูญเสียในโรเตอร์ (Rotor Copper Loss)
- การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านลมขณะมอเตอร์หมุน (Friction and Windage Loss)

เมื่อนำการสูญเสียมารวมกันจะเป็นพลังงานไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์

$$\text{Power Loss} = \text{Power Input} - \text{Power Output} \quad (2.21)$$

2.4.5 ความเร็วและค่าต่างๆที่สัมพันธ์กับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อทำการป้อนไฟฟ้าให้กับขดลวดสเตเตอร์แล้วจะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้น ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์และความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ป้อนให้ขดลวดมอเตอร์ โดยที่ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนนี้จะแปรผันโดยตรงกับความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์แต่จะแปรผกผันกับกับจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ตัวนั้น ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนนี้เรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed, N_s)

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (2.22)$$

เมื่อ N_s คือ ความเร็วซิงโครนัส ; rpm (รอบต่อนาที)

f คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้า ; Hertz (ไซเกิลต่อนาที)

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก ; Pole (ขั้ว)

สลิป (Slip หรือ s) ความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัส (N_s) กับความเร็วของโรเตอร์ (N_r) หรือเรียกว่าความเร็วสลิป (Slip Speed) ในทางปฏิบัติความเร็วของโรเตอร์จะช้ากว่า

ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนบนตัวสเตเตอร์ (N_s) ถ้าความเร็วของรอบโรเตอร์หมุนเท่ากับสนามแม่เหล็กหมุนแสดงว่าไม่มีความเร็วสัมพัทธ์ (Relative speed) ก็จะไม่เกิดเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ขดลวดโรเตอร์และไม่มีกระแสไหลในวงจรโรเตอร์ทำให้ไม่มีแรงบิดที่เกิดจากการดูดและผลักทางขั้วแม่เหล็กที่จะเร่งให้ตัวโรเตอร์หมุนจึงเป็นเหตุให้ความเร็วของโรเตอร์ต้องน้อยกว่าของสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ดังนั้น

ค่าสลิป $$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \qquad (2.23)$$

s : Slip

N_s : Synchronous Speed (rpm)

N_r : Rotor Speed (rpm)

ความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดโรเตอร์อยู่ในสภาวะอยู่กับที่ ความถี่ในวงจรโรเตอร์ (Rotor Frequency) จะมีค่าเท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว N_r อัตราการตัดสนามแม่เหล็กจะมีค่าเท่ากับรอบต่อนาที $N_s - N_r$ ความถี่ในวงจรโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับ สลิปสปีด โดยมีสมการในรูปแบบเดียวกันกับสมการของความเร็วซิงโครนัส

Slip Speed $$sN_s = N_s - N_r \text{ rpm} \qquad (2.24)$$

Rotor Speed $$N_r = (1-s)N_s \text{ rpm} \qquad (2.25)$$

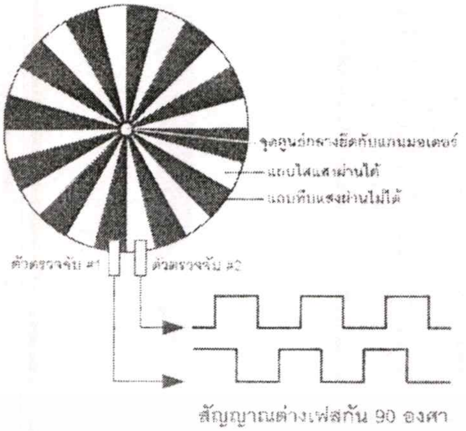
Rotor Frequency $$f_r = sf \text{ Hz} \qquad (2.26)$$

ขณะมอเตอร์เริ่มหมุน (Starting) โรเตอร์หยุดนิ่งอยู่กับที่ $s = 1$ Rotor Frequency เท่ากับ Synchronous Frequency

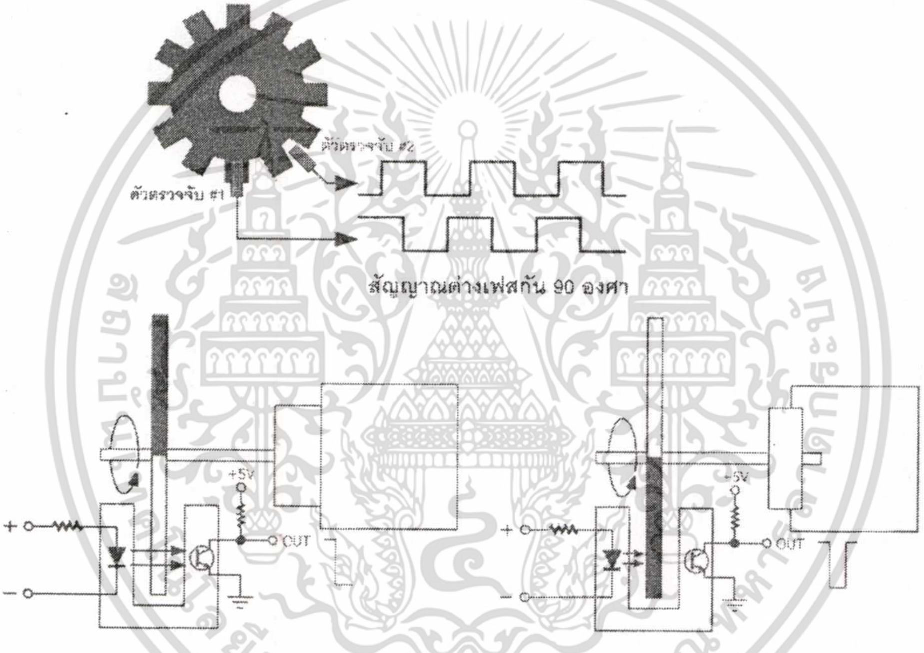
2.5 ตัวเข้ารหัสความเร็วรอบ

ตัวเข้ารหัสความเร็วรอบหรือที่เรียกว่า Encoder นั้นมีหน้าที่หลักคือการตรวจจับความเร็วรอบในการหมุนของตัวมอเตอร์ซึ่งจะให้ข้อมูลเป็นพัลส์ส่วนจำนวนพัลส์ต่อการหมุน 1 รอบ นั้นจะขึ้นกับความละเอียดของ Encoder แต่ละตัว ซึ่ง Encoder ที่นิยมใช้มีทั้งแบบใช้การตรวจจับแสงและแบบที่ใช้จานแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ตัวเข้ารหัสแบบสะท้อนแสง



(ข) ตัวเข้ารหัสแบบตัดลำแสง

รูปที่ 2.16 ลักษณะทางโครงสร้างของ Encoder แบบควอดราเจอร์ (QEI)

ตัวเข้ารหัสในรูปที่ 2.16 มีชื่อเรียกว่า ตัวเข้ารหัสอินครีเมนตัล (incremental encoder) โครงสร้างของตัวเข้ารหัสแบบนี้ประกอบด้วยจานเข้ารหัส (encoder wheel) และอุปกรณ์ตรวจจับ (detector) ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งแบบตรวจจับแสงและแบบตรวจจับสนามแม่เหล็ก ในกรณีตรวจจับแสงยังแบ่งออกเป็น แบบสะท้อนแสงและแบบตัดลำแสง สิ่งสำคัญหลักคือ จานเข้ารหัสโดยปกติจะต่อกับแกนของมอเตอร์ เพื่อให้สามารถหมุนไปตัดลำแสงหรือสะท้อนกับแสงของตัวตรวจจับเกิดเป็นสัญญาณพัลส์ออกมา โดยพัลส์ที่ได้จะมีเฟสต่างกัน 90° เพื่อให้สามารถระบุทิศทางการหมุนของตัวมอเตอร์ได้ เช่น ถ้าเฟส 1 นำหน้าแสดงว่าทิศทางการหมุนไปข้างหน้า ในทางกลับกัน ถ้าเฟส 2 นำหน้าแสดงว่ามอเตอร์หมุนกลับทางโดยหมุนถอยหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
หลักการทำงานและการออกแบบ

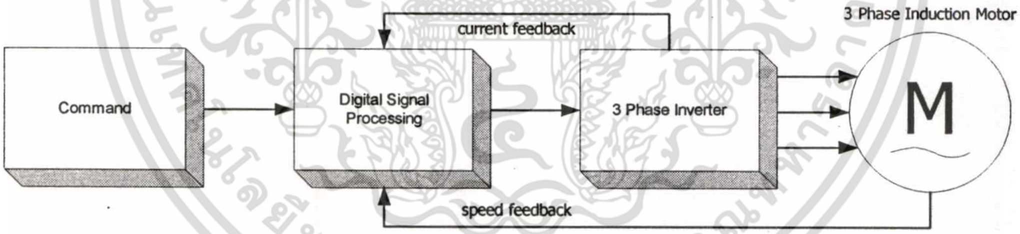
การทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์ 3 เฟส นั้นสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วนหลักๆ คือ

- Command เป็นส่วนที่ทำหน้าที่รับคำสั่งจากภายนอก

- Digital Signal Processing (DSP) เป็นตัวประมวลผลหลักของระบบควบคุม ทำหน้าที่สร้างสัญญาณ พี ดับบลิว เอ็ม รวมทั้งเวลาหยุดพัก (dead time) ของอุปกรณ์กำลัง ให้เหมาะสมกับความเร็วรอบและแรงบิดที่ต้องการ โดยใช้การควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่คงที่ (constant V/Hz) ซึ่งได้รับการป้อนกลับสัญญาณจากตัวตรวจจับความเร็ว (speed sensor) และตัวป้อนกลับกระแสผ่าน A/D Converter ภายในตัว DSP

- 3 Phase Inverter ใช้โครงสร้างอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบแหล่งแรงดัน (Voltage Source Inverter ,VSI) ดังรูปที่ 3.5 ประกอบด้วย IGBT 6 ตัว

- 3 Phase Induction Motor เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากอินเวอร์เตอร์เป็นพลังงานกล

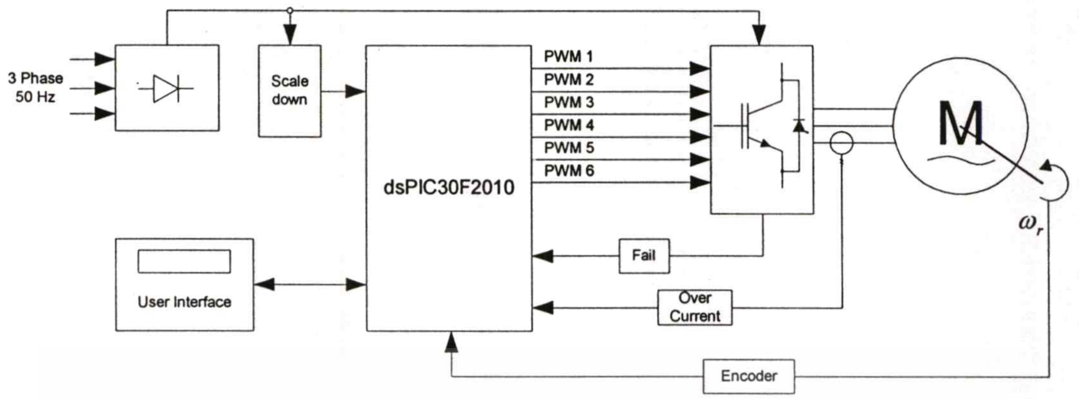


รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมมอเตอร์ 3 เฟส

3.1 ระบบควบคุมมอเตอร์ 3 เฟส

ส่วนประกอบของระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสดังรูปที่ 3.2 ประกอบด้วย Rectifier, DSP, Voltage Source Inverter, Induction Motor และ User Interface ซึ่งการทำงานของระบบรวมทั้งสร้าง PWM นั้นทำโดย DSP ทั้งหมด ส่วนรูปแบบการสวิตช์ใช้การควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่คงที่ (Constant V/Hz) ด้วยความถี่การสวิตช์ 10 kHz และรูปที่ 3.3 เป็นโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แบบ VSI ทำงานที่แรงดัน 540 VDC การสวิตช์จะแยกอิสระระหว่างเฟสด้วยสัญญาณ PWM จาก DSP ผ่านวงจร Isolator ส่วนตัวมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้เป็นแบบ 3 เฟส 380/220V 4 Pole ขนาด 1 แรงม้ายี่ห้อ Mitsubishi ส่วนรายละเอียดของวงจรจะอธิบายต่อไป

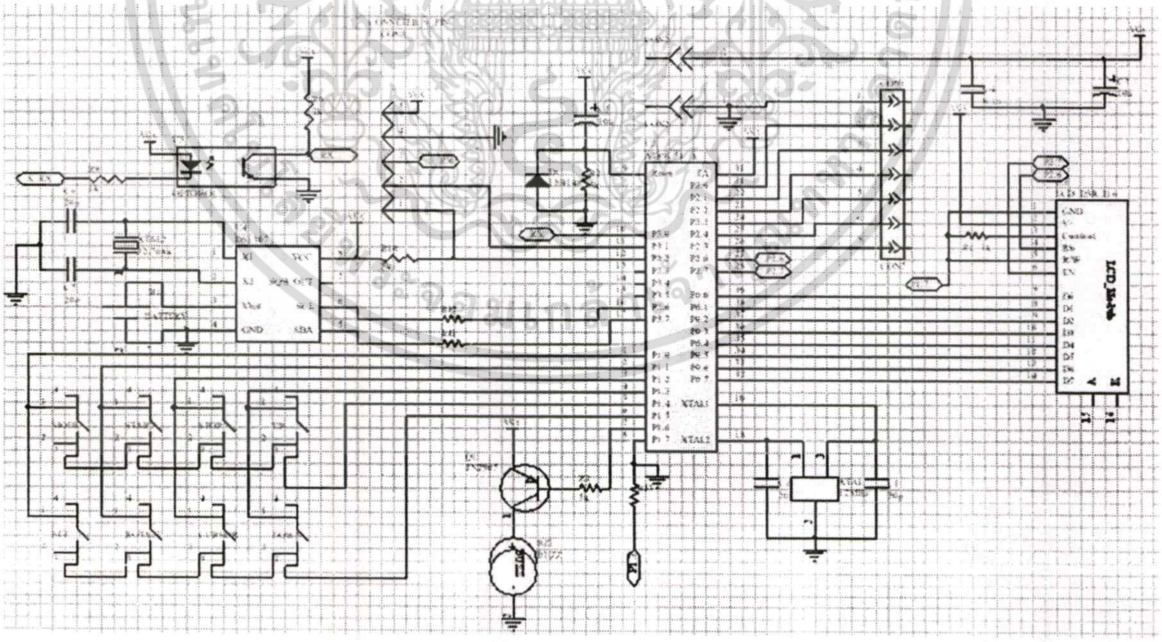
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบของระบบควบคุม

3.2 วงจรส่วนติดต่อกับผู้ใช้

วงจรประกอบด้วยไมโครคอนโทลเลอร์เบอร์ AT89C51 ทำหน้าที่รับคำสั่งผ่านการกดสวิตช์และแสดงผลด้วยจอ LCD ขนาด 16x2 Digit จากนั้นส่งผ่านคำสั่งไปยัง DSP ผ่านพอร์ตอนุกรมด้วยความเร็วในการส่ง 300 bit/S



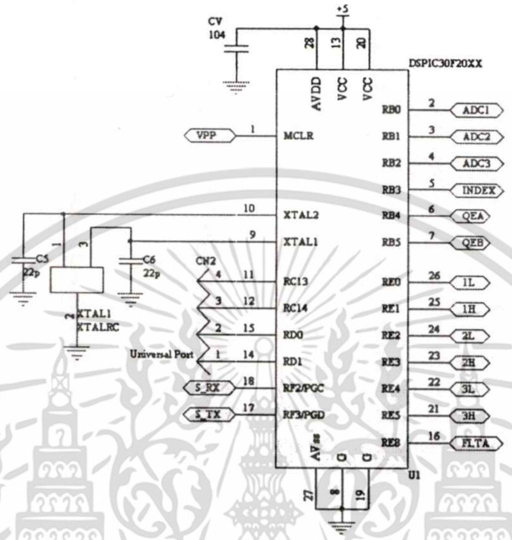
รูปที่ 3.3 วงจรส่วนติดต่อกับผู้ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

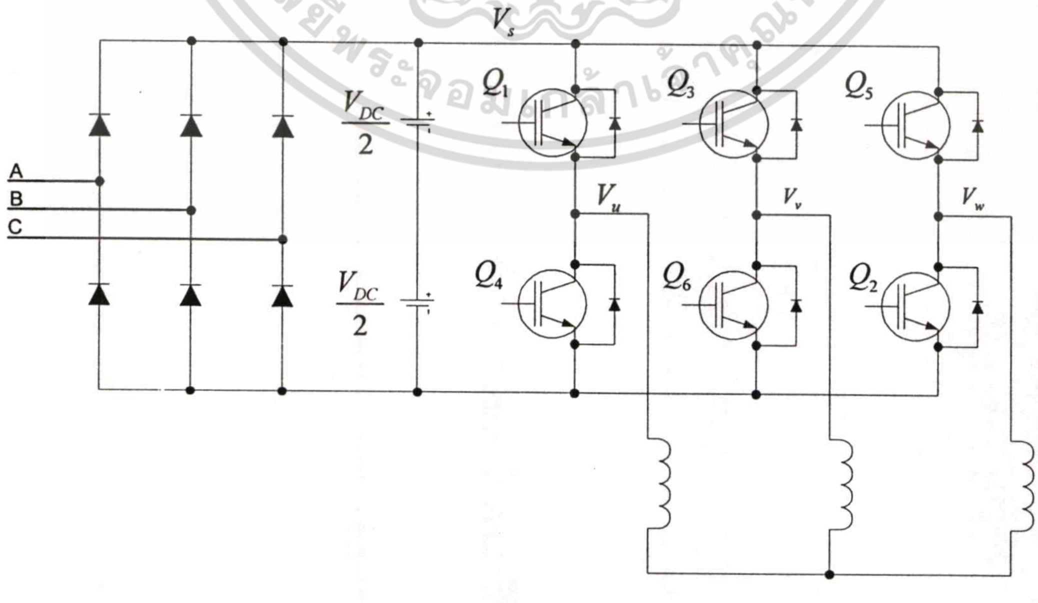
3.3.1 วงจรส่วนของตัวประมวลผลเชิงเลข (DSP)

การทำงานของส่วน DSP จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณ PWM ตามคำสั่งที่รับมาจากส่วนของไมโครคอนโทลเลอร์รวมทั้งสัญญาณป้อนกลับต่างๆ ซึ่งตัว DSP ใช้เบอร์ dsPIC30F2010 ความถี่สัญญาณนาฬิกาที่ 80 MHz



รูปที่ 3.4 วงจรส่วนของตัว DSP

3.3.2 วงจรเร็คติไฟล์และวงจรอินเวอร์เตอร์



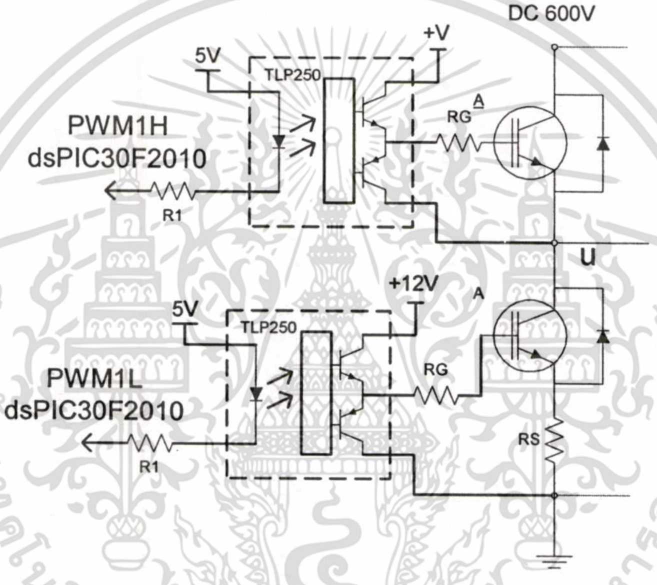
รูปที่ 3.5 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ VSI ใช้ IGBT สำหรับควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรอินเวอร์เตอร์ VSI ในรูปที่ 3.5 ประกอบด้วยภาคเร็คติไฟล์แบบ 6 พัลส์ทำหน้าที่เร็คติไฟล์แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส (A,B,C) ด้านเข้าโดยมีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่เพื่อสร้างแหล่งจ่ายกระแสให้กับภาคสวิตช์ที่ประกอบด้วย IGBT 6 ตัวเบอร์ IRG4PH50KD ทำการสวิตช์ที่ความถี่ 10KHz โดยระดับแรงดันไฟตรงเท่ากับ 540VDC ที่แรงดันกระแสสลับด้านเข้าเฟส A,B,C เท่ากับ 220VAC ซึ่งการสวิตช์ของ $Q_1 - Q_6$ ถูกกำหนดโดย DSP ผ่านวงจร Opto Isolator เอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ V_u, V_v, V_w ต่อเข้ากับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.3.3 วงจรแยกโดด (Isolator)

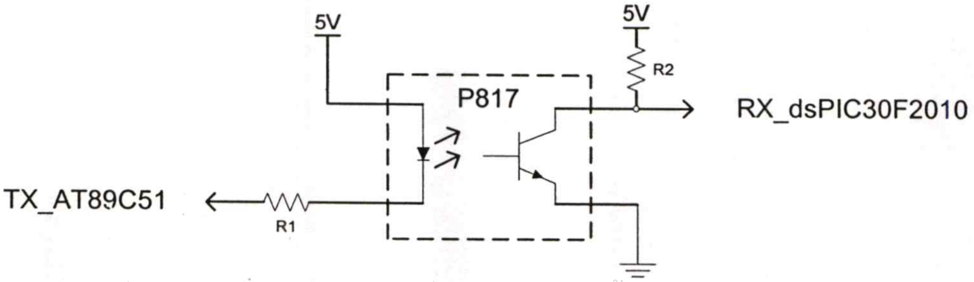
วงจรแยกโดดสำหรับขับนำ IGBT ประกอบด้วย Opto Isolator เบอร์ TLP250 ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรแยกโดดสำหรับขับเกตของ IGBT

3.4 วงจรรับส่งข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรม

วงจรรับส่งข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรมระหว่างวงจรส่วนผู้ใช้ (MCS-51) กับวงจรส่วนสร้างพี ดับบลิว เอ็ม (DSP) จะทำงานในโหมดกระแสเพื่อป้องกันการรบกวนจากความถี่การสวิตช์ ดังในรูปที่ 3.7 ประกอบด้วย Opto Isolator เบอร์ P817



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

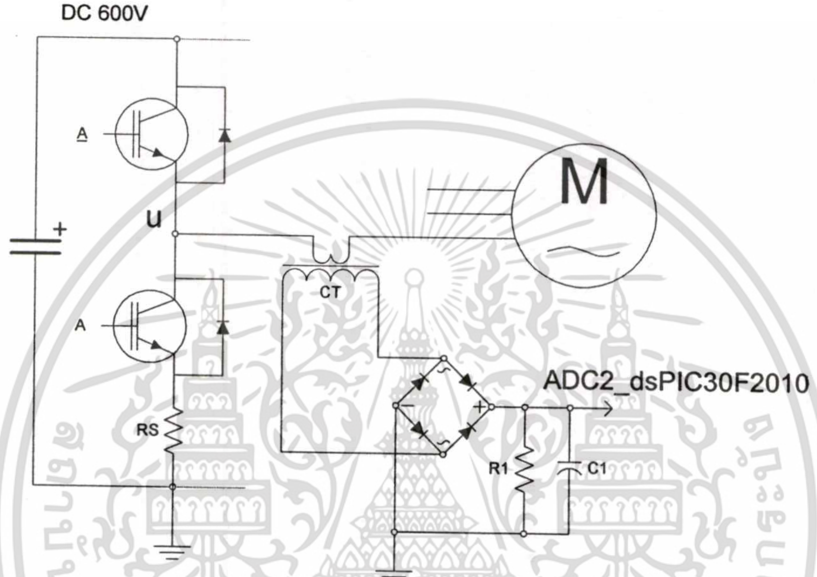
รูปที่ 3.7 วงจรรับส่งข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรม

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 วงจรป้อนกลับ

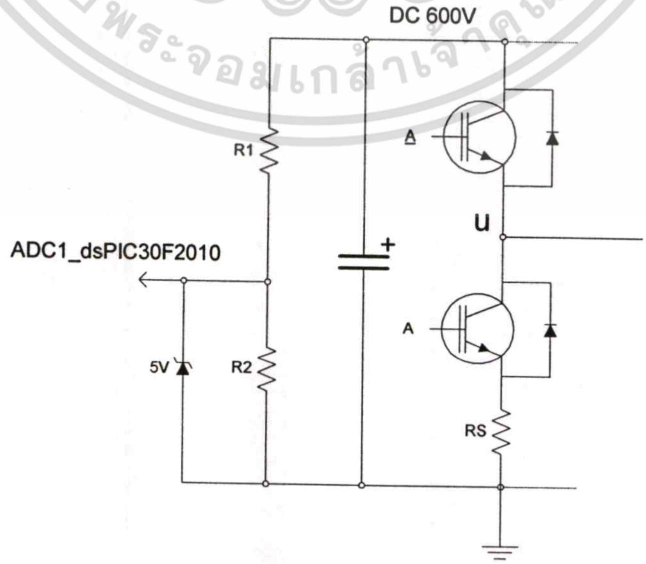
3.5.1 วงจรป้อนกลับกระแส

วงจรป้อนกลับกระแสดังรูปที่ 3.8 จะทำการตรวจจับค่ากระแสเกินที่ไหลจากชุดสวิตซ์เข้าไปยังมอเตอร์ด้วย Current Transformer (CT) ผ่านวงจรเร็คติไฟล์เข้าไปยังพอร์ตแปลงสัญญาณ Analog to Digital, A/D เพื่อป้องกันวงจรเสียหายของอุปกรณ์กำลังจากกระแสเกิน



รูปที่ 3.8 วงจรตรวจจับกระแสเฟสที่จ่ายให้มอเตอร์

3.5.2 วงจรตรวจจับระดับแรงดันไฟตรง



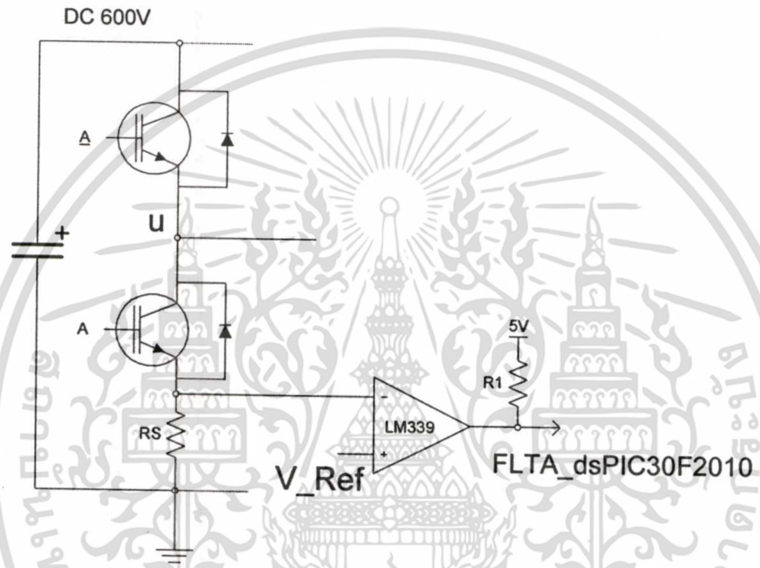
รูปที่ 3.9 วงจรตรวจจับระดับแรงดันไฟตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 เป็นวงจรแบ่งแรงดันสำหรับตรวจจับระดับแรงดันไฟตรงโดยใช้สัดส่วน 200 เท่าของค่าจริงกำหนดให้ R1 = 200kΩ, R2 = 1kΩ

3.5.3 วงจรตรวจจับการช็อตกิ้ง

วงจรนี้ใช้การตรวจจับกระแสที่ไหลผ่าน RS ด้วยการตรวจจับแรงดันผ่านวงจร Comparator (LM339) โดยค่า RS มีค่าเท่ากับ 0.1Ω ค่ากระแสที่ตรวจจับคือ 10A เมื่อเกิดกรณีดังกล่าวขึ้นตัว DSP จะสั่งหยุดการสร้าง PWM ทันที

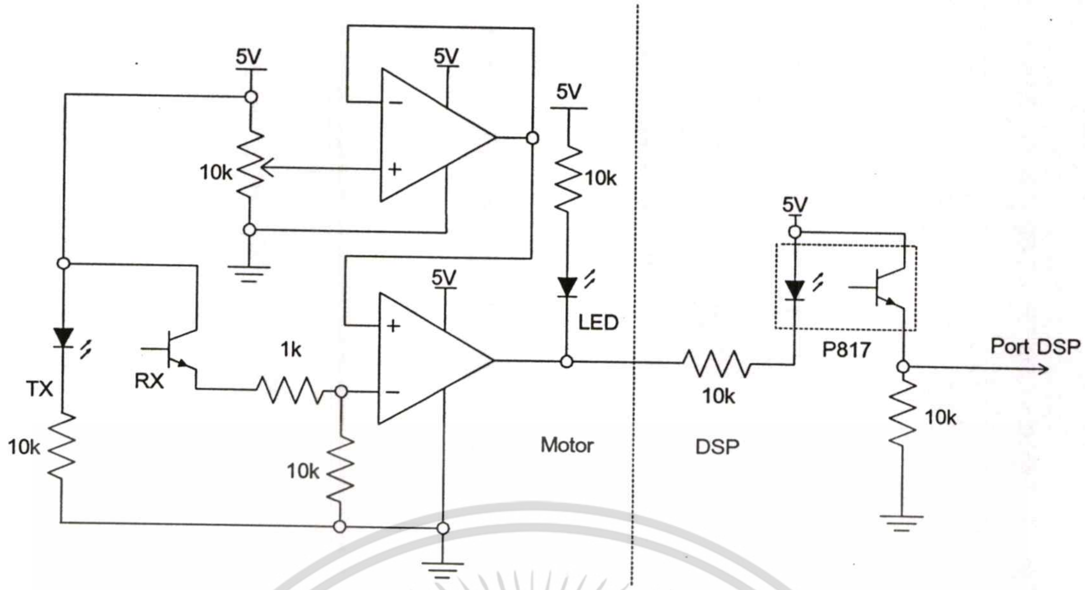


รูปที่ 3.10 วงจรตรวจจับการช็อตกิ้งของ IGBT

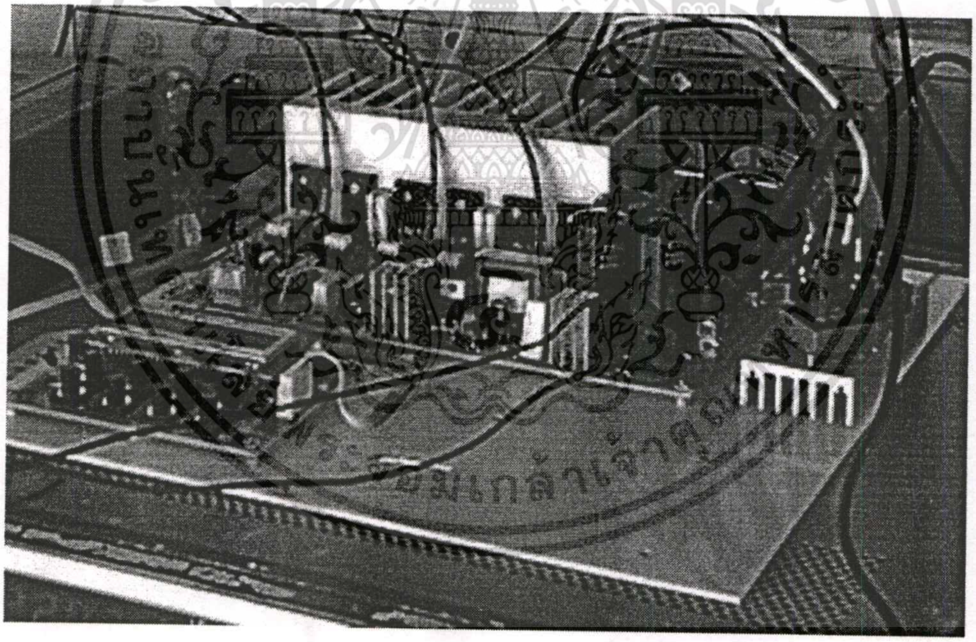
3.5.4 วงจรตรวจจับความเร็วรอบ

วงจรตรวจจับความเร็วของมอเตอร์ถูกติดตั้งไว้ที่ด้านหลังของพัดลมระบายอากาศซึ่งจะให้สัญญาณพัลส์จำนวน 9 พัลส์ต่อการหมุนหนึ่งรอบตามจำนวนใบพัดลมระบายอากาศ การทำงานของวงจรนั้นตัวส่งอินฟราเรด (TX) จะทำการส่งตลอดเวลาเมื่อตัวตรวจแสงอินฟราเรด (RX) จับการสะท้อนแสงจากการเคลื่อนที่ผ่านของใบพัดลมระบายอากาศได้ ก็จะส่งผ่านสัญญาณดังกล่าวผ่านวงจร Op-amp และส่งค่าต่อไปยังบอร์ด DSP ผ่าน P817 ในรูปแบบกระแสเพื่อป้องกันการรบกวนจากความถี่การสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 วงจรตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์



รูปที่ 3.12 บอร์ดต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ

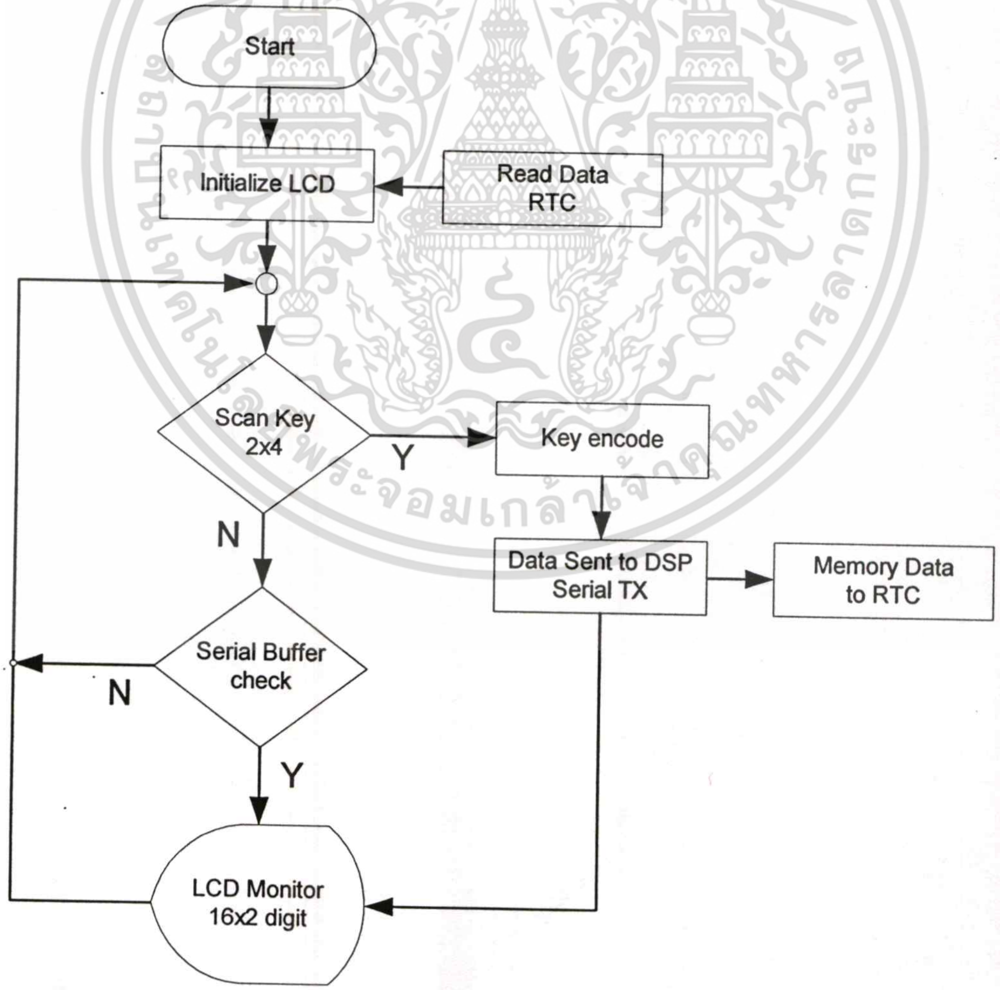
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การพัฒนาโปรแกรม

ส่วนของการพัฒนาโปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การพัฒนาส่วนติดต่อกับผู้ใช้ พัฒนาบน Microcontroller เบอร์ AT89C51 ของบริษัท ATMEL และการพัฒนาส่วนสร้าง PWM พัฒนาบน DSP เบอร์ dsPIC30F2010 ของบริษัท Microchip

4.1 ลำดับขั้นการทำงานของโปรแกรมส่วนติดต่อกับผู้ใช้

การทำงานของส่วนติดต่อผู้ใช้จะทำหน้าที่รับคำสั่งต่างๆที่ผู้ใช้กำหนดแล้วส่งค่าดังกล่าวให้ตัว DSP ผ่านทางการส่งข้อมูลแบบอนุกรม รวมถึงแสดงค่าต่างๆ ที่ได้รับจาก DSP เช่น ความเร็วรอบ

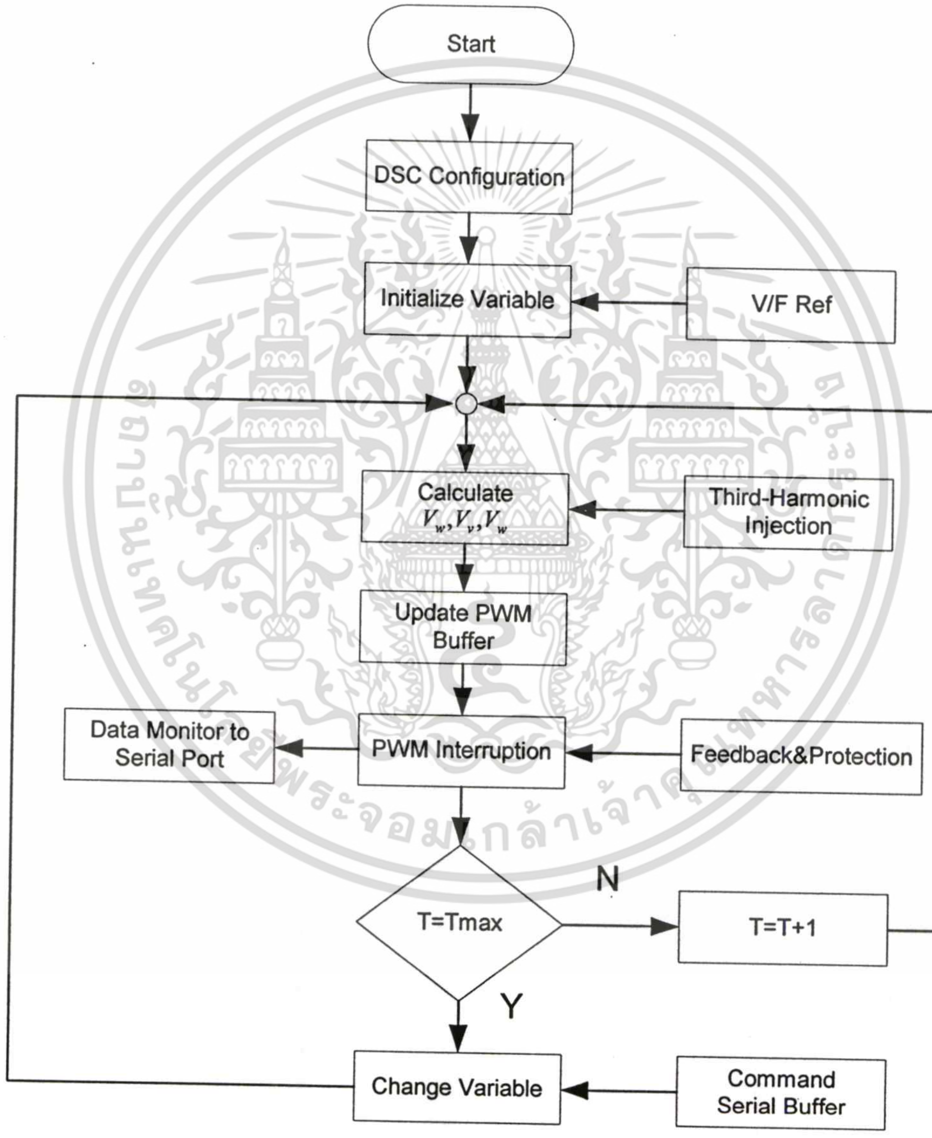


รูปที่ 4.1 Flowchart สำหรับโปรแกรมส่วนติดต่อผู้ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ลำดับขั้นของโปรแกรมสร้างสัญญาณ PWM

ลำดับขั้นการทำงานของ DSP ในรูปที่ 6 เริ่มจากการกำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆ จากนั้นจะเข้าสู่ลูปการสร้าง PWM ซึ่งทำการคำนวนหา duty ที่เหมาะสมทุกๆ 100 μS จากการอ้างอิงรูปแบบการสวิตช์แบบแรงดันต่อความถี่คงที่และเทคนิคการสร้าง พี ดับบลิว เอ็ม แบบเธิดฮาร์มอนิกส์อินเจ็คชั่น ทำให้สามารถที่จะปรับความถี่หลักมูลได้กว้างตั้งแต่ 0.01-50 Hz และความละเอียดในการเปลี่ยนความถี่น้อยกว่า 0.01 Hz

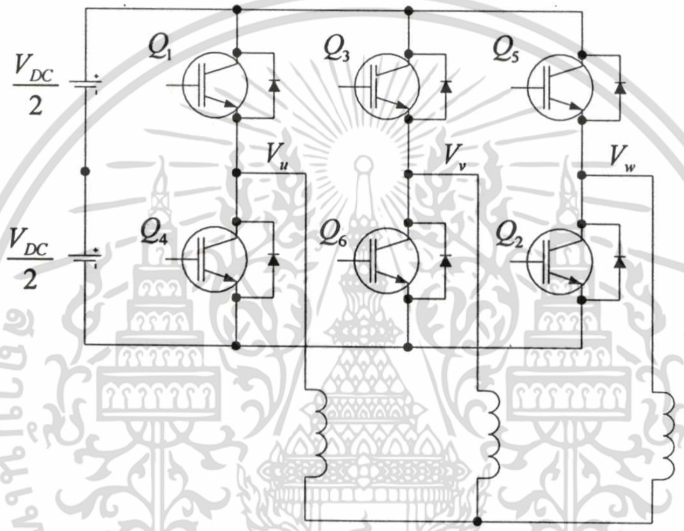


รูปที่ 4.2 Flowchart สำหรับส่วนสร้าง Third-Harmonic Injection PWM

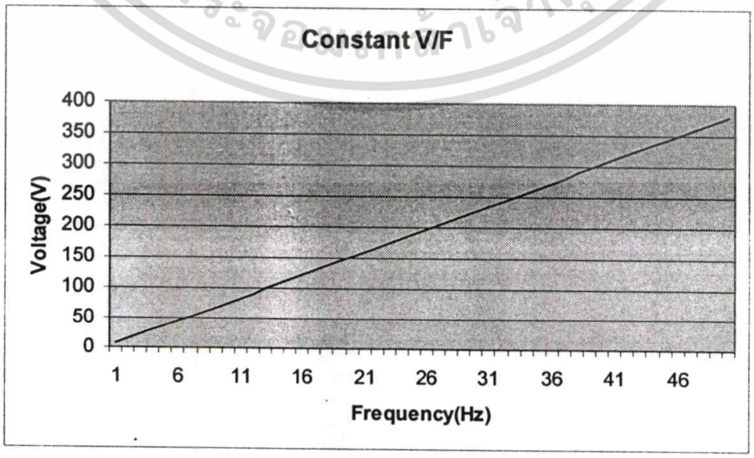
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 เทคนิคการสร้างสัญญาณ PWM

การทำงานของส่วนสร้างสัญญาณ PWM สำหรับขับนำอุปกรณ์สวิตช์ (IGBT) ของเฟส (V_u,V_v,V_w) นั้นใช้ความถี่การสวิตช์ที่ 10KHz โดยในแต่ละเฟสของของอินเวอร์เตอร์ใช้การสวิตช์แรงดันแบบ 2 ขั้ว (bipolar voltage switching) มีเฟสต่างกัน 120° ทำงานเป็นอิสระ ซึ่ง V_o เฟสมีค่าแรงดันทั้งบวกและลบ เมื่อนำ 2 เฟสมาเปรียบเทียบกันสัญญาณที่ได้จะเป็นแบบการสวิตช์ขั้วเดียว (unipolar voltage switch) จะสวิตช์ระหว่างค่าบวกกับศูนย์เป็นเวลาครึ่งคาบและอีกครึ่งคาบจะสวิตช์ระหว่างค่าศูนย์กับค่าลบ V_o ที่ได้จะมีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่การสวิตช์แต่ละเฟส



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของส่วนอุปกรณ์สวิตช์



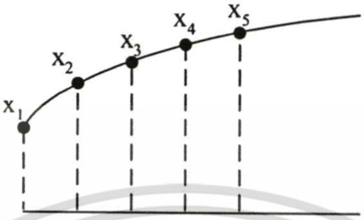
รูปที่ 4.4 ขนาดของแรงดันไลน์เทียบกับความถี่หลักมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ

ในรูปที่ 4.4 เป็นความสัมพันธ์ของแรงดันไลน์เทียบกับความถี่หลักมูลที่กำหนดโดย DSP

4.3.1 การคำนวณความกว้างพัลส์ที่เหมาะสม

การกำหนดความกว้างของพัลส์จะใช้วิธีคำนวณค่าสัดส่วน (Normalization) ของขนาด (Amplitude) ของฟังก์ชั่นไซน์เก็บไว้ในตัวแปร ซึ่งจำนวนตัวแปรที่ใช้ตลอดลูกคลื่นมีจำนวน 150 ค่า เพื่อที่จะนำตัวแปรดังกล่าวมาคำนวณความกว้างของพัลส์ที่เหมาะสม โดยที่ไม่มีการเก็บตาราง การสวิตช์



รูปที่ 4.5 การเก็บค่าขนาดของฟังก์ชั่นไซน์ไว้ในตัวแปร

ตัวอย่างการคำนวณหาระยะห่างระหว่างตัวแปร $\frac{360^o}{150} = 2.4^o$

โดยสามารถคำนวณหาขนาดของฟังก์ชั่นไซน์ ได้ตามสมการ 4.1

$$f(\phi_n) = 0.5 + \sin(\phi) \qquad (4.1)$$

$f(\phi_n)$ คือค่าสัดส่วนขนาดของฟังก์ชั่นไซน์ที่มุมใดๆ ($n = 1 - 150$)

ϕ คือมุมของฟังก์ชั่นไซน์

จากสมการที่ 4.1 สามารถหาค่าขนาดของตัวแปรที่ $x_1 - x_{10}$ ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างขนาดของตัวแปรที่ $x_1 - x_{10}$

ϕ_n	0	2.4	4.8	7.2	9.6	12	14.4	16.8	19.2	21.6
n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f(\phi_n)$	0.500	0.541	0.583	0.625	0.666	0.707	0.748	0.789	0.828	0.868

$* n = 150, \phi = 357.6$

เมื่อได้ขนาดของฟังก์ชั่นไซน์แล้วก็จะนำค่าดังกล่าวไปเก็บไว้ในหน่วยความจำ RAM เพื่อสามารถนำกลับมาคำนวณความกว้างพัลส์ที่เหมาะสมต่อไป

ตัวอย่างวิธีการคำนวณความกว้างพัลส์

สมมุติว่าต้องการหาความกว้างพัลส์ของการสวิตช์ที่ความถี่หลักมูล 50Hz

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 20mS \qquad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t = \frac{1}{f_a} = \frac{1}{10kHz} = 100\mu S \tag{4.3}$$

$$p = \frac{T}{t} = \frac{20mS}{100\mu S} = 200 \tag{4.4}$$

T คือคาบเวลาของความถี่หลักมูล

f คือความถี่หลักมูล

t คือคาบเวลาการสวิตช์

f_a คือความถี่การสวิตช์

p คือจำนวนพัลส์ความถี่การสวิตช์ต่อคาบเวลาของความถี่หลักมูล

แนวคิดคือหาตำแหน่งกึ่งกลางของคาบเวลาการสวิตช์ (Center aligned) ว่าตรงกับมุม ϕ ที่เท่าไรของความถี่หลักมูล จากนั้นนำค่าดังกล่าวมาหาว่าค่ามุมอยู่ในช่วงใดของตัวแปรในตารางที่ 4.1 ด้วยวิธีการหาผลต่างของฟังก์ชั่น เช่นต้องการความกว้างพัลส์ลูกที่ 1 ของความถี่หลักมูลซึ่งกึ่งกลางของพัลส์ตรงกับ $\phi_1 = 0.9^o$

$$\overline{\phi_p} = \frac{360^o}{200} = 1.8^o$$

$$\phi_p = p * \overline{\phi_p} - \frac{\overline{\phi_p}}{2} ;\ p(1-200)$$

เมื่อได้ค่ามุม ϕ_p แล้วนำมาเทียบกับตัวแปรในตารางที่ 4.1 ซึ่งอยู่ในช่วงมุม ϕ_n ที่ 0^o-2.4^o

$$f(\phi_p) = \left(\frac{f(\phi_{n+1}) - f(\phi_n)}{\phi_{n+1} - \phi_n} \times (\phi_p - \phi_n) \right) + f(x_n) \tag{4.5}$$

$f(\phi_p)$ คือค่าสัดส่วนของขนาดความกว้างพัลส์ที่ต้องการ

ϕ_n คือมุมที่เก็บค่าอยู่ในตัวแปร

ϕ_p คือมุมที่ต้องการหาค่าสัดส่วนความกว้างพัลส์

จากสมการที่ 4.5 สามารถหาขนาดสัดส่วนความกว้างของพัลส์ $\phi_{p(1-10)}$ ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างค่าขนาดของสัดส่วนความกว้างพัลส์ $x_{p(1-10)}$

ϕ_p	0.9	2.7	4.5	6.3	8.1	9.9	11.7	13.5	15.3	17.1
p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f(\phi_p)$	0.515	0.546	0.577	0.609	0.640	0.671	0.701	0.732	0.763	0.793
$f(\phi'_p)$	0.515	0.547	0.578	0.609	0.640	0.671	0.702	0.733	0.763	0.794
Err(%)	0	0.1	0.1	0	0	0	0.1	0.1	0	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t = \frac{1}{f_a} = \frac{1}{10kHz} = 100\mu S \tag{4.3}$$

$$p = \frac{T}{t} = \frac{20mS}{100\mu S} = 200 \tag{4.4}$$

T คือคาบเวลาของความถี่หลักมูล

f คือความถี่หลักมูล

t คือคาบเวลาการสวิตช์

f_a คือความถี่การสวิตช์

p คือจำนวนพัลส์ความถี่การสวิตช์ต่อคาบเวลาของความถี่หลักมูล

แนวคิดคือหาตำแหน่งกึ่งกลางของคาบเวลาการสวิตช์ (Center aligned) ว่าตรงกับมุม ϕ ที่เท่าไรของความถี่หลักมูล จากนั้นนำค่าดังกล่าวมาหาว่าค่ามุมอยู่ในช่วงใดของตัวแปรในตารางที่ 4.1 ด้วยวิธีการหาผลต่างของฟังก์ชั่น เช่นต้องการความกว้างพัลส์ลูกที่ 1 ของความถี่หลักมูลซึ่งกึ่งกลางของพัลส์ตรงกับ $\phi_1 = 0.9^o$

$$\overline{\phi_p} = \frac{360^o}{200} = 1.8^o$$

$$\phi_p = p * \overline{\phi_p} - \frac{\overline{\phi_p}}{2};\ p(1-200)$$

เมื่อได้ค่ามุม ϕ_p แล้วนำมาเทียบกับตัวแปรในตารางที่ 4.1 ซึ่งอยู่ในช่วงมุม ϕ_n ที่ 0°-2.4°

$$f(\phi_p) = \left(\frac{f(\phi_{n+1}) - f(\phi_n)}{\phi_{n+1} - \phi_n} \times (\phi_p - \phi_n)\right) + f(x_n) \tag{4.5}$$

$f(\phi_p)$ คือค่าสัดส่วนของขนาดความกว้างพัลส์ที่ต้องการ

ϕ_n คือมุมที่เก็บค่าอยู่ในตัวแปร

ϕ_p คือมุมที่ต้องการหาค่าสัดส่วนความกว้างพัลส์

จากสมการที่ 4.5 สามารถหาขนาดสัดส่วนความกว้างของพัลส์ $\phi_{p(1-10)}$ ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างค่าขนาดของสัดส่วนความกว้างพัลส์ $x_{p(1-10)}$

ϕ_p	0.9	2.7	4.5	6.3	8.1	9.9	11.7	13.5	15.3	17.1
p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f(\phi_p)$	0.515	0.546	0.577	0.609	0.640	0.671	0.701	0.732	0.763	0.793
$f(\phi'_p)$	0.515	0.547	0.578	0.609	0.640	0.671	0.702	0.733	0.763	0.794
Err(%)	0	0.1	0.1	0	0	0	0.1	0.1	0	0.1

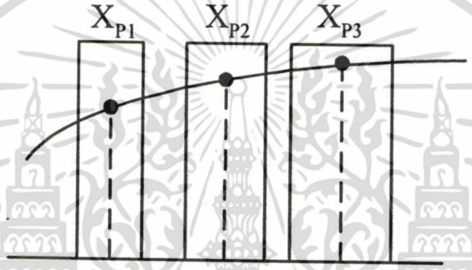
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่ได้จากสมการที่ 4.5 ($f(\phi_p)$) ในตารางที่ 4.2 มีค่าเข้าใกล้ค่าจริง ($f(\phi'_p)$) จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4.1 มาก จากค่า $f(\phi_p)$ ที่ได้เราก็จะนำไปแปลงเป็นค่าจริงด้วยการคูณอัตราการมอดูเลต m_p เข้าไป

$$f(\phi_m) = m_p\left(\frac{f(\phi_{n+1}) - f(\phi_n)}{\phi_{n+1} - \phi_n} \times (\phi_p - \phi_n)\right) + f(\phi_n) \tag{4.6}$$

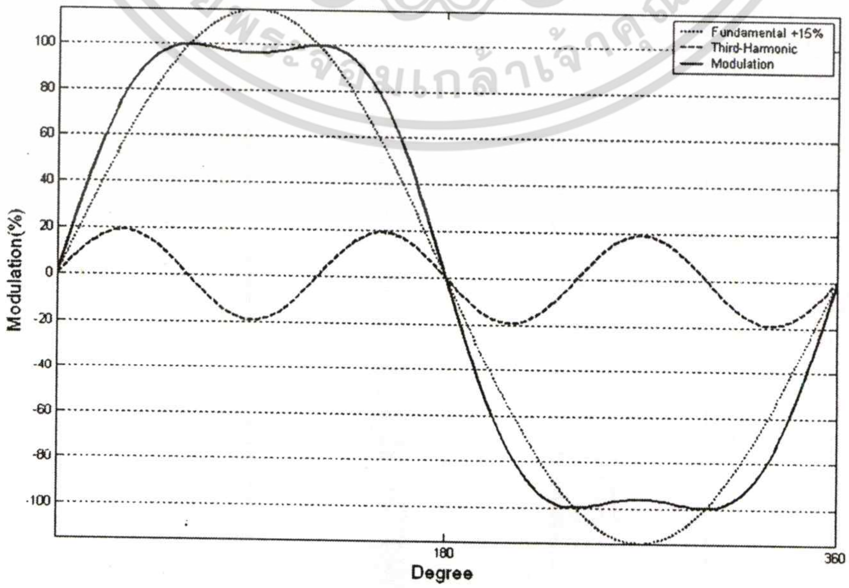
$f(\phi_m)$ คือขนาดความกว้างของพัลส์หน่วยเป็น(μS)

m_p คืออัตราการมอดูเลต(0-100%)



รูปที่ 4.6 การสร้างสัญญาณ PWM แบบปรับสัญญาณกึ่งกลาง

4.3.2 การคำนวณหาขนาดความกว้างของพัลส์เมื่อใช้เทคนิคการสร้าง PWM แบบ Third-Harmonic Injection



รูปที่ 4.7 การมอดูเลตแบบ Third-Harmonic Injection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 การมอดูเลตแบบเธิด ฮาร์มอนิกส์อินเจ็กชั่น เกิดจากผลรวมของฟังก์ชั่นไซน์ 2 ความถี่ผสมกันดังนั้นถ้าใช้วิธีผลต่างของฟังก์ชั่นจะได้ดังสมการที่ 4.7

$$f(\phi_{pt}) = 1.154\left[\left(\frac{f(\phi_{n+1}) - f(\phi_n)}{\phi_{n+1} - \phi_n} \times (\phi_p - \phi_n)\right) + f(\phi_n)\right] + 0.192\left[\left(\frac{f(\phi_{nt+1}) - f(\phi_{nt})}{\phi_{nt+1} - \phi_{nt}} \times (\phi_{pt} - \phi_{nt})\right) + f(\phi_{nt})\right] \quad (4.7)$$

$f(\phi_{pt})$ คือค่าสัดส่วนของขนาดความกว้างพัลส์เมื่อมอดูเลตแบบเธิด ฮาร์มอนิกส์อินเจ็กชั่น

$f(\phi_{nt})$ คือค่าสัดส่วนขนาดของฟังก์ชั่นไซน์ที่มุมใดๆของเทอมฮาร์มอนิกส์ที่ 3 ($n = 1 - 150$)

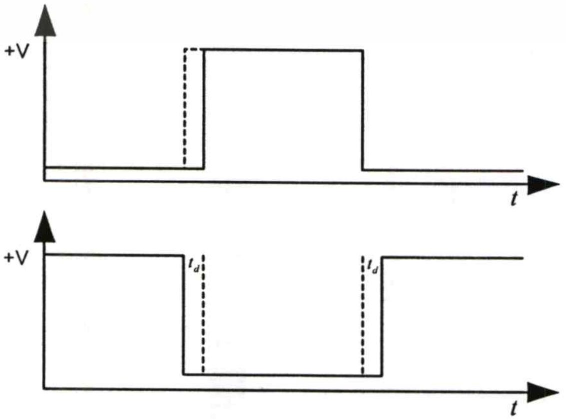
ϕ_{nt} คือมุมที่เก็บค่าอยู่ในตัวแปรของเทอมฮาร์มอนิกส์ที่ 3

ϕ_{pt} คือมุมที่ต้องการหาค่าสัดส่วนความกว้างพัลส์ของเทอมฮาร์มอนิกส์ที่ 3

การหาขนาดของฮาร์มอนิกส์ลำดับที่สาม ที่เหมาะสมด้วยการจำลองการทำงานบนโปรแกรม MicroSim Eval 8 จะได้ค่าอยู่ในช่วง 18.5%-20% ของความถี่หลักมูลและค่าที่ให้ผลดีที่สุดคือ 19.2% จากสมการที่ 4.7 เราสามารถหาขนาดของความกว้างพัลส์จากมอดูเลตแบบเธิด ฮาร์มอนิกส์อินเจ็กชั่น ด้วยการคูณ m_p เข้าไปจะได้ดังสมการที่ 4.8

$$f(\phi_{pt}) = m_p\left\{1.154\left[\left(\frac{f(\phi_{n+1}) - f(\phi_n)}{\phi_{n+1} - \phi_n} \times (\phi_p - \phi_n)\right) + f(\phi_n)\right] + 0.192\left[\left(\frac{f(\phi_{nt+1}) - f(\phi_{nt})}{\phi_{nt+1} - \phi_{nt}} \times (\phi_{pt} - \phi_{nt})\right) + f(\phi_{nt})\right]\right\} \quad (4.8)$$

4.3.3 การกำหนดเวลาหยุดพักของอุปกรณ์กำลัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.8 สัญญาณ PWM ขับเกตที่มี delay time

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ทำการแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงแหล่งที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดค่าเวลาหยุดพัก (dead time) สามารถกำหนดลงในรีจิสเตอร์ของตัว DSP ได้เลย ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้ $t_d = 1.5\mu S$

4.4 การออกแบบโปรแกรมส่วนการป้อนกลับสัญญาณ (feedback)

ส่วนของการป้อนกลับสัญญาณจะทำการตรวจสอบในทุกๆคาบการสวิตช์ของสัญญาณ PWM ซึ่งประกอบด้วย

- การป้อนกลับความเร็วรอบ (speed feedback)
- การป้อนกลับกระแส (current feedback)
- การป้อนกลับสัญญาณการช็อตกิ้งของ IGBT
- การป้อนกลับระดับแรงดันไฟตรง (DC level)

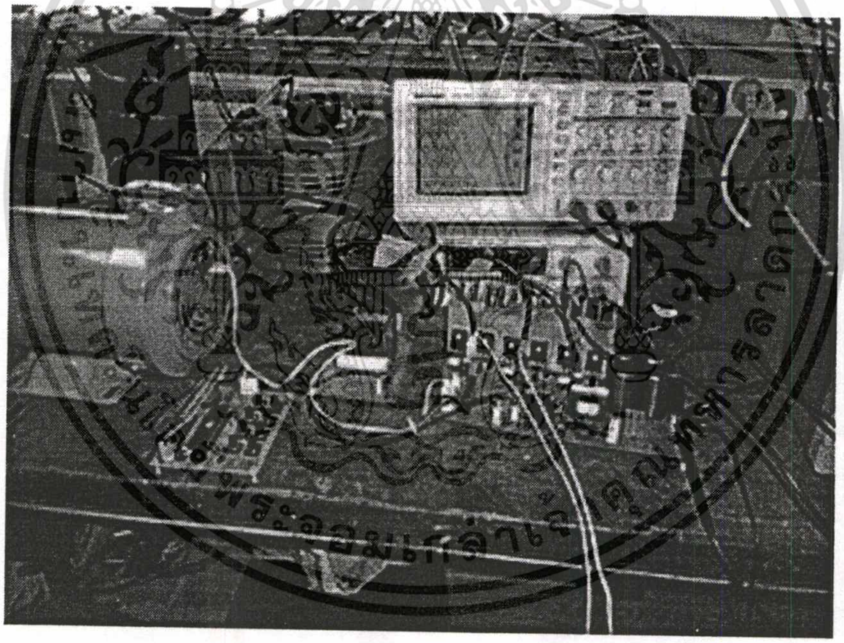
โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้การป้อนกลับดังกล่าวข้างต้นเพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายของวงจรเนื่องจากการทำงานที่ผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้น และแสดงค่าต่างๆให้ผู้ใช้ผ่านทางส่วนติดต่อผู้ใช้ (user interface)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ผลการทดลอง

ผลการทดลองของระบบควบคุมมอเตอร์ที่นำเสนอจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ

1. ส่วนของสัญญาณทางเวลาและสัญญาณทางความถี่ ภายในอินเวอร์เตอร์ ที่ทำการวัดด้วย Digital Storage Scope ยี่ห้อ Tektronix รุ่น TDS220 ตั้งแต่ รูปที่ 5.2 ถึงรูปที่ 5.32
2. ส่วนของการผลทดสอบอินเวอร์เตอร์กับภาระโหลดที่เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า ที่มีการจ่ายภาระทางกล ด้วยชุดทดสอบของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ยี่ห้อ SIEMENS รวมทั้งประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ และประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อมีภาระทางกลในแต่ละย่านของความถี่หลักมูล



รูปที่ 5.1 บอร์ดที่ใช้ในการพัฒนาและมอเตอร์ 3 เฟส 1 แรงม้า

5.1 สัญญาณทางเวลาและสัญญาณทางความถี่ภายในอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

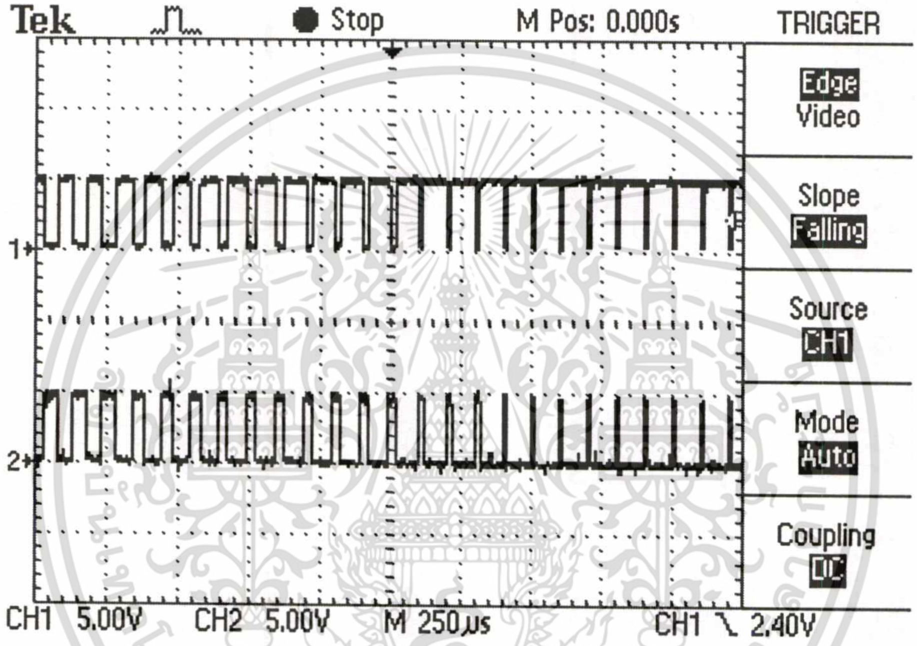
สัญญาณทางเวลาในส่วนต่างๆของอินเวอร์เตอร์นั้นประกอบด้วย

- สัญญาณ PWM ที่เข้าไปขับนำ IGBT ตั้งแต่ส่งออกมาจาก DSP ผ่านวงจรแยกโดด (Isolator) จนถึงขาเกตของอุปกรณ์กำลัง (IGBT) ซึ่งลักษณะของสัญญาณจะเหมือนกันทั้ง 3 เฟส แตกต่างกันแค่มีการเลื่อนมุมเฟสของความถี่หลักมูลอยู่ 120 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญญาณป้อนกลับความเร็วรอบที่มีการส่งค่ามายังตัว DSP ซึ่งมีจำนวน 9 พัลส์ต่อการหมุนของมอเตอร์ 1 รอบ

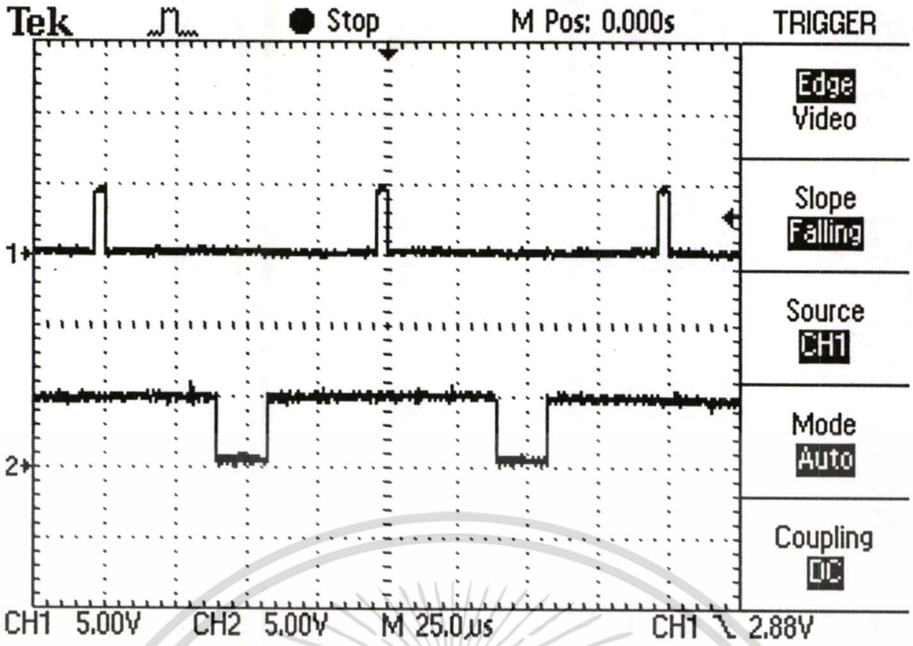
- สัญญาณขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งในรูปแบบ PWM และที่ผ่านวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (LPF) ที่มีความถี่ตัดที่ 1kHz เพื่อให้เห็นถึงความถี่หลักมูลที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยทำการบันทึกผลการทดลองในช่วงความถี่หลักมูล 10-50 Hz กำหนดการเพิ่มความถี่ที่บันทึกผลไว้ที่ 5 Hz ส่วนรายละเอียดของสัญญาณและจุดวัดสัญญาณจะมีคำอธิบายใต้รูปอีกครั้งหนึ่ง



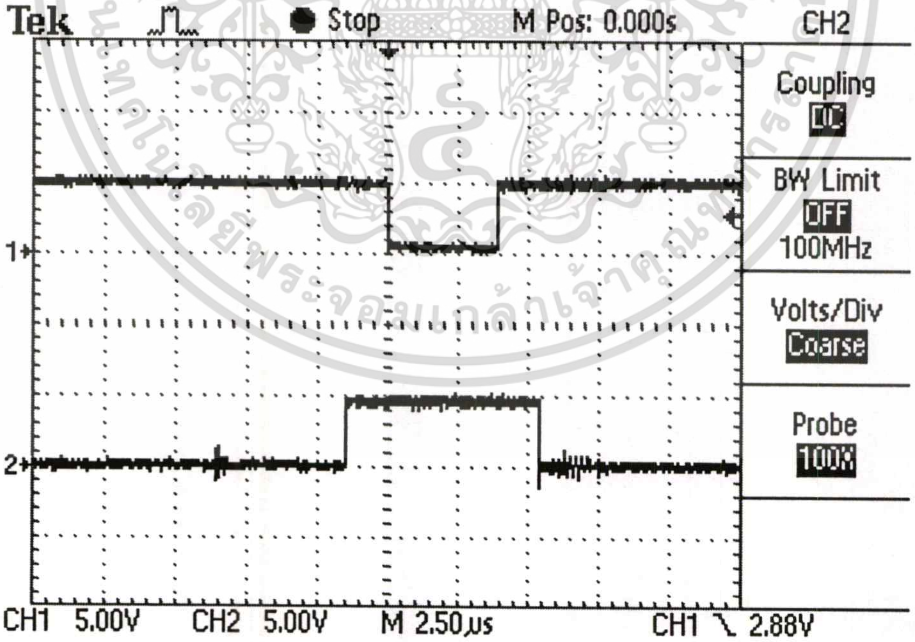
รูปที่ 5.2 สัญญาณ PWM ความถี่ 10 kHz ที่ขาของ DSP (Active Low) โดย Ch1 เป็นเฟส U กิ่งล่าง Ch2 เป็นเฟส U กิ่งบน

สัญญาณ PWM ที่อยู่ภายในวงจรส่วนต่างๆ ตั้งแต่รูปที่ 5.2-5.10 ซึ่งประกอบด้วยสัญญาณ PWM ที่ออกมาจากขาของ DSP เข้าไปยังวงจรแยกโหนดทางไฟฟ้า (Opto Isolator) เข้าไปขับนำยังขา Gate ของ IGBT ไปจนถึงสัญญาณที่ขา Collector ของ IGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

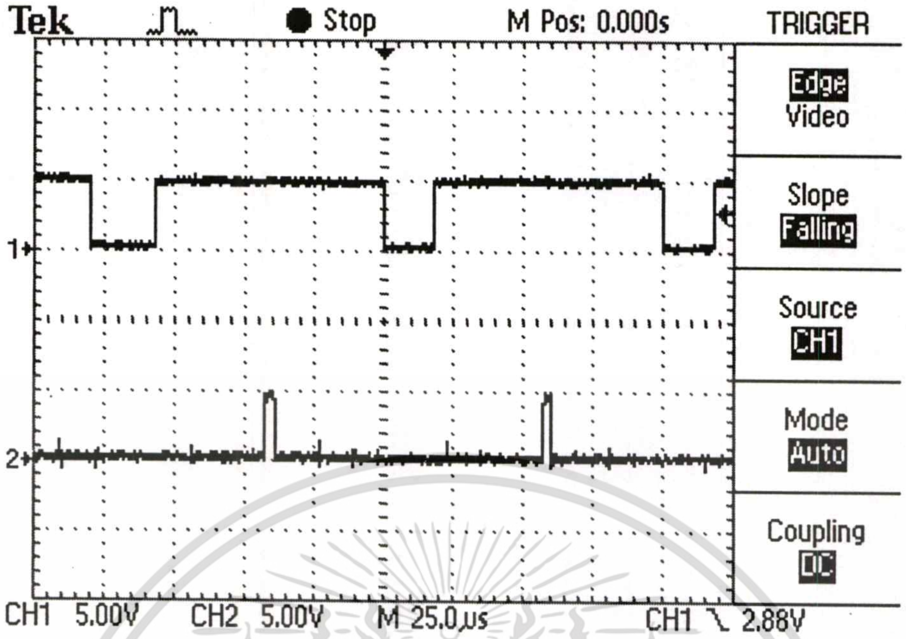


รูปที่ 5.3 สัญญาณ PWM ที่ขาของ DSP (Active Low) โดย Ch1 เป็นเฟส U กิ่งล่าง Ch2 เป็นเฟส V กิ่งล่าง

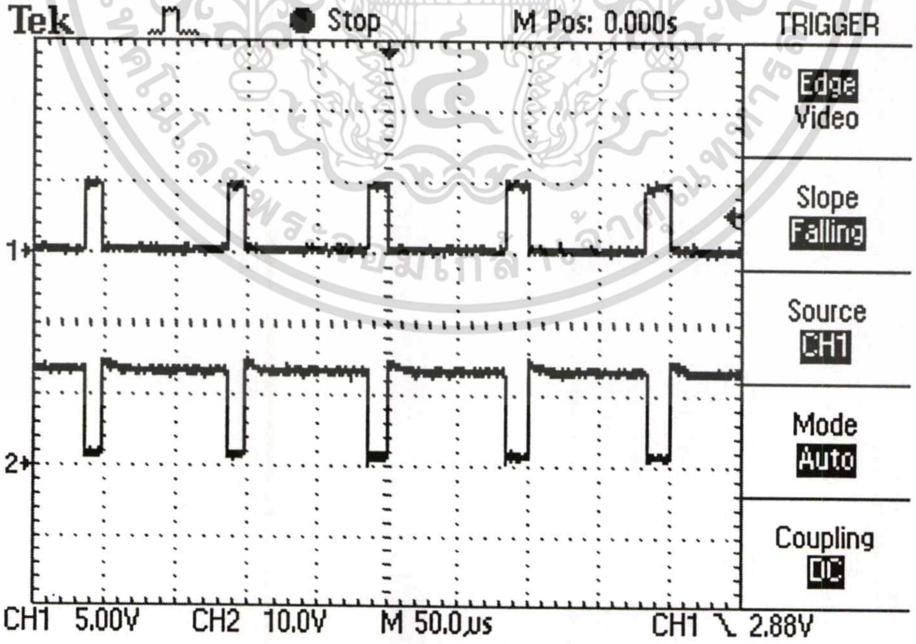


รูปที่ 5.4 สัญญาณ PWM ที่ขาของ DSP (Active Low)โดย Ch1 เป็นเฟส U กิ่งล่าง Ch2 เป็นเฟส U กิ่งบนซึ่งกำหนดเวลาหยุดพัก (dead time)ไว้ที่ 3 µS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

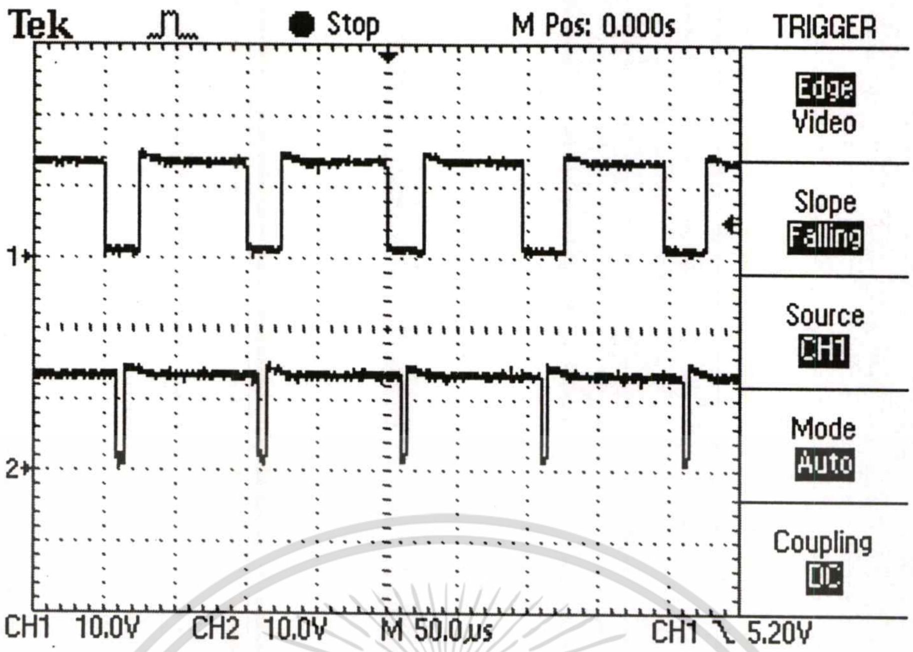


รูปที่ 5.5 สัญญาณ PWM ที่ขาของ DSP (Active Low) โดย Ch1 เป็นเฟส U กิ่งบน Ch2 เป็นเฟส V กิ่งบน

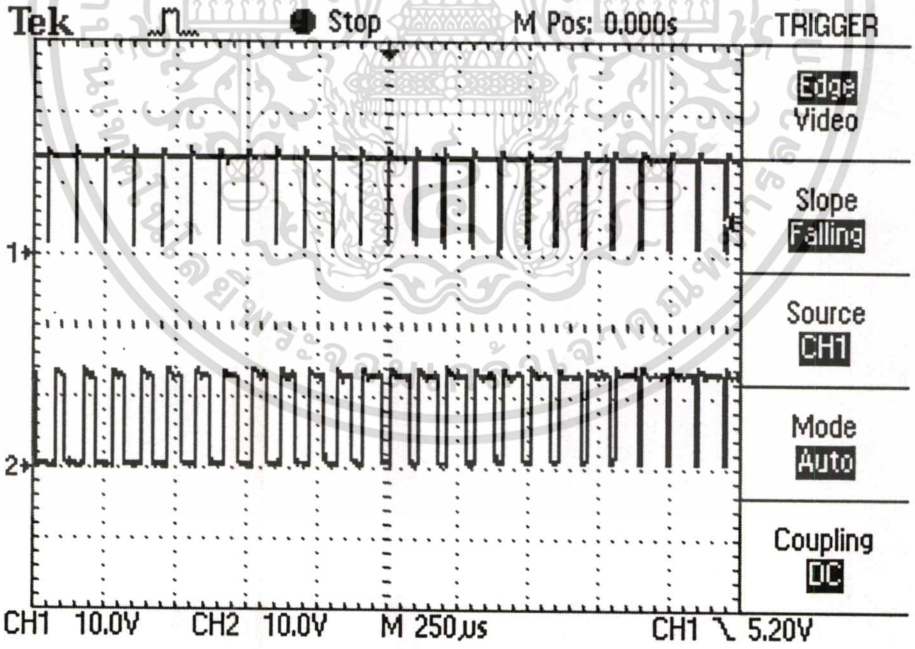


รูปที่ 5.6 สัญญาณ PWM เฟส U กิ่งล่าง Ch1 ที่ขาของ DSP (Active Low) Ch2 ที่ขา Gate ของ IGBT (Active High)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

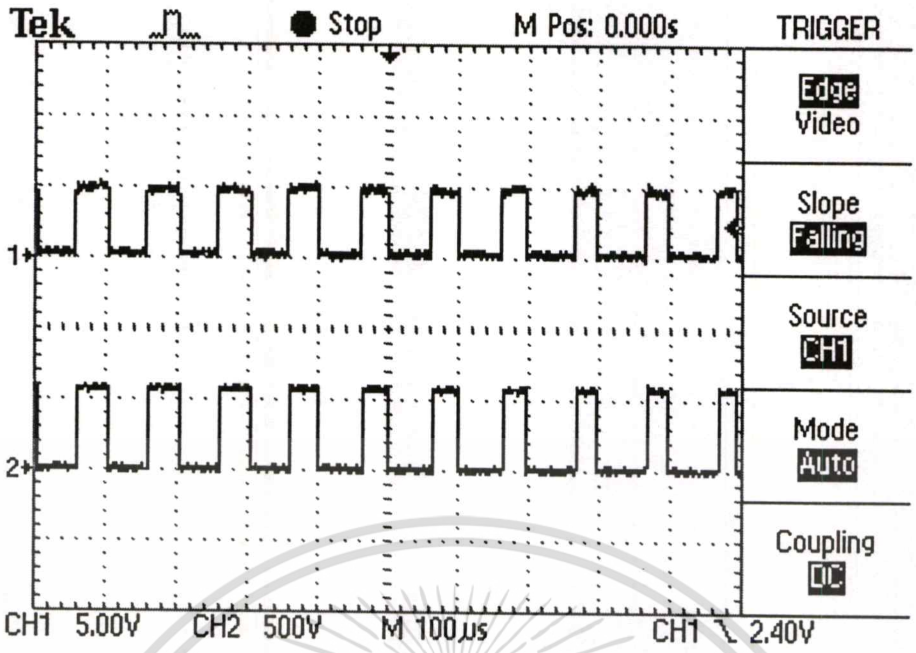


รูปที่ 5.7 สัญญาณ PWM ที่ขาของ Gate ของ IGBT (Active High) โดย Ch1 เป็นเฟส U กิ่งล่าง Ch2 เป็นเฟส V กิ่งล่าง

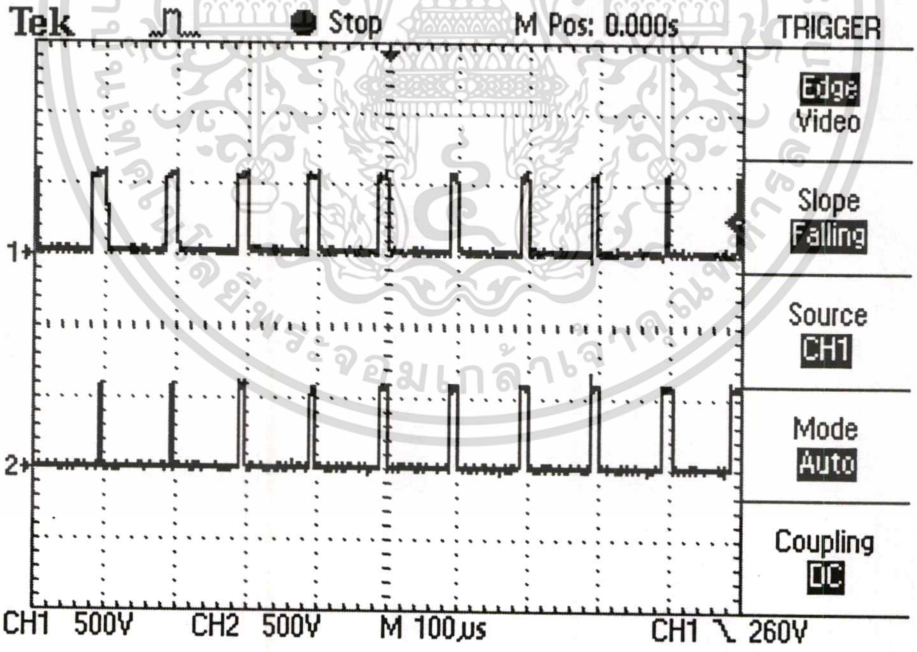


รูปที่ 5.8 สัญญาณ PWM ในมุมกว้างที่ขาของ Gate ของ IGBT (Active High) โดย Ch1 เป็นเฟส U กิ่งล่าง Ch2 เป็นเฟส V กิ่งล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

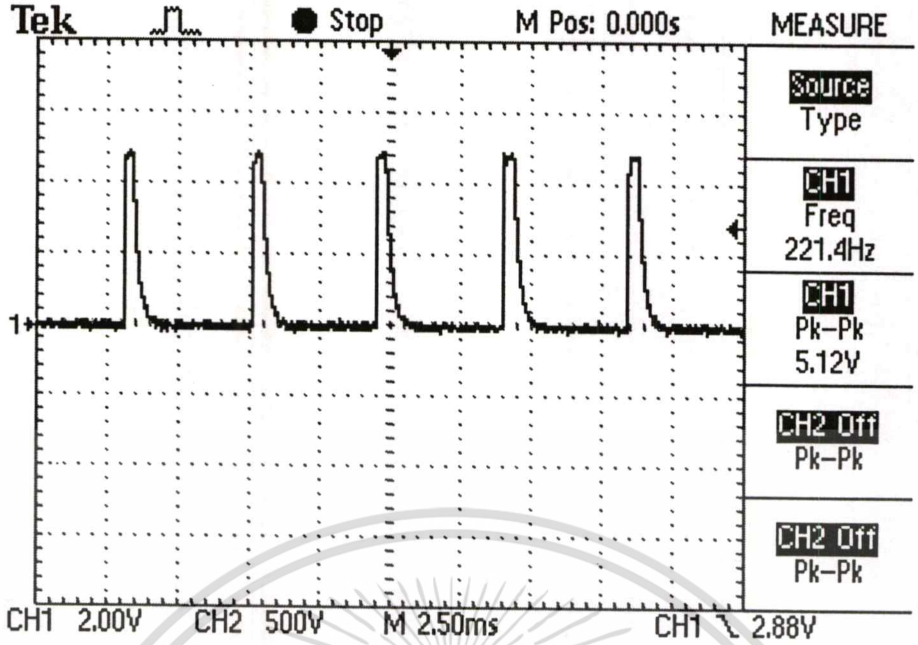


รูปที่ 5.9 สัญญาณ PWM เฟส U กิ่งล่าง (Active Low) Ch1 ที่ขาของ DSP Ch2 ที่ขา Collector ของ IGBT



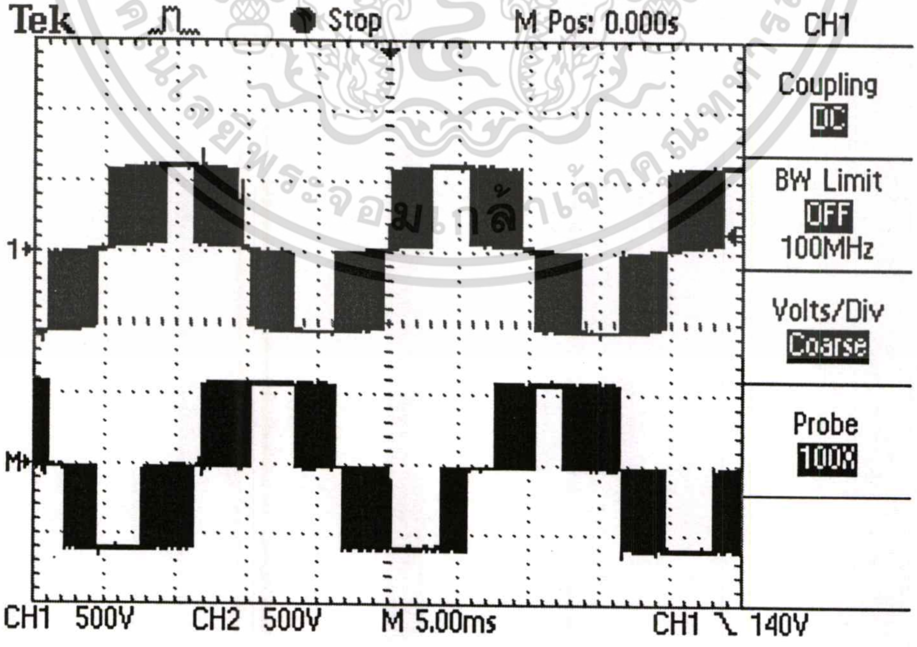
รูปที่ 5.10 สัญญาณ PWM ที่ขา Collector ของ IGBT (Active Low) โดย Ch1 เป็นเฟส U กิ่งล่าง Ch2 เป็นเฟส V กิ่งล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



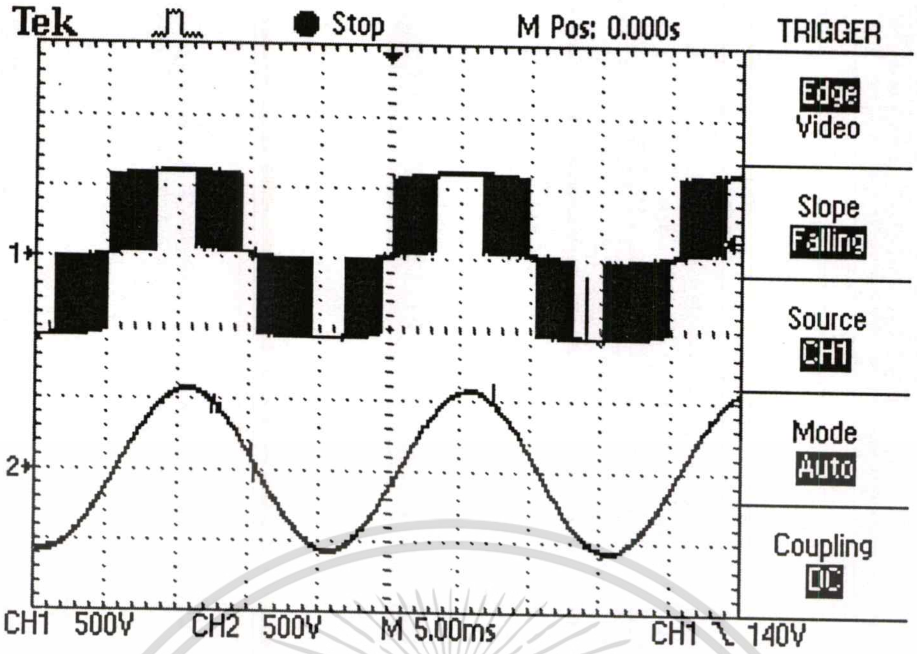
รูปที่ 5.11 สัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจจับความเร็วรอบที่ให้เอาต์พุต 9 พัลส์ต่อการหมุน 1 รอบ ด้วยความเร็วในการหมุน 1500 รอบต่อนาที

รูปที่ 5.11 สัญญาณที่ได้จากการตรวจจับความเร็วรอบ โดยใช้คลื่นอินฟราเรด ส่งออกไป และตรวจจับการสะท้อนกลับซึ่งติดตั้งกับใบพัดลมระบายอากาศด้านหลังของตัวมอเตอร์

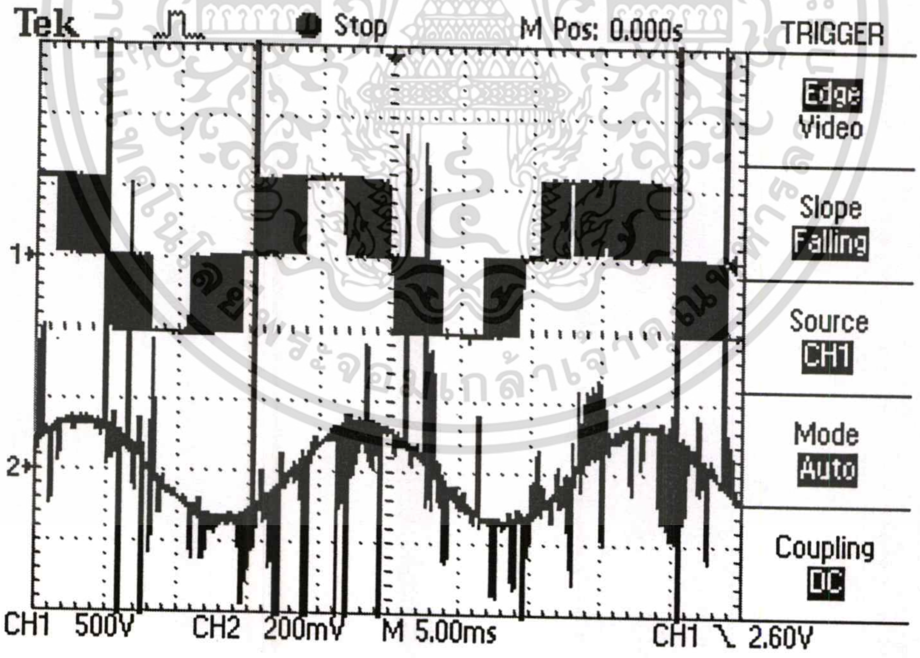


รูปที่ 5.12 สัญญาณ PWM เฟสต่อเฟส ที่ความถี่หลักมูล 50 Hz Ch1เป็นการเปรียบเทียบระหว่าง เฟส U กับ เฟส V Ch M เป็นการเปรียบเทียบระหว่างเฟส V กับ เฟส W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



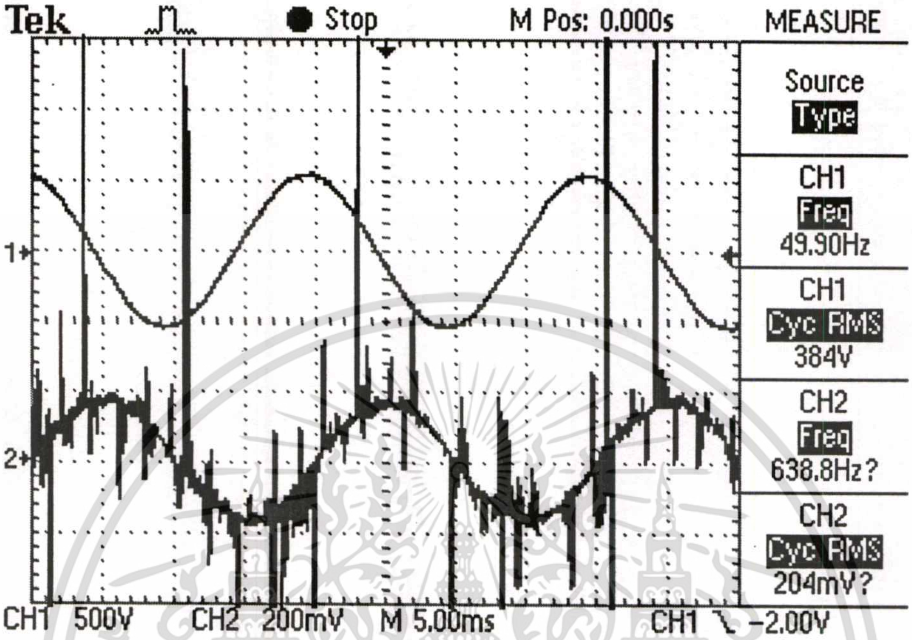
รูปที่ 5.13 สัญญาณ เฟสต่อเฟสขนาด 600 V_{peak} ที่ความถี่หลักมูล 50 Hz Ch1 เป็น Unipolar PWM Ch2 เมื่อนำสัญญาณใน Ch1 ผ่านวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (LPF)



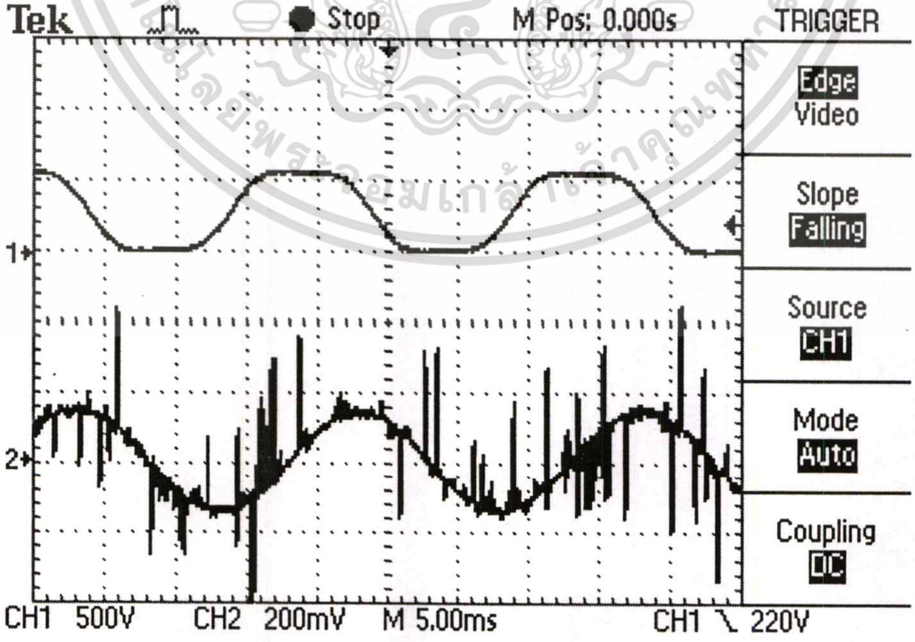
รูปที่ 5.14 Ch1 สัญญาณแรงดันเฟสต่อเฟส ที่ความถี่หลักมูล 50 Hz เป็น Unipolar PWM Ch2 เป็นกระแสเฟสเมื่ออินเวอร์เตอร์มีภาระโหลด อัตราส่วน 100 mV/A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.14-5.15 รูปสัญญาณแรงดันไลน์เปรียบเทียบกับกระแสเฟส ซึ่งสัญญาณกระแสตามหลังแรงดันอยู่ 90 องศา ทางไฟฟ้า โดยที่สัญญาณกระแสมีผลของสัญญาณรบกวนจากความถี่การสวิตช์เข้ามาด้วย

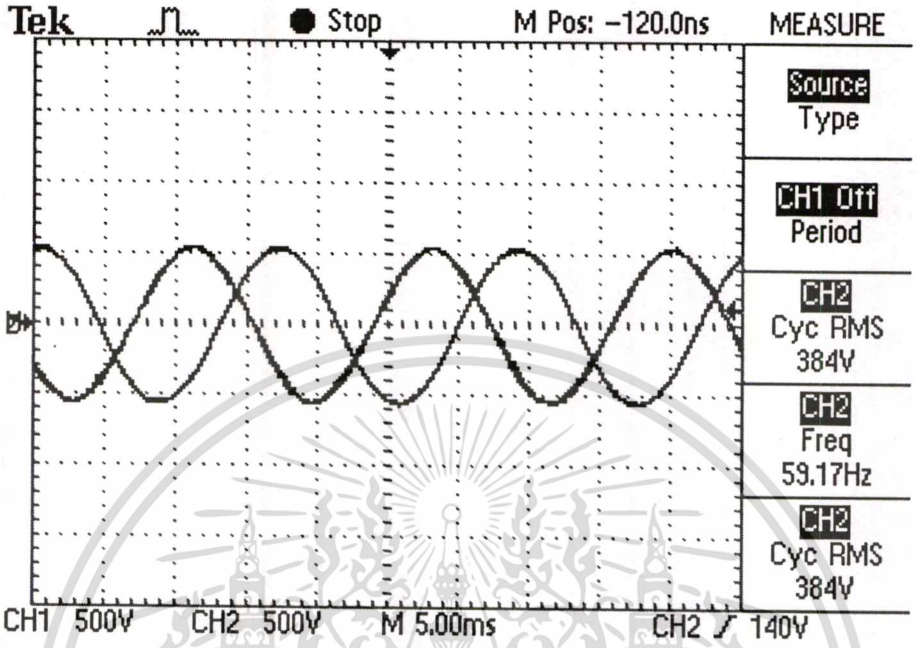


รูปที่ 5.15 Ch1 เป็นความถี่หลักมูลของ Unipolar PWM (V_{UV}) หลังผ่าน LPF
Ch2 เป็นกระแสเฟส U อัตราส่วน 100 mV/A

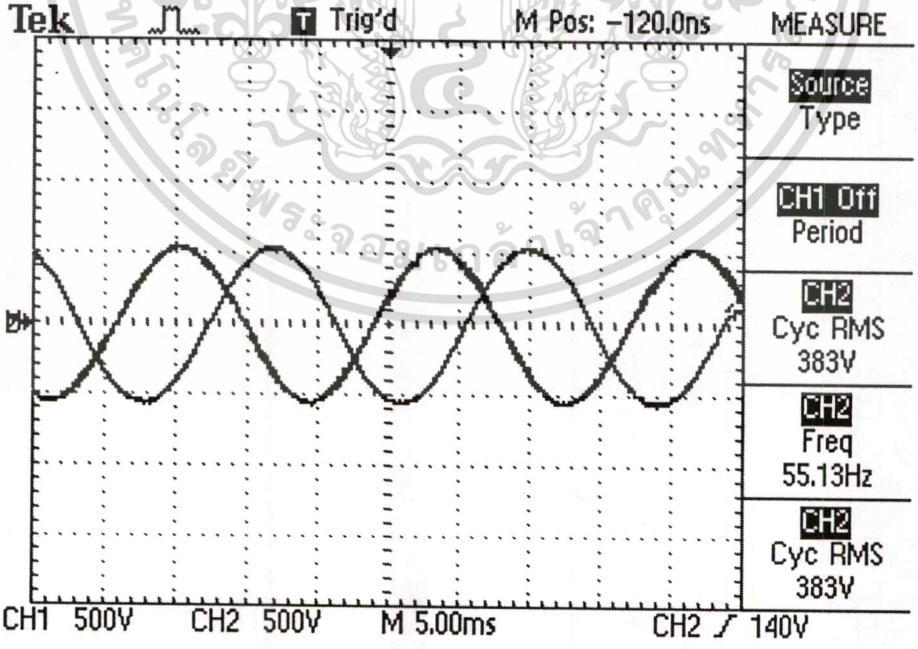


รูปที่ 5.16 สัญญาณ output phase U 600 Vpeak ที่ความถี่หลักมูล 50 Hz Ch1 เป็นความถี่หลักมูลของ bipolar PWM หลังผ่าน LPF Ch2 เป็นกระแสเฟสอัตราส่วน 100 mV/A

รูปที่ 5.17-5.27 เป็นรูปสัญญาณของความถี่หลักมูลของแรงดันไลน์ระหว่างเฟส UV กับ VW ตั้งแต่ความถี่ 59-5Hz ช่วงละ 5Hz ซึ่งใช้รูปแบบการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่คงที่

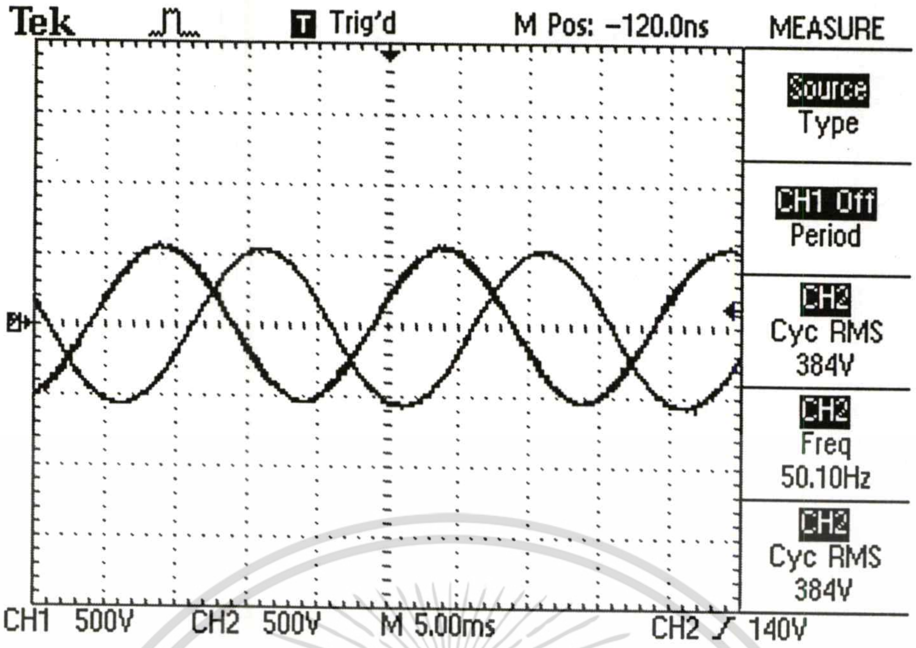


รูปที่ 5.17 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 59 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW

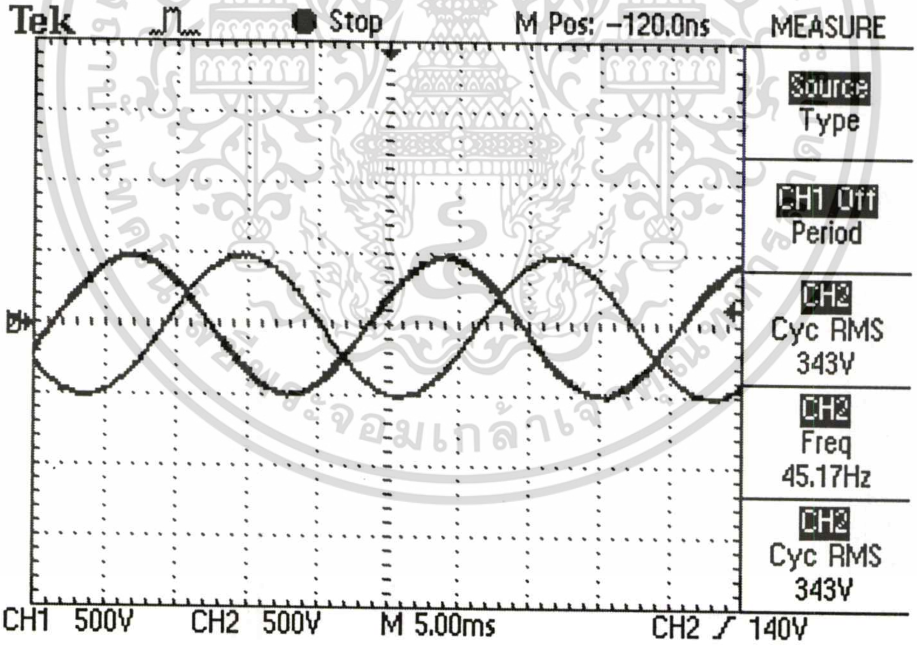


รูปที่ 5.18 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 55 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

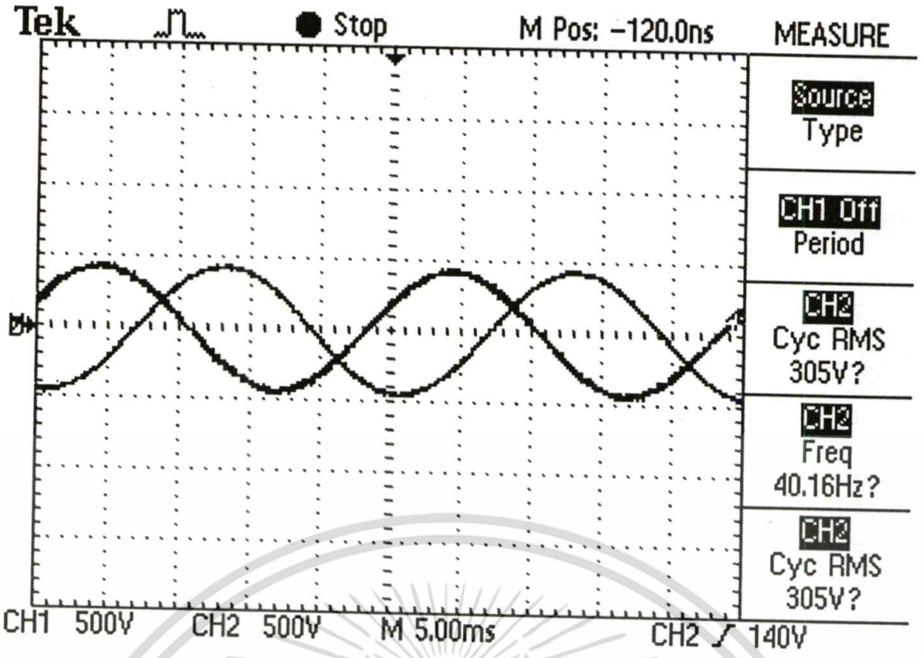


รูปที่ 5.19 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 50 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW

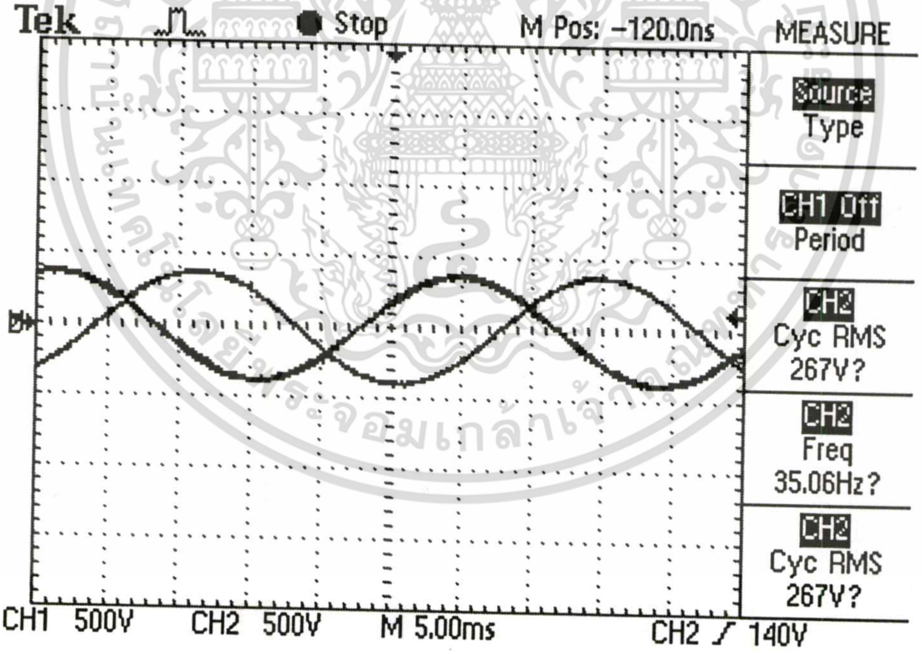


รูปที่ 5.20 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 45 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

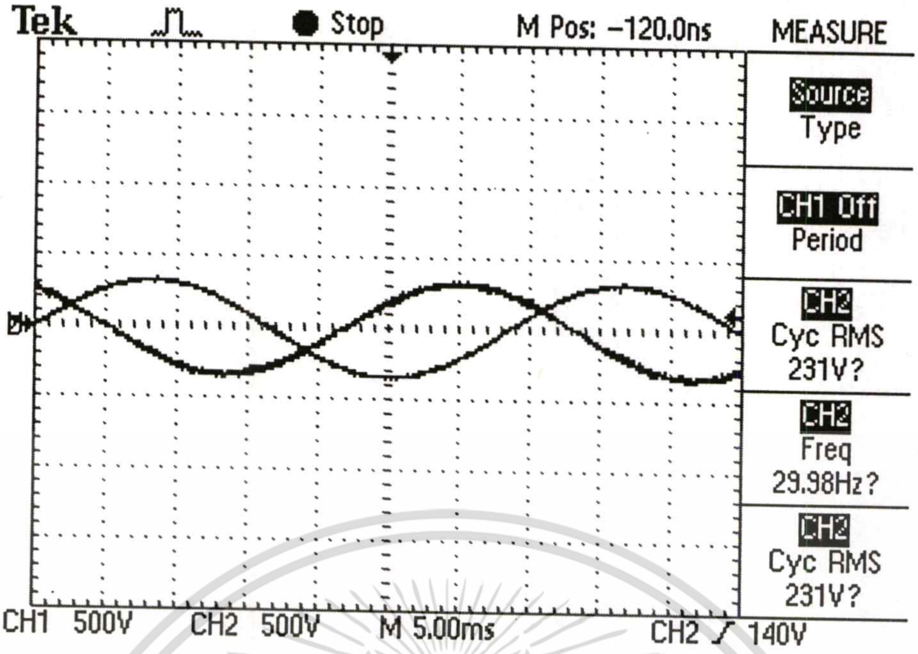


รูปที่ 5.21 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 40 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW

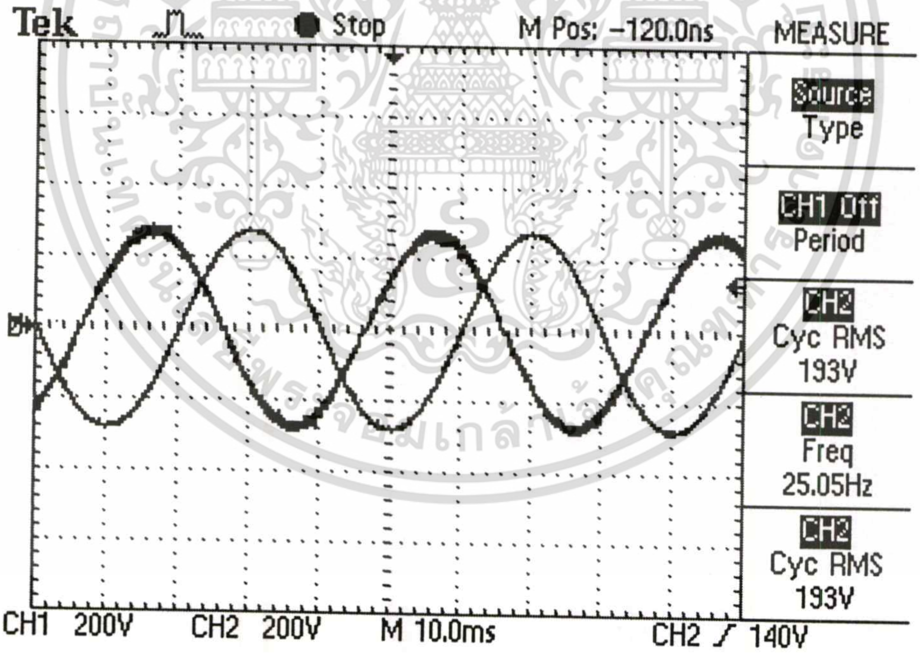


รูปที่ 5.22 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 35 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

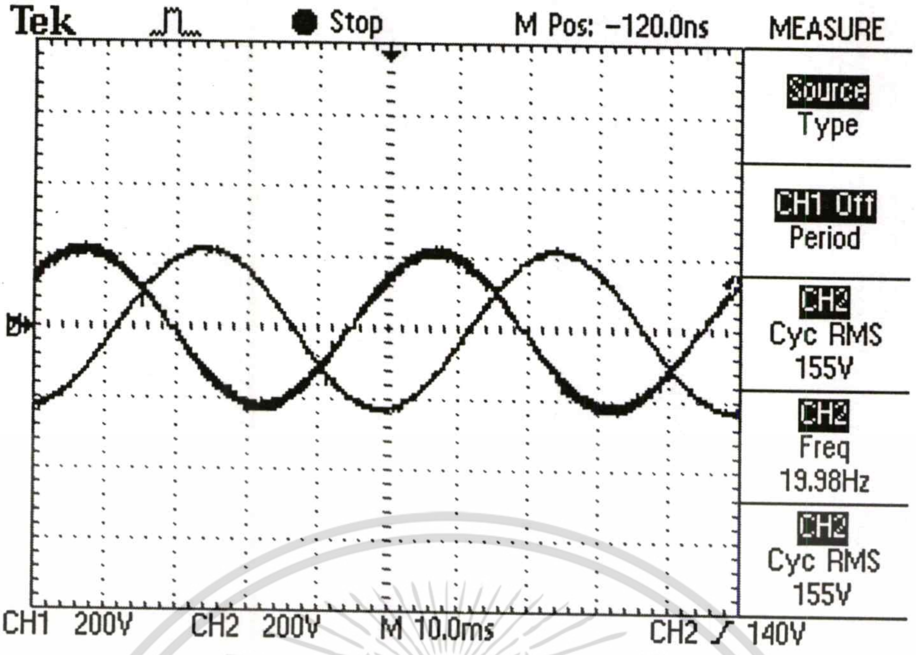


รูปที่ 5.23 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 30 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW

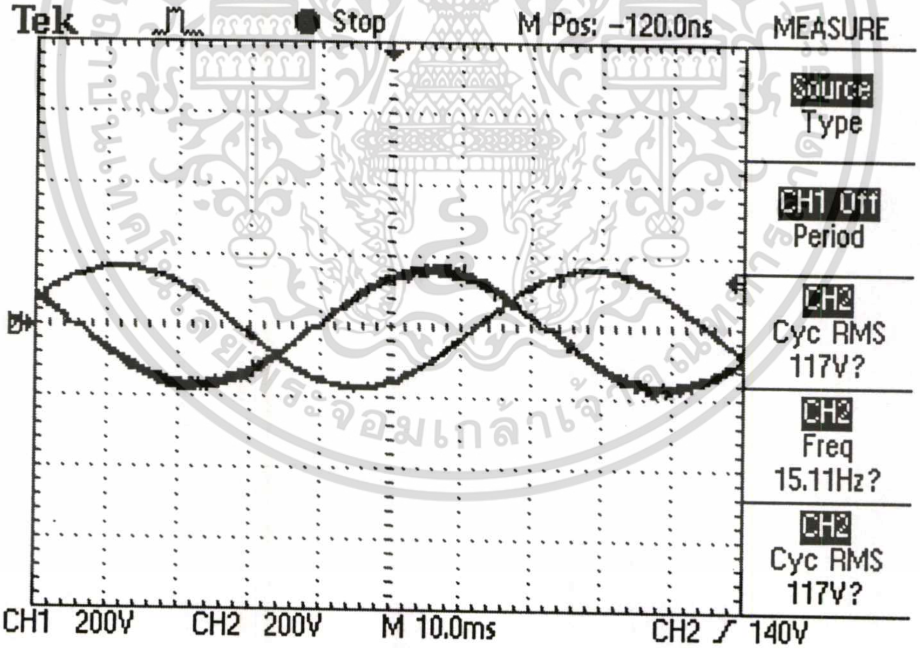


รูปที่ 5.24 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 25 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

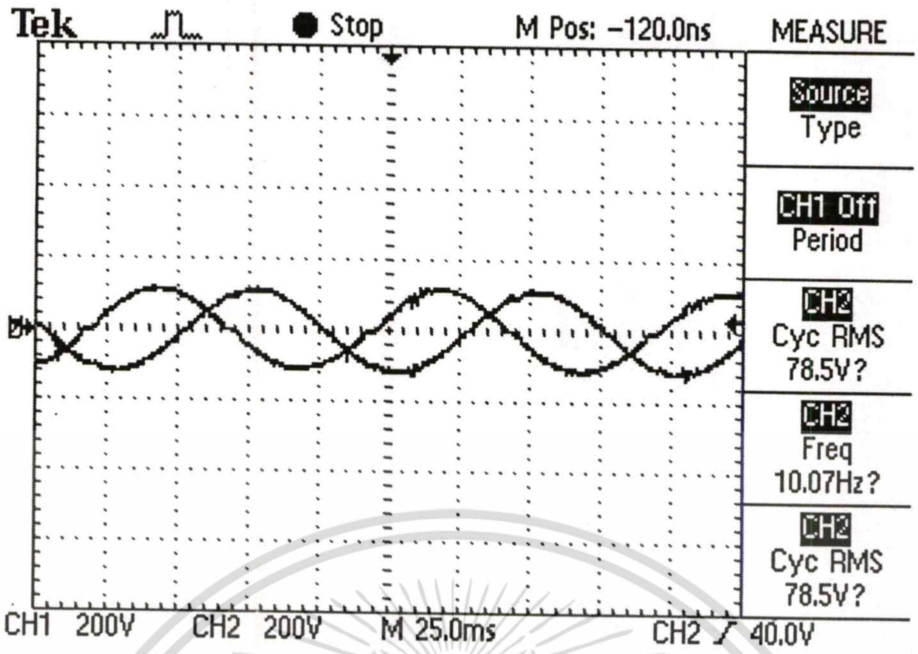


รูปที่ 5.25 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 20 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW

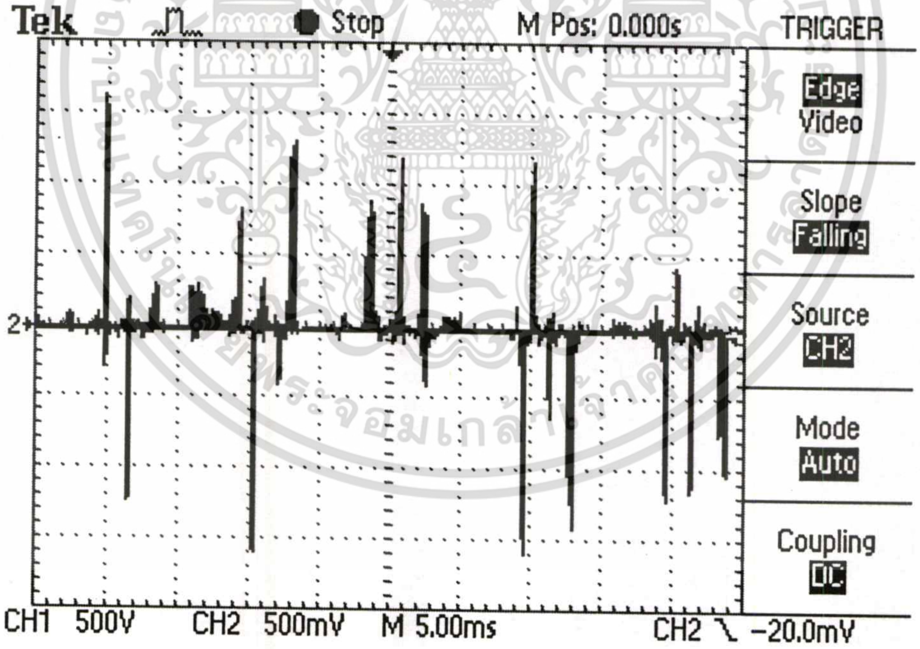


รูปที่ 5.26 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 15 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 แรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูล 10 Hz Ch1 เฟส UV Ch2 เฟส VW

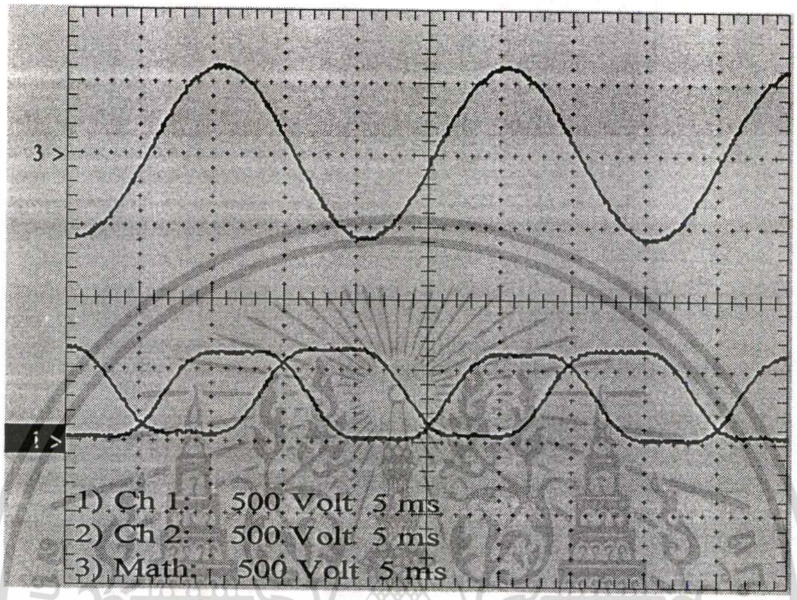


รูปที่ 5.28 สัญญาณรบกวนที่ current probe ขณะที่ไม่ได้วัดสัญญาณ

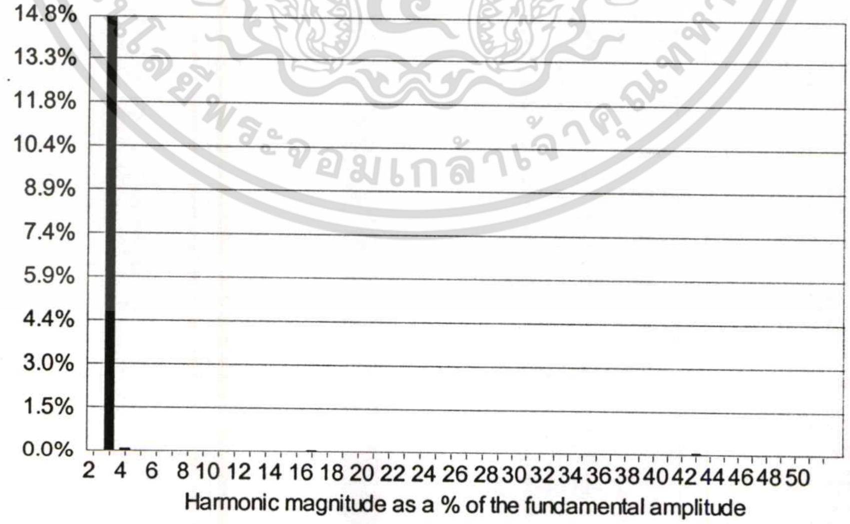
รูปที่ 5.28 เป็นสัญญาณรบกวนจากความถี่การสวิตช์ที่ส่งผลมายัง current probe ทำให้รูปสัญญาณกระแสที่วัดได้มีส่วนประกอบของสัญญาณรบกวนปรากฏอยู่ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.29 เป็นสัญญาณความถี่หลักมูลจากการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอ โดย Ch1,Ch2 นั้นเป็นแรงดันเฟสที่มีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกส์ที่ 3 อยู่ด้วยดังแสดงในเชิงความถี่ในรูปที่ 5.30 ด้วยโปรแกรม WaveStar และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะได้รูปสัญญาณดัง Ch3 ซึ่งองค์ประกอบของฮาร์มอนิกส์ที่ 3 ถูกหักล้างไปดังแสดงในเชิงความถี่ในรูปที่ 5.31



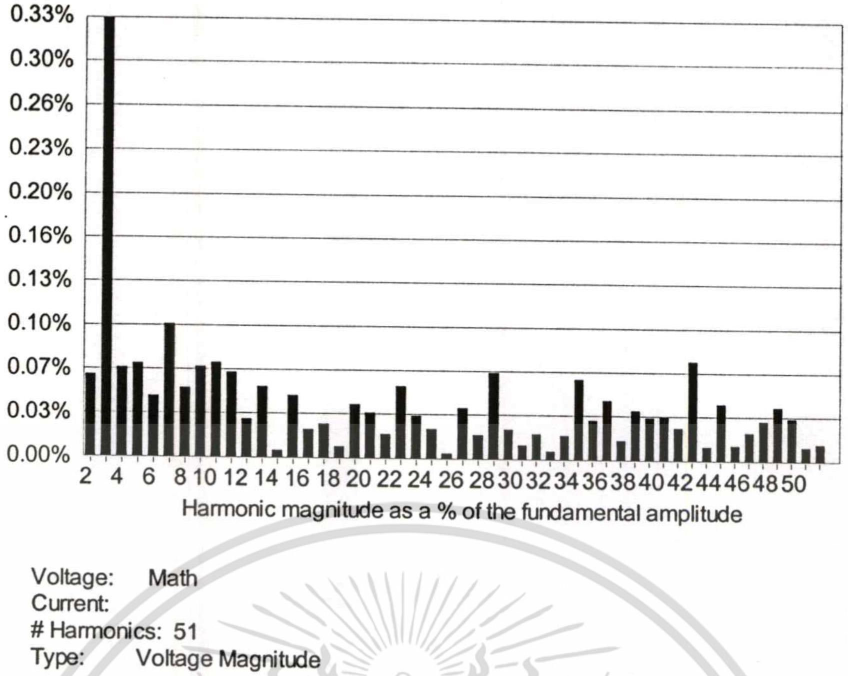
รูปที่ 5.29 ความถี่หลักมูลของ Ch1,2 แรงดันเฟส Ch3 แรงดันไลน์ที่ได้จากการเปรียบเทียบแรงดันเฟส



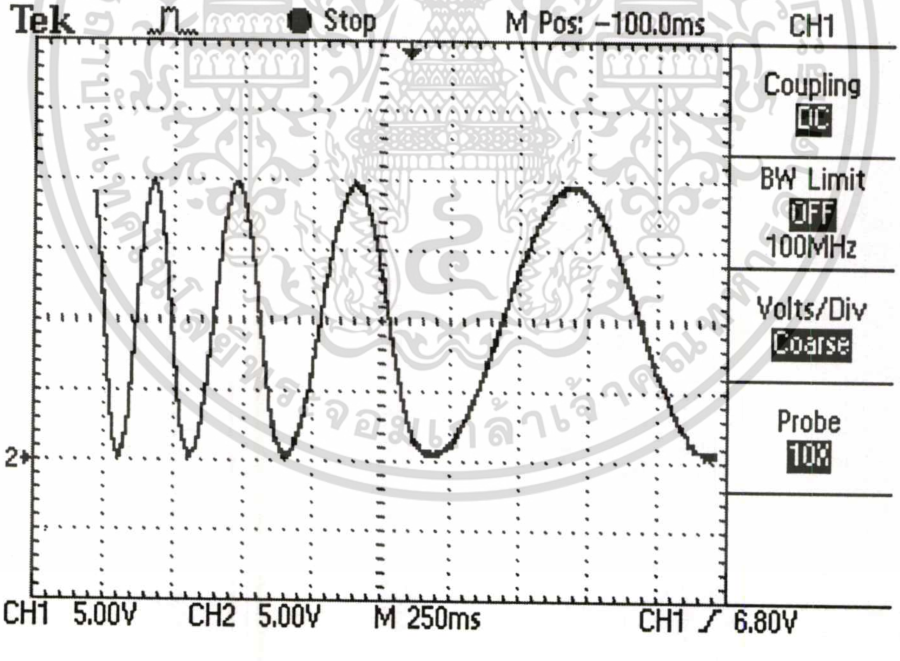
Voltage: Ch 1
Current:
Harmonics: 51
Type: Voltage Magnitude

รูปที่ 5.30 แรงดันเฟสในเชิงความถี่ ซึ่งมีฮาร์มอนิกส์ที่ 3 อยู่ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.31 แรงดันไลน์ในเชิงความถี่



รูปที่ 5.32 สัญญาณ Fundamental ขณะทำการเปลี่ยนความถี่

รูปที่ 5.32 สัญญาณ Fundamental ในขณะเปลี่ยนความถี่ ด้วยเทคนิคทาง Software และการประมวลผลของ DSP ทำให้การเปลี่ยนความถี่ทำได้อย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์กับการจ่ายโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้าที่มีภาระทางกล

การทดสอบอินเวอร์เตอร์ทำการทดสอบด้วยชุดทดสอบมอเตอร์ยี่ห้อ SIEMENS ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ดังรูปที่ 5.33 ถึงรูปที่ 5.35 โดยบล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้ในการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.37

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสที่นำเสนอ 1 ชุด
- Induction Motor 3 Phase 1 HP 4 Pole 380 V 1 ตัว
- SIEMENS DC Generator 1 ตัว
- SIEMENS Measurement and Analyzing Unit 1 ตัว
- Linear Load 1000W 1 ชุด
- 3 Phase Digital Power Meter 2 ตัว
- Variac 1 Phase 15 A 4 ตัว
- Bridge Rectifier 1 ชุด
- Fuse 10 A 1 ชุด

ผลการทดสอบประกอบด้วย

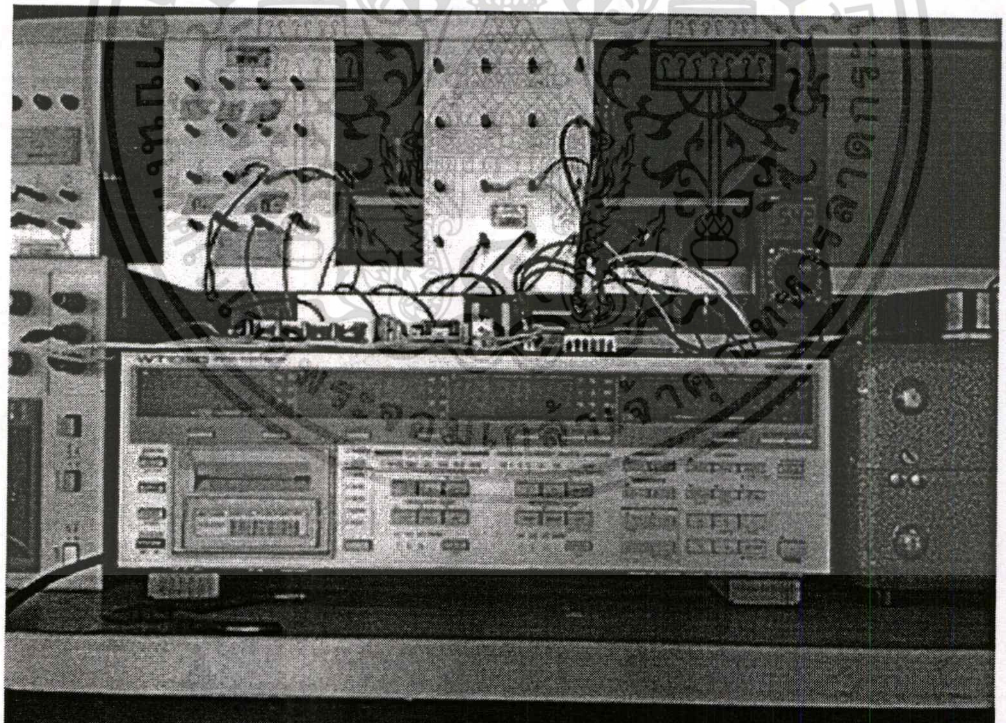
- ผลการทดสอบความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความถี่ 50 Hz จากการต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งผ่านการควบคุมแรงดันในแต่ละเฟสให้ได้ 220 VAC เปรียบเทียบกับเทคนิค SINE PWM และเทคนิค Third-Harmonic Injection PWM ในแต่ละช่วงภาระโหลด
- ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิค Third-Harmonic Injection PWM แต่ละช่วงของภาระโหลด
- ผลการทดสอบความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่หลักมูลจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิค Third-Harmonic Injection PWM เปรียบเทียบกับเทคนิค SINE PWM
- ผลการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์ในแต่ละย่านความเร็ว

ข้อมูลทางเทคนิคของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

- ยี่ห้อ Mitsubishi แบบ 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า (746W) 4 Pole แรงดันพิกัด 380/220V ความถี่พิกัด 50 Hz ความเร็วรอบที่พิกัดความถี่ 1480 Rpm

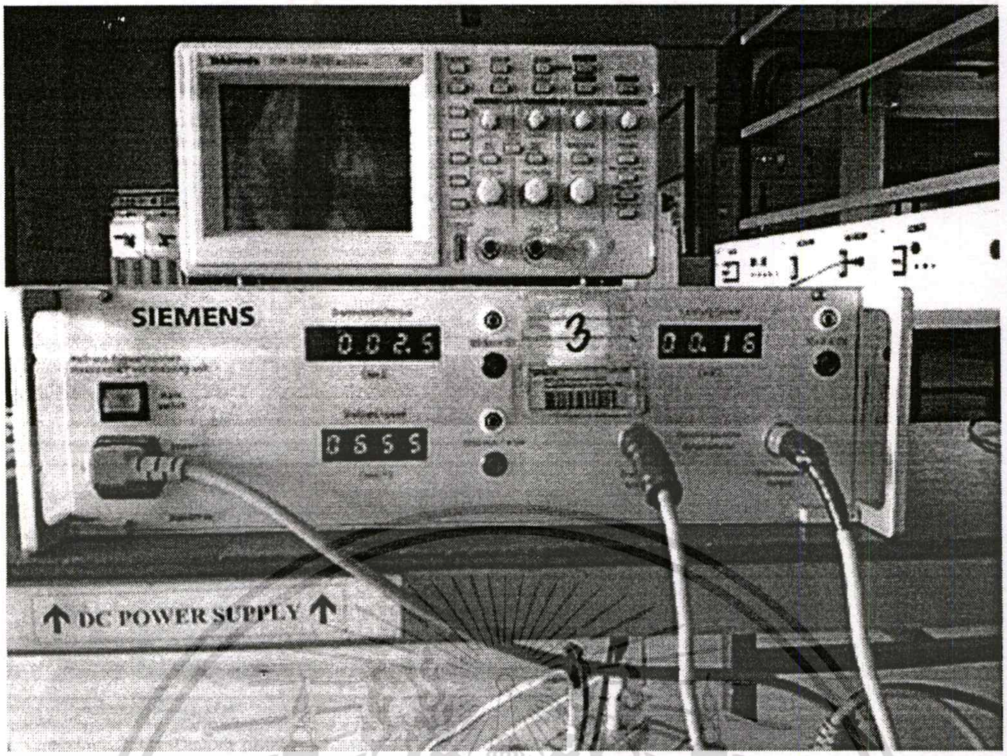
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.33 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบอินเวอร์เตอร์กับการจ่ายโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีภาระทางกล

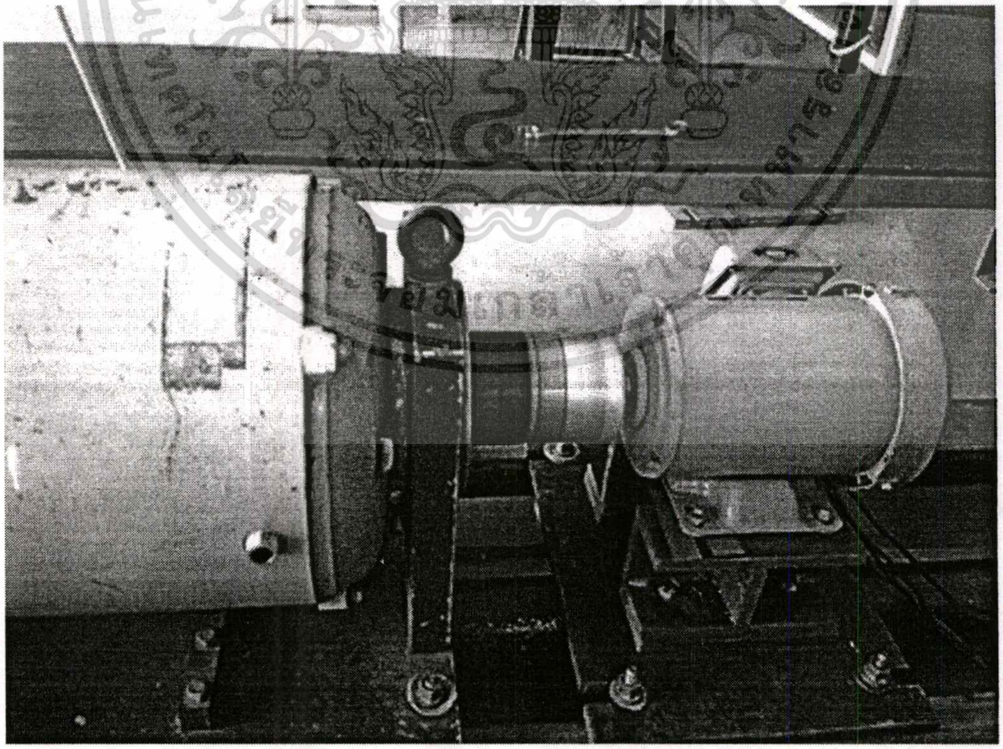


รูปที่ 5.34 Digital Power Meter 3 Phase ยี่ห้อ YOKOKAWA รุ่น WT1030 ที่ใช้บันทึกผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

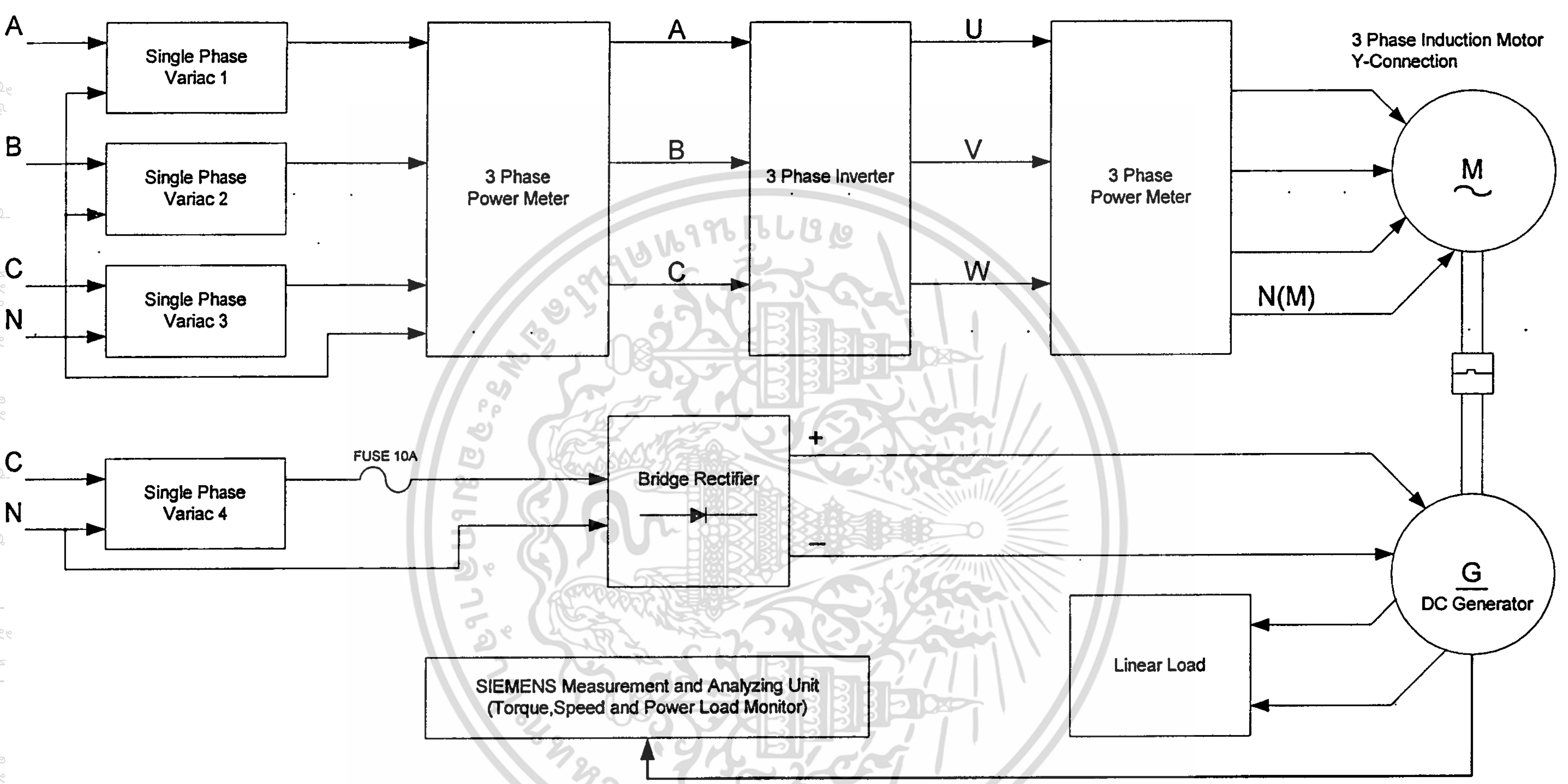


รูปที่ 5.35 Siemens Measurement and Analyzing Unit (วัดทอร์ค, วัดความเร็วรอบ, วัดกำลังที่จ่ายโหลด จากการทำงานของมอเตอร์)



รูปที่ 5.36 การต่อ Motor เข้ากับ Generator ผ่าน Coupling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.37 Block Diagram การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบโดยใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าปกติเมื่อมอเตอร์มีภาระโหลดทางกล

Command		Input			Motor			Motor
F(Hz)	Load(%)	Vphase(V)	Iphase(A)	PI(W)	Torque(N-m)	Speed(Rpm)	Pload(W)	Eff(%)
50	0	220	1.077	150	0	1497	0	0.00
50	50	220	1.35	562	2.5	1447	370	65.84
50	100	220	2	1097	5.3	1376	750	68.37

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบโดยใช้ PWM แบบ Third-Harmonic Injection ด้วยมอเตอร์ที่ไม่มีภาระทางกล

Command		Input			Output			Inverter	Motor			Motor
F(Hz)	Mod(%)	Vphase(V)	Iphase(A)	PI(W)	Vphase(V)	Iphase(A)	PO(W)	Eff(%)	Troque(N-m)	Speed(Rpm)	Pload(W)	Eff(%)
59	100	220	0.7	160	252	0.822	147	91.88	0	1763	0	0
55	100	220	0.7	160	250	0.91	150	93.75	0	1644	0	0
50	100	220	0.64	180	247	1.039	160	88.89	0	1485	0	0
45	90	220	0.61	160	238	1.23	143	89.38	0	1338	0	0
40	80	220	0.58	142	223	1	124	87.32	0	1190	0	0
35	70	220	0.52	130	209	0.99	116	89.23	0	1040	0	0
30	60	220	0.48	110	194	0.98	96	87.27	0	891	0	0
25	50	220	0.45	100	178	0.96	86	86.00	0	741	0	0
20	40	220	0.37	85	160	0.945	71	83.53	0	592	0	0
15	30	220	0.31	68	138.9	0.903	54	79.41	0	442	0	0
10	20	220	0.24	52	112.4	0.836	38	73.08	0	293	0	0
5	10	220	0.159	32	92	0.64	21	65.63	0	146	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ [illegible] ญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบโดยใช้ PWM แบบ Third-Harmonic Injection ด้วยมอเตอร์ที่มีภาระทางกล 50% ของพิกัด

Command		Input			Output			Inverter	Motor			Motor
F(Hz)	Mod(%)	Vphase(V)	Iphase(A)	PI(W)	Vphase(V)	Iphase(A)	PO(W)	Eff(%)	Troque(N-m)	Speed(Rpm)	Pload(W)	Eff(%)
59	100	220	2.24	720	250	1.45	700	97.22	2.5	1685	430	61.43
55	100	220	2.16	680	250	1.4	660	97.06	2.5	1579	400	60.61
50	100	220	1.84	640	243	1.45	609	95.16	2.5	1435	370	60.76
45	90	220	1.73	580	234	1.42	560	96.55	2.5	1285	330	58.93
40	80	220	1.58	520	221	1.392	496	95.38	2.5	1135	290	58.47
35	70	220	1.43	460	205	1.79	445	96.74	2.5	980	250	56.18
30	60	220	1.25	390	190	1.35	377	96.67	2.5	830	210	55.70
25	50	220	1.15	340	171	1.34	321	94.41	2.5	673	170	52.96
20	40	220	0.96	284	156	1.34	267	94.01	2.5	514	130	48.69
15	30	220	0.85	233	135	1.39	215	92.27	2.5	340	80	37.21
10	20	220	0.5	121	108	1.07	104	85.95	1.5	214	30	28.85
5												

*ในช่องความถี่หลักมูล 5Hz ไม่ได้ทำการทดสอบเนื่องจากมอเตอร์ไม่สามารถจ่ายภาระทางกลได้

เอกสาร... เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบโดยใช้ PWM แบบ Third-Harmonic Injection ด้วยมอเตอร์ที่มีภาระทางกล 100% ของพิกัด

Command		Input			Output			Inverter	Motor			Motor
F(Hz)	Mod(%)	Vphase(V)	Iphase(A)	PI(W)	Vphase(V)	Iphase(A)	PO(W)	Eff(%)	Troque(N-m)	Speed(Rpm)	Pload(W)	Eff(%)
59	100	220	3.42	1170	246	2.15	1150	98.29	4.4	1609	740	64.35
55	100	220	3.14	1170	246	2.12	1130	96.58	4.8	1504	740	65.49
50	100	220	3.1	1180	241	2.25	1149	97.37	5.3	1366	740	64.40
45	90	220	2.9	1070	232	2.21	1046	97.76	5.3	1211	660	63.10
40	80	220	2.68	990	217	2.24	952	96.16	5.3	1054	570	59.87
35	70	220	2.45	880	203	2.26	850	96.59	5.3	880	480	56.47
30	60	220	2.21	780	188	2.3	748	95.90	5.3	723	390	52.14
25	50	220	2.04	710	172	2.46	676	95.21	5.3	534	290	42.90
20	40	220	1.5	490	156	2.12	460	93.88	4.3	404	180	39.13
15												
10												
5												

*ในช่องความถี่หลักมูล 5Hz, 10Hz, 15Hz ไม่ได้ทำการทดสอบเนื่องจากมอเตอร์ไม่สามารถจ่ายภาระทางกลได้

เอกสารนี้...เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบโดยใช้ PWM แบบ SINE ด้วยมอเตอร์ที่ไม่มีภาระทางกล

Command		Input			Output			Inverter	Motor			Motor
F(Hz)	Mod(%)	Vphase(V)	Iphase(A)	PI(W)	Vphase(V)	Iphase(A)	PO(W)	Eff(%)	Troque(N-m)	Speed(Rpm)	Pload(W)	Eff(%)
59	100	220	0.6	150	230	0.68	134	89.33	0	1758	0	0
55	100	220	0.6	150	231	0.72	136	90.67	0	1640	0	0
50	100	220	0.59	149	231	0.8	130	87.25	0	1490	0	0
45	90	220	0.65	150	231	0.93	134	89.33	0	1343	0	0
40	80	220	0.64	149	224	0.99	125	83.89	0	1194	0	0
35	70	220	0.57	130	209	0.98	113	86.92	0	1041	0	0
30	60	220	0.5	110	194	0.97	100	90.91	0	893	0	0
25	50	220	0.42	97	177	0.95	83	85.57	0	742	0	0
20	40	220	0.37	85	159	0.93	70	82.35	0	592	0	0
15	30	220	0.31	68	138	0.9	54	79.41	0	443	0	0
10	20	220	0.24	51	112	0.83	38	74.51	0	293	0	0
5	10	220	0.15	31	93	0.64	20	64.52	0	145	0	0

เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบโดยใช้ PWM แบบ SINE ด้วยมอเตอร์ที่มีภาระทางกล 50% ของพิกัด

Command		Input			Output			Inverter	Motor			Motor
F(Hz)	Mod(%)	Vphase(V)	Iphase(A)	PI(W)	Vphase(V)	Iphase(A)	PO(W)	Eff(%)	Troque(N-m)	Speed(Rpm)	Pload(W)	Eff(%)
59	100	220	2.1	730	227	1.57	700	95.89	2.5	1635	420	60.00
55	100	220	1.97	610	231	1.36	593	97.21	2.5	1518	360	60.71
50	100	220	1.85	610	228	1.38	590	96.72	2.5	1412	360	61.02
45	90	220	1.75	570	228	1.37	548	96.14	2.5	1279	330	60.22
40	80	220	1.64	520	220	1.35	500	96.15	2.5	1134	290	58.00
35	70	220	1.45	460	205	1.35	435	94.57	2.5	979	250	57.47
30	60	220	1.3	400	191	1.34	380	95.00	2.5	826	210	55.26
25	50	220	1.14	340	174	1.33	322	94.71	2.5	670	170	52.80
20	40	220	0.98	280	156	1.32	261	93.21	2.5	513	130	49.81
15	30	220	0.86	234	134	1.39	216	92.31	2.5	334	80	37.04
10	20	220	0.52	126	108	1.11	109	86.51	1.5	210	30	27.52
5												

*ในช่องความถี่หลักมูล 5Hz ไม่ได้ทำการทดสอบเนื่องจากมอเตอร์ไม่สามารถจ่ายภาระทางกลได้

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบโดยใช้ PWM แบบ SINE ด้วยมอเตอร์ที่มีภาระทางกล 100% ของพิกัด

Command		Input			Output			Inverter	Motor			Motor
F(Hz)	Mod(%)	Vphase(V)	Iphase(A)	PI(W)	Vphase(V)	Iphase(A)	PO(W)	Eff(%)	Troque(N-m)	Speed(Rpm)	Pload(W)	Eff(%)
59	100	220	3.5	1270	227	2.6	1230	96.85	4.5	1484	700	56.91
55	100	220	3.61	1240	230	2.53	1210	97.58	4.8	1416	700	57.85
50	100	220	3.28	1240	224	2.53	1190	95.97	5.3	1277	700	58.82
45	90	220	2.94	1096	225	2.28	1061	96.81	5.3	1181	640	60.32
40	80	220	2.71	990	218	2.23	950	95.96	5.3	1043	570	60.00
35	70	220	2.46	880	202	2.23	850	96.59	5.3	879	480	56.47
30	60	220	2.25	780	189	2.28	751	96.28	5.3	713	390	51.93
25	50	220	2.08	720	172	2.49	685	95.14	5.3	514	280	40.88
20	40	220	1.56	510	155	2.19	480	94.12	4.3	381	170	35.42
15												
10												
5												

*ในช่องความถี่หลักมูล 5Hz, 10Hz, 15Hz ไม่ได้ทำการทดสอบเนื่องจากมอเตอร์ไม่สามารถจ่ายภาระทางกลได้

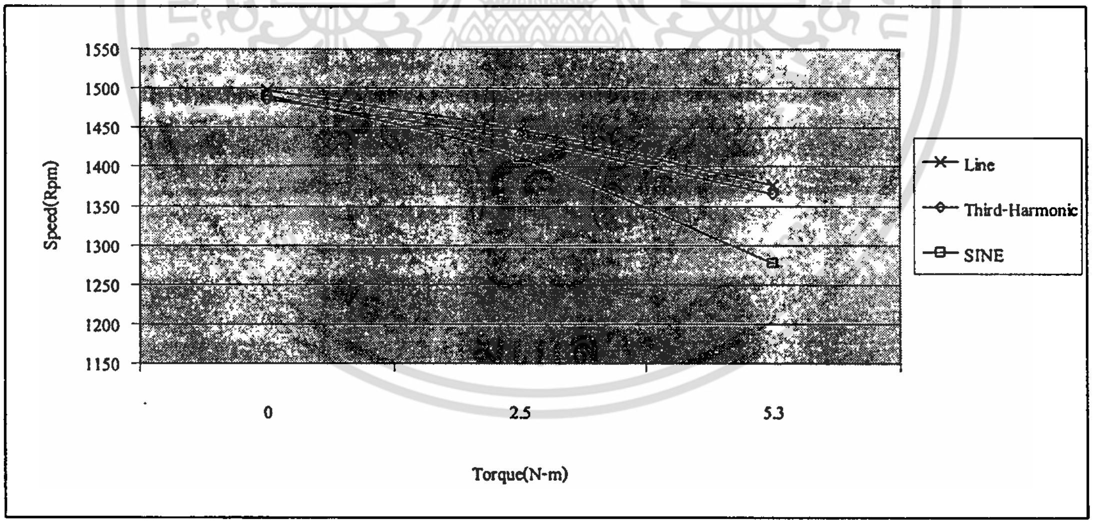
เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ทดสอบการทำงานของมอเตอร์ด้วยการต่อแรงดันไฟฟ้าสามเฟสจากระบบไฟฟ้าปกติผ่านอุปกรณ์รักษาแรงดัน (Variac) ให้คงที่ และบันทึกผลทั้งในขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำไม่มีภาระทางกล (load 0%) ภาระทางกลครึ่งหนึ่งของพิกัด (load 50%) และภาระโหลดที่พิกัด (load 100%) ด้วยชุดทดสอบดังในรูปที่ 5.33

ตารางที่ 5.2-5.4 เป็นผลการทดสอบจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิคการสวิตช์แบบ Third-Harmonic Injection PWM ในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำไม่มีภาระทางกลและมีภาระทางกลครึ่งหนึ่งของพิกัดและที่พิกัด ในแต่ละช่วงความถี่หลักมูลตั้งแต่ 5-59 Hz ด้วยการต่อชุดทดสอบตามไดอะแกรมในรูปที่ 5.37

ตารางที่ 5.5-5.7 เป็นผลการทดสอบจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิคการสวิตช์แบบ SINE PWM ในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำไม่มีภาระทางกลและมีภาระทางกลครึ่งหนึ่งของพิกัดและที่พิกัด ในแต่ละช่วงความถี่หลักมูลตั้งแต่ 5-59 Hz ด้วยการต่อชุดทดสอบตามไดอะแกรมในรูปที่ 5.37

กราฟในรูปที่ 5.38-5.41 เป็นการแสดงข้อมูลในตารางที่ 5.1-5.7 ด้วยการสรุปเป็นความสัมพันธ์ เปรียบเทียบผลจากการทำงานของมอเตอร์ในแต่ละรูปแบบการสวิตช์ รวมถึงค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์และมอเตอร์ในแต่ละย่านความถี่หลักมูล

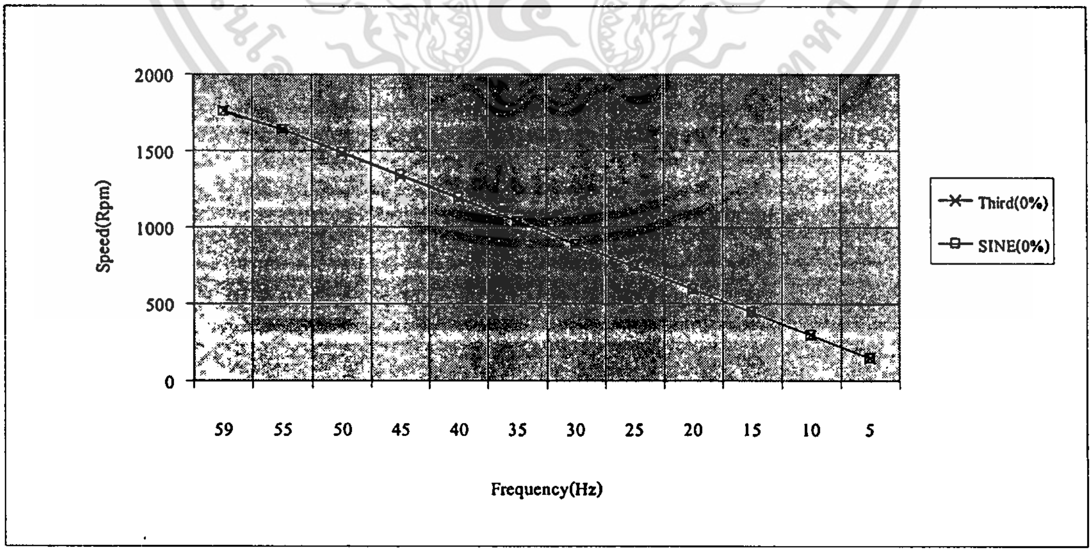


รูปที่ 5.38 กราฟเปรียบเทียบการจ่ายภาระโหลดทางกลของมอเตอร์เมื่ออินพุตของมอเตอร์มาจากระบบไฟฟ้าปกติและจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิค Third-Harmonic Injection PWM , SINE PWM

ในรูปที่ 5.38 เป็นการเปรียบเทียบความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อทดสอบด้วยการจ่ายแรงดันและความถี่ที่พิกัดของมอเตอร์ ซึ่งได้จากระบบไฟฟ้าปกติที่ผ่านการควบคุมแรงดันให้คงที่ด้วย Variac และจากอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ใช้เทคนิคการสวิตช์แบบ

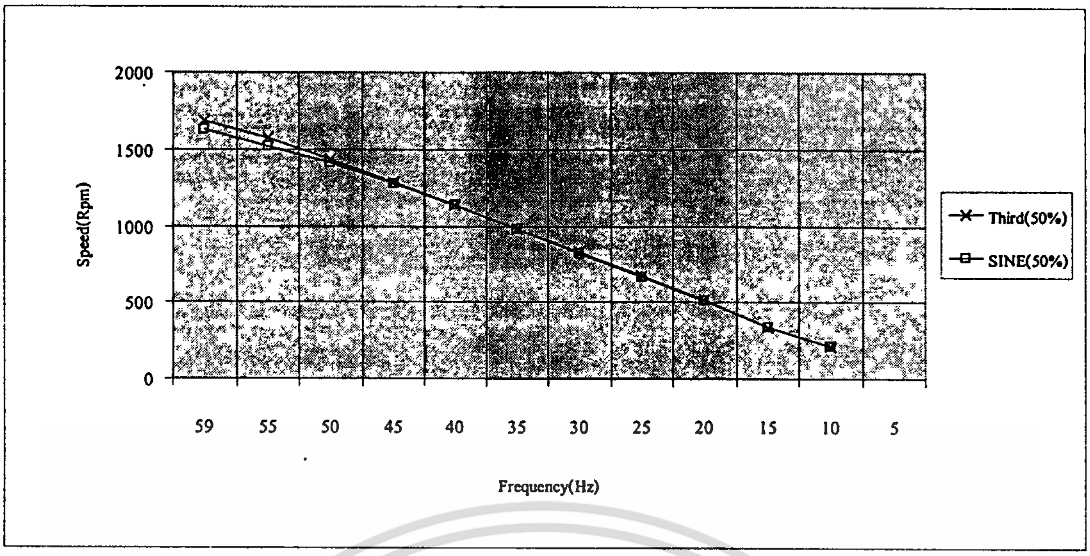
Third-Harmonic Injection PWM ที่นำเสนอและจากอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ใช้เทคนิค SINE PWM แบบดั่งเดิม โดยการให้มอเตอร์หมุนโดยไม่มีภาระทางกลและให้มอเตอร์มีภาระทางกล 50% ของพิกัด (2.5N-m) และมีภาระทางกลที่พิกัดของมอเตอร์ (5.3N-m) ผลที่ได้คือในขณะที่มอเตอร์ไม่มีภาระทางกลความเร็วรอบของมอเตอร์อยู่ในระดับเดียวกัน แต่เมื่อเพิ่มภาระทางกลขึ้นเป็น 2.5N-m และ 5N-m วิธีดั่งเดิมไม่สามารถสร้างแรงบิดให้มากพอเนื่องจากแรงดันไลน์ถูกจำกัดที่ 86.6% ของไฟฟ้าด้านเข้าทำให้ความเร็วรอบต่ำลง ขณะที่วิธีการที่นำเสนอนั้นสามารถให้ความเร็วรอบเทียบเท่ากับการต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยตรงตลอดย่านโหลดจนถึงพิกัดโหลด ซึ่งตรงตามทฤษฎี

ในรูปที่ 5.39-5.41 เป็นการเปรียบเทียบความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อทดสอบด้วยการเปลี่ยนความถี่หลักมูลที่จ่ายให้มอเตอร์ด้วยการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่คงที่ (Constant V/F) และจากอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ใช้เทคนิคการสวิตช์แบบ Third-Harmonic Injection PWM ที่นำเสนอและจากอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ใช้เทคนิค SINE PWM แบบดั้งเดิม โดยการให้มอเตอร์หมุนโดยไม่มีภาระทางกลและมอเตอร์มีภาระทางกล 50% ของพิกัด (2.5N-m) และมีภาระทางกลที่พิกัดของมอเตอร์ (5.3N-m) ผลที่ได้คือในขณะที่มอเตอร์ไม่มีภาระทางกลความเร็วรอบของมอเตอร์อยู่ในระดับเดียวกันดังรูปที่ 5.39 แต่เมื่อเพิ่มภาระทางกลขึ้นเป็น2.5N-m และ 5N-m วิธีดั้งเดิมไม่สามารถสร้างแรงบิดให้มากพอทำให้ความเร็วรอบต่ำลง ขณะที่วิธีการที่นำเสนอนั้นสามารถให้ความเร็วรอบที่สูงกว่า(รูปที่ 5.40 และ 5.41) ในย่านความถี่หลักมูล 43Hz ขึ้นไป ซึ่งตรงตามทฤษฎี

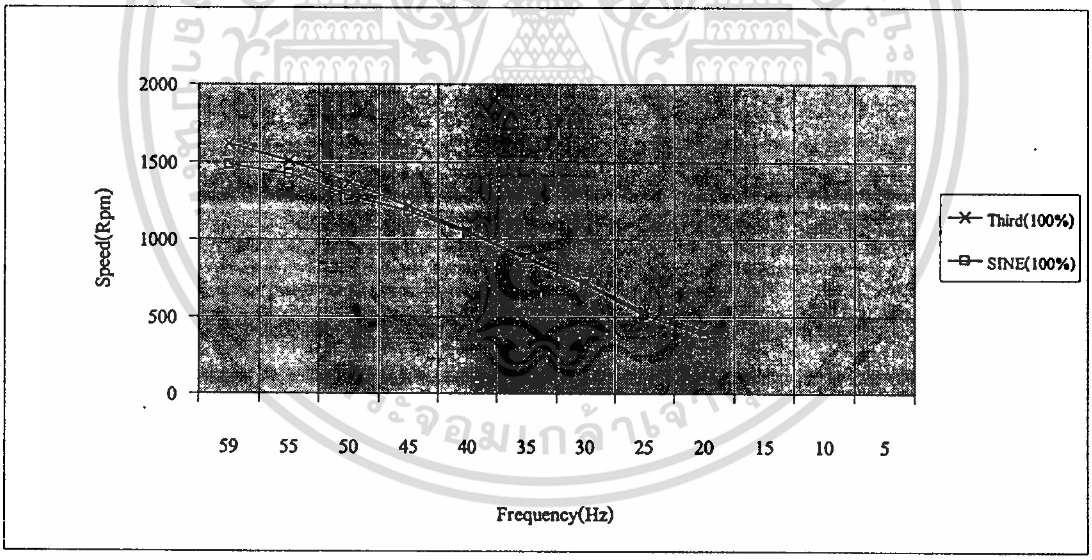


รูปที่ 5.39 กราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิค Third-Harmonic Injectionกับ SINE PWM เมื่อเปลี่ยนความถี่หลักมูลในขณะที่มอเตอร์ไม่มีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

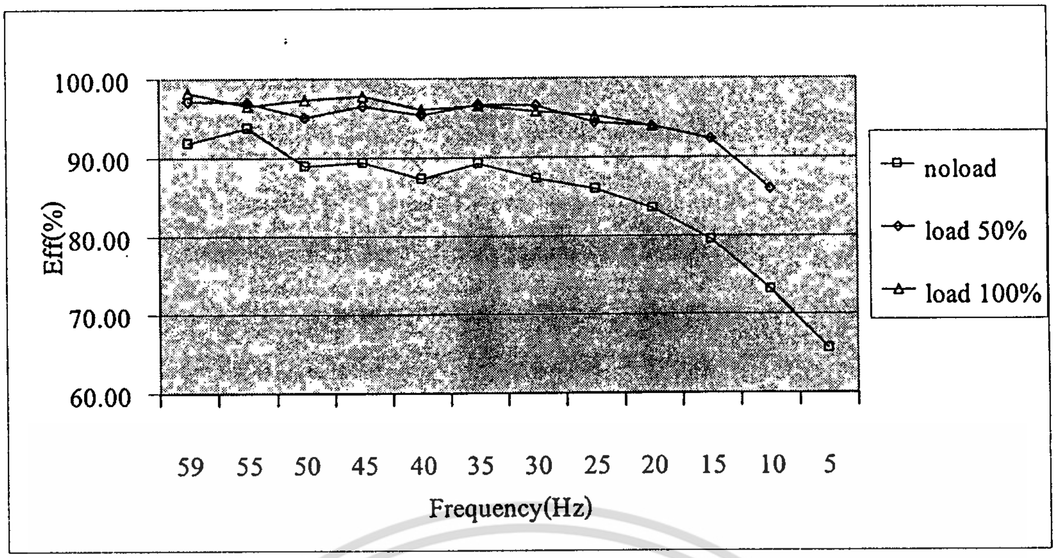


รูปที่ 5.40 กราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิค Third-Harmonic Injectionกับ SINE PWM เมื่อเปลี่ยนความถี่หลักมูลในขณะที่มอเตอร์มีภาระทางกล 50% ของพิกัด



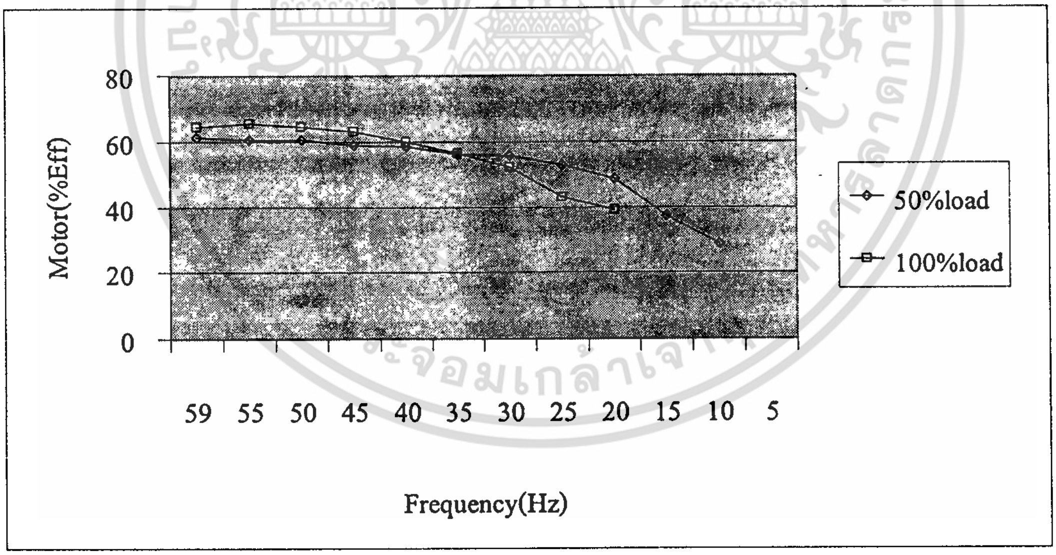
รูปที่ 5.41 กราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิค Third-Harmonic Injectionกับ SINE PWM เมื่อเปลี่ยนความถี่หลักมูลในขณะที่มอเตอร์มีภาระทางกล 100% ของพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.42 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิค Third-Harmonic Injection เมื่อเปลี่ยนความถี่หลักมูลในขณะที่มอเตอร์มีภาระทางกลระดับต่างๆ

รูปที่ 5.42 เป็นการนำเสนอกราฟประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ ที่ภาระโหลดค่าต่างๆ ในแต่ละช่วงความถี่หลักมูลซึ่งประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 98.29%



รูปที่ 5.43 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ใช้เทคนิค Third-Harmonic Injection เมื่อเปลี่ยนความถี่หลักมูลในขณะที่มอเตอร์มีภาระทางกลระดับต่างๆ

รูปที่ 5.41 เป็นการนำเสนอกราฟประสิทธิภาพของมอเตอร์ ที่ภาระโหลดค่าต่างๆ ในแต่ละช่วงความถี่หลักมูลซึ่งประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 65.49% ส่วนประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่พิกัดโหลดและความเร็วเท่ากับ 64.40 % ซึ่งใกล้เคียงกับเมื่อต่อกับระบบไฟฟ้าปกติในตารางที่ 5.1 ซึ่งอยู่ที่ 68.37%

อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบควบคุมแรงดันต่อความถี่คงที่นับว่าเป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับความนิยมนำมาประยุกต์ใช้กันมาก อาจเนื่องมาจากการควบคุมแบบนี้ไม่จำเป็นต้องทราบค่าคุณสมบัติเฉพาะของตัวมอเตอร์แต่ละตัว ทำให้สามารถใช้กับมอเตอร์ทุกยี่ห้อ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วก็เป็นการยากสำหรับผู้ใช้ทั่วไปที่จะหาคุณสมบัติเฉพาะดังกล่าว ซึ่งอาจจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่ซับซ้อนในการทดสอบหาคุณสมบัติของตัวมอเตอร์

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่ได้นำเสนอวิธีการสร้างสัญญาณ พี ดับบลิว เอ็ม แบบเธิดฮาร์มอนิกส์ อินเจ็คชั่น หรือการสร้าง พี ดับบลิว เอ็ม ที่มีการมอดูเลตฮาร์มอนิกส์ที่ 3 ขนาดที่เหมาะสมเข้าไปกับความถี่หลักมูล ทำให้สามารถเพิ่มขนาดของความถี่หลักมูลจากเดิมได้ถึง 1.154 เท่า โดยที่ขนาดของความถี่หลักมูลสูงสุดยังคงไม่เกินระดับแรงดันไฟตรง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่คงที่ ทำให้สามารถให้ขนาดของความถี่หลักมูลที่แรงดันไลน์สูงสุดเท่ากับระดับแรงดันไฟตรง หรือเพิ่มขึ้นจากวิธีการสร้างสัญญาณ พี ดับบลิวเอ็ม แบบไซน์ 15.4% โดยที่ฮาร์มอนิกส์ที่ 3 ที่มอดูเลตกับความถี่หลักมูลสามารถหักล้างกันระหว่างเฟสได้หมด ทำให้ไม่มีผลให้เกิดฮาร์มอนิกส์ต่ำเข้าไปที่ตัวมอเตอร์ ในขณะที่การสร้าง พี ดับบลิว เอ็ม แบบไซน์ดั้งเดิมสามารถให้ขนาดความถี่หลักมูลของแรงดันไลน์สูงสุดที่ 86.6% ของระดับแรงดันไฟตรง และถ้าต้องการเพิ่มขนาดของแรงดันไลน์ดังกล่าว อาจต้องใช้วิธีการมอดูเลตเกิน (Over mod) มีผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของความถี่หลักมูลหรือเกิดฮาร์มอนิกส์ต่ำขึ้นที่ตัวมอเตอร์ ส่งผลให้กำลังงานสูญเสียในตัวมอเตอร์เพิ่มขึ้น

จากวิธีการที่นำเสนอนั้นสามารถให้ขนาดความถี่หลักมูลของแรงดันไลน์สูงสุดเท่ากับระดับแรงดันไฟตรงนั้นหมายถึง แรงดันไลน์ที่เอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์มีขนาดเทียบเท่าขนาดของแรงดันไลน์ของระบบไฟฟ้าปกติป้อนเข้ามายังอินเวอร์เตอร์ผ่านวงจรเร็คติไฟร์ ทำให้การจ่ายภาระโหลทางกลของมอเตอร์ ที่ความถี่และแรงดันพิกัดของมอเตอร์จากการสร้าง พี ดับบลิว เอ็ม แบบเธิดฮาร์มอนิกส์อินเจ็คชั่น ที่นำเสนอให้ผลเทียบเท่ากับการต่อมอเตอร์กับระบบไฟฟ้าปกติ ดังแสดงในผลการทดลองหัวข้อที่ 5.2 ส่วนในย่านความถี่หลักมูลอื่นๆตั้งแต่ความถี่หลักมูล 43.3-50Hz วิธีการที่นำเสนอก็สามารถให้ผลการทำงานของมอเตอร์ที่ดีกว่าด้วยการรักษาระดับความเร็วที่ข้อนข้างเป็นเชิงเส้นกว่าวิธีการดั้งเดิมในขณะที่ภาระทางกลของมอเตอร์เพิ่มขึ้น

ระบบอินเวอร์เตอร์ต้นแบบที่นำเสนอนั้นใช้ตัวประมวลผลเชิงเลข เป็นตัวสร้างสัญญาณ พี ดับบลิว เอ็ม เพื่อขับนำอุปกรณ์กำลัง ซึ่งรูปแบบการสวิตช์จะทำการคำนวณใหม่ทุกๆคาบเวลาการสวิตช์ โดยที่ไม่มีการเก็บตารางการสวิตช์ไว้ในหน่วยความจำ ทำให้อินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอมีประสิทธิภาพสูงถึง 97.37% ที่พิกัดความถี่และพิกัดภาระทางกลของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้วิธีการสร้างสัญญาณ พี ดับบลิว เอ็ม แบบเธิด ฮาร์มอนิกส์ อินเจ็คชั่น นั้นเป็นวิธีการหนึ่งที่มีการนำมาใช้พอสมควรแต่ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ อาจจำเป็นต้องใช้ตัวประมวลผลที่มีความเร็วในการประมวลผลที่สูง โดยที่ไม่จำเป็นต้องเก็บตารางการสวิตช์ไว้ในหน่วยความจำ หรือใช้ตัวประมวลผลที่มีความเร็วไม่สูงมากนักแต่ต้องการหน่วยความจำในการเก็บตารางการสวิตช์ที่มาก เพื่อให้คงไว้ซึ่งความถี่หลักมูลที่มีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกส์ต่ำน้อยที่สุด และสามารถที่จะตอบสนองการเปลี่ยนความถี่หลักมูลที่กว้าง

วิธีการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยการควบคุมแรงดันต่อความถี่คงที่นั้นจากผลการทดสอบในบทที่ 5 จะเห็นได้ว่าการทำงานของมอเตอร์ที่ความถี่หลักมูลต่ำกว่า 20 Hz มอเตอร์ไม่สามารถรักษาความเร็วรอบให้เป็นเชิงเส้นได้เมื่อภาระทางกลเพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะค่าความต้านทานภายในของขดลวดในตัวมอเตอร์ที่ส่งผลชัดเจนเมื่อความถี่ต่ำ ซึ่งอาจชดเชยด้วยการเพิ่มขนาดของความถี่หลักมูลขึ้น แต่ก็ต้องคำนึงถึงค่ากระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์และความร้อนที่เกิดขึ้นซึ่งจะเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] Ying-Yu Tzou and Hau-Jean Hsu. 1997.**"FPGA Realization of Space-Vector PWM Control IC for Three-Phase PWM Inverter."** IEEE Transactions on Power Electronic. VOL.12, NO.6 November: 953-963.

[2] Andrzej M. Trzynadlowski and Stanislaw Legowski. 1994. **"Minnimum-Loss Vector PWM Stategy for Three-Phase Inverters."** IEEE Transactions on Power Electronic. VOL.9, NO.1 January: 26-34.

[3] Thomas G. Habetler, Francesco Profumo, Michele Pastorelli and Leon M. Tolbert. 1992. **"Drirect Torque Control of Induction Machines Using Space Vector Modulation."** IEEE Transactions on Industry Applications. VOL.28, NO.5 September/October: 1045-1053.

[4] Renato O. C. Lyra and Thomas A. Lipo. 2002. **"Torque Density Improvement in a Six-Phase Induction Motor With Third Harmonic Current Injection."** IEEE Transactions on Industry Applications. VOL.38, NO. 5 September/October: 1351

[5] Ahmet M. Hava,Seung-Ki Sul, Russel J. Kerkman and Thomas A. Lipo. 1999. **"Dynamic Overmodulation Characteristics of Triangle Intersection PWM Methods."** IEEE Transactions on Industry Applications. VOL.35, NO.4 July/August

[6] Muhammad H. Rashid. 2004. **Power Electronics Circuit , Devices , and Applications.** Third Edition. Pearson Education International: USA.

[7] John G. Kassakian Martin F. Schlecht George C. Verghese. 1991. **Principle of Power Electronics**. Addison-Wesley Publishing: Massachusets USA.

[8] Muhammad H. Rashid. 2001. **Power Electronics Handbook**. Academic Press: Canada.

[9] โคทม อารียา. 2544. **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2.** ซีเอ็ดยูเคชั่น: กรุงเทพฯ.

[10] ไชยชาญ หินเกิด. **เครื่องกลไฟฟ้า2** .กรุงเทพมหานคร: พิมพ์ครั้งที่3 สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ไทย- ญี่ปุ่น, พ.ศ.2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

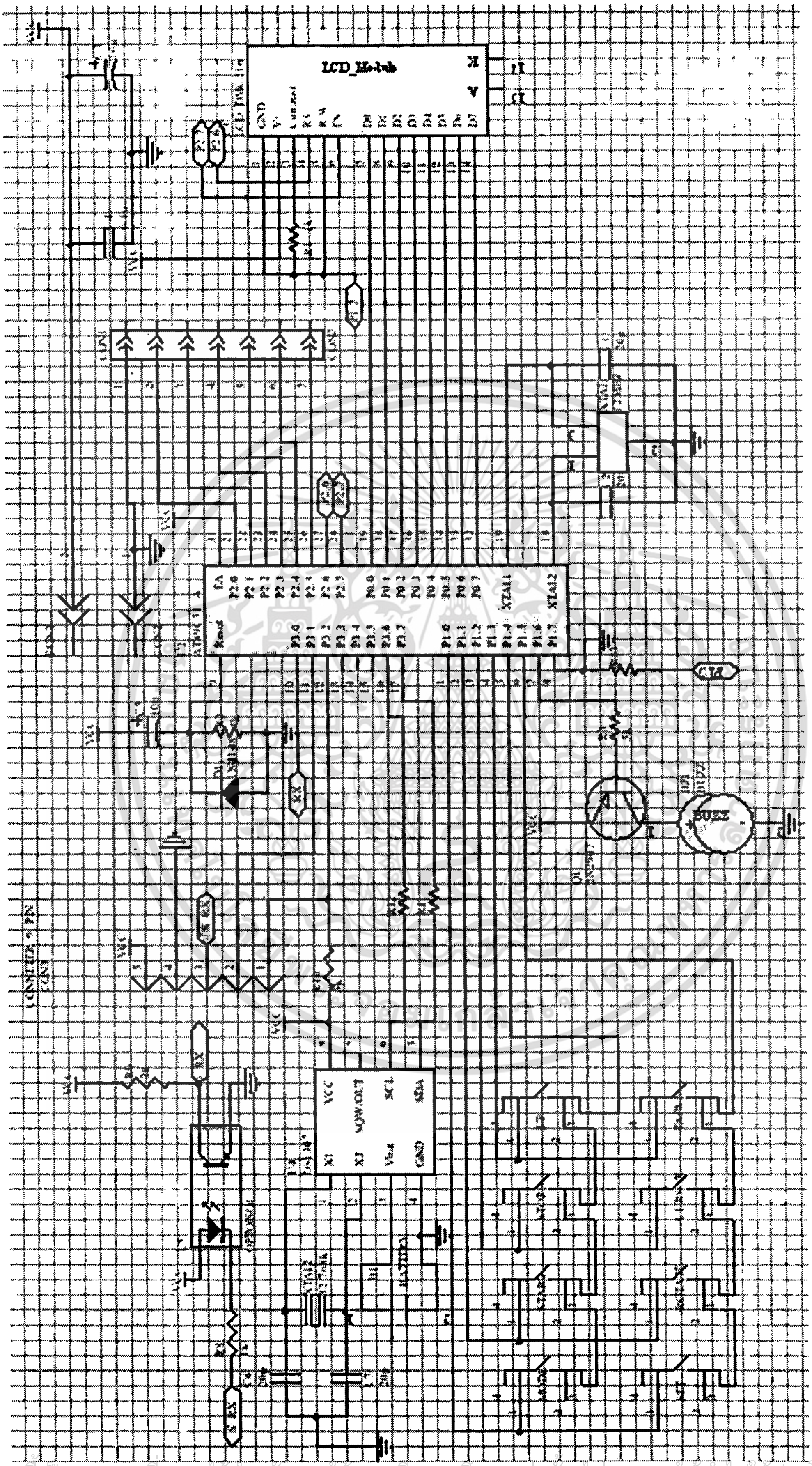
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

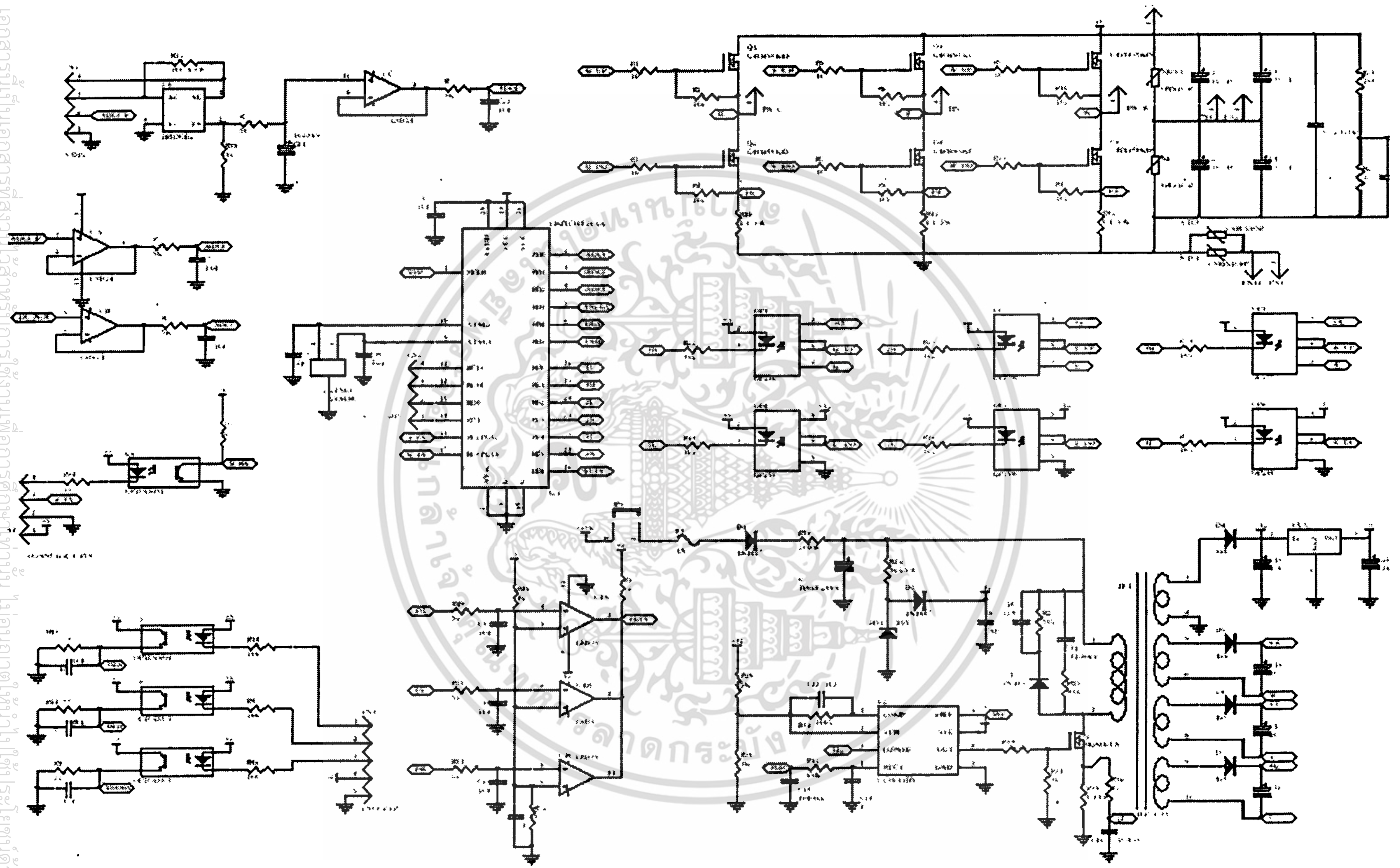
วงจรรวมที่ใช้ในระบบควบคุมมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 วงจรรวมส่วนของ MCS-51 สำหรับติดต่อกับผู้ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 วงจรรวมส่วนของ DSP สำหรับสร้างสัญญาณ PWM พร้อมภาค Inverter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

โปรแกรมที่ใช้ในระบบควบคุมมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมส่วนของ MCS-51

```
#include <reg51.h>
#include <lcd2051.h>
#include <intrins.h>
#include <i2c2051.h>
sbit co1 = P1^0;
sbit co2 = P1^1;
sbit co3 = P1^2;
sbit co4 = P1^3;
sbit ro1 = P1^4;
sbit ro2 = P1^5;
sbit buz = P1^6;
int b;
int key;
int serial_data,speed,vdc,io;
char s_fir,s_ten,s_hu,s_th;
char f_fir,f_ten,f_hu,f_th;
char v_fir,v_ten,v_hu;
char i_pri,i_sec,i_thi;
char start = 0,ro_tate = 0;
int loop = 1,f_c = 0,f_t=0,fo;
int mo = 0,m_c = 0,m_t = 0;
char form,update = 0,manu=1;
float f_mo;
//int fc_r,ft_r;
#define DS1307_wr 0xd0
#define DS1307_rd 0xd1
#define fc 0x08
#define ft 0x09

void ds1307_wr()
{
  i2c_start();                          // i2c start condition
  i2c_wrdata(DS1307_wr);   // Write DS1307 ID for connect
  i2c_wrdata(fc);      // f add
  i2c_wrdata(f_c);
  i2c_wrdata(f_t);
  i2c_stop();                                    // i2c stop condition
}
void ds1307_rd()
{
  i2c_start();                          // i2c start condition
  i2c_wrdata(DS1307_wr);   // Write DS1307 ID for connect
  i2c_wrdata(fc);
  i2c_stop();
  i2c_start();
  i2c_wrdata(DS1307_rd);   // Write DS1307 ID for connect
  f_c = i2c_rddata();
  i2c_ACK();
  f_t = i2c_rddata();
  i2c_NACK();
  i2c_stop();                                    // i2c stop condition
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงแหล่งที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  if(f_c>9)f_c = 0;
  if(f_t>6)f_t = 0;
}
void rtc(void)
{


}
void lcd_vdc(void)
{
        while(form)
        {
                lcd_puts(line2,"DC   V Io  . A");
                form=0;update=1;
        }
        while(update)
        {
                lcd_puts(0xca," . ");
                inttolcd(0xcb,i_pri,10);
                inttolcd(0xcd,i_sec,10);
                inttolcd(0xce,i_thi,10);
                lcd_puts(0xc2,"  ");
                if(vdc>=0&&vdc<100)inttolcd(0xc4,vdc,10);
                if(vdc>99)inttolcd(0xc3,vdc,10);
                update = 0;
        }
}
void lcd_speed(void)
{
        while(form)
        {
                lcd_puts(line2,"F   Hz F   Rpm");
                form=0;update=1;
        }
        while(update)
        {
                inttolcd(0xc2,f_t,10);
                inttolcd(0xc3,f_c,10);
                lcd_puts(0xc9,"   ");
                if(speed>=0&&speed<100)inttolcd(0xcb,speed,10);
                if(speed>99&&speed<1000)inttolcd(0xca,speed,10);
                if(speed>999)inttolcd(0xc9,speed,10);
                update = 0;
        }
}
void monitor(void)
{
                serial_data = SBUF;
                if(serial_data>=0&&serial_data<40)                          //speed
                {       if(serial_data<10){s_fir = serial_data;}
                        if(serial_data>9&&serial_data<20){s_ten = serial_data-10;}
                        if(serial_data>19&&serial_data<30)s_hu = serial_data-20;
                        if(serial_data>29)s_th = serial_data-30;
                        speed = (s_th*1000)+(s_hu*100)+(s_ten*10)+s_fir;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            }
            /*if(serial_data>39&&serial_data<80)                                  //frequancy
            {       if(serial_data<50)f_fir = serial_data;
                    if(serial_data>49&&serial_data<60)f_ten = serial_data;
                    if(serial_data>59&&serial_data<70)f_hu = serial_data;
                    if(serial_data>69)f_th = serial_data;
                    f_mo = ((f_th*1000)+(f_hu*100)+(f_ten*10)+f_fir)/100;
            }*/
            if(serial_data>79&&serial_data<110)                                   //volt
            {       if(serial_data<90)v_fir = serial_data-80;
                    if(serial_data>89&&serial_data<100)v_ten = serial_data-90;
                    if(serial_data>99)v_hu = serial_data-100;
                    vdc = (v_hu*100)+(v_ten*10)+v_fir;
            }
            if(serial_data>109&&serial_data<140)                                  //current
            {       if(serial_data<120)i_thi = serial_data-110;
                    if(serial_data>119&&serial_data<130)i_sec = serial_data-120;
                    if(serial_data>129)i_pri = serial_data-130;
                    //io = (i_thi*100)+(i_sec*10)+i_pri;
            }
            update = 1;
}
void tx(char sent)
{
        char sent;
        while(!RI)
            {
                    if(!TI)
                    {
                            SBUF = sent;
                            while(~TI);
                            TI = 0;
                    }
            }
        RI = 0;
}
void start_m()
{
        start = 1;
        tx(fo);
}
void stop_m()
{
        start = 0;
        tx(0);
}
void buzzer(int bt)                     //beep!
{
        int t,a;
        buz = 1;
        for(t=0;t<bt;t++)
        {
                buz = ~buz;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                for(a=0;a<100;a++);
        }
}
void sc_key(void)                               //scan key
{
        co1 = 1;
        co2 = 1;
        co3 = 1;
        co4 = 1;
        key = 0;
        ro1 = 0;
        ro2 = 1;
//asm ("clr A");
        if(co1 == 0)if(co1 == 0)if(co1 == 0){_nop_();buzzer(200);key = 1;} //mode
        if(co2 == 0)if(co2 == 0)if(co2 == 0){buzzer(200);key = 2;}      //start
        if(co3 == 0)if(co3 == 0)if(co3 == 0){buzzer(200);key = 3;}      //stop
        if(co4 == 0)if(co4 == 0)if(co4 == 0){buzzer(200);key = 4;}      //up
        while(!(co1&&co2&&co3&&co4));
        ro1 = 1;
        ro2 = 0;
        if(co1 == 0)if(co1 == 0)if(co1 == 0){buzzer(200);key = 5;}      //set
        if(co2 == 0)if(co2 == 0)if(co2 == 0){buzzer(200);key = 6;}      //rotate
        if(co3 == 0)if(co3 == 0)if(co3 == 0){buzzer(200);key = 7;}      //curcor
        if(co4 == 0)if(co4 == 0)if(co4 == 0){buzzer(200);key = 8;}      //down
        while(!(co1&&co2&&co3&&co4));
}
void delay(int de_t)                    //delay time
{
        int t,a;
        for(t=0;t<de_t;t++)
        {
                for(a=0;a<100;a++);
        }
}
void in_serial(void)
{
        SCON = 0x50;            // Configuration for serial port Rx/Tx data
        TMOD = 0x21;            // Timer 1 mode 2(8 bit auto reload for serial baudrate)
        PCON = 0x80;            //smod set
        TH1 = 0x98;             // Reload value for serial baudrate(9600 bps)
        TL1 = 0xFF;
//      EA      = 1;
        ES = 1;
//      ET2 = 0;
        ET1 = 0;
        ET0 = 0;
        EX0 = 0;
        EX1 = 0;
        TI = 0;                         // Hold bit flag TI
        TR1 = 1;                        // Start timer1 for serial port communication
}
void frequancy(int loop)
{
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
//---------Manu 1---------//
        form =1;update = 1;
        while(loop==1)
        {
                //while(form)
                {
                        //lcd_puts(line1,"   Frequancy    ");
                }
                lcd_speed();
                sc_key();

        if(RI)
        {
                RI = 0;
                monitor();
        }
                //lcd_command(7);                        //$cursor
                switch(key)
                        {
                                case 1:     loop = 0;form=1;                   //mode
                                                        lcd_command(0x0c); //off
                                                        break;
                                case 2:     start_m();
                                                        break;
                                case 3:     stop_m();
                                                        break;
                                case 4:     f_c++;                                          //up
                                                        if(f_c == 10)
                                                        {
                                                                f_c = 0;        //clr 0x
                                                                f_t++;
                                                                if(f_t > 5){f_t = 5;f_c = 9;}  //clr x0
                                                                inttolcd(0xc2,f_t,10);
                                                        }
                                                        inttolcd(0xc3,f_c,10);
                                                        break;
                                case 5:     fo = (f_t*10)+f_c;                                      //set
                                                        lcd_command(0x0c); //off
                                                        if(start) tx(fo);
                                                        ds1307_wr(f_c,f_t);
                                                        break;
                                case 6:     tx(201);
                                                        break;
                                case 7:     tx(110);
                                                        //lcd_command(0x0f);              //cursor on
                                                        //lcd_command(0xc3);              //cursor locate
                                                        break;
                                case 8:     if(f_c == 0)
                                                        {
                                                                f_c = 10;
                                                                if(f_t == 0){f_t = 1;f_c = 1;}
                                                                f_t--;               //down
                                                                inttolcd(0xc2,f_t,10);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                                                            }
                                                            f_c--;
                                                            inttolcd(0xc3,f_c,10);

                                                            break;
                              }
        }
//----------Manu 2----------//
        form = 1;update = 1;
                while(loop==2)
        {
                //while(form)
                {
                        //lcd_puts(line2,"M   % F    Rpm");
                        //lcd_puts(line1," Modulation  ");
                }
                lcd_speed();
                sc_key();

        if(RI)
        {
                RI = 0;
                monitor();
        }
                //lcd_command(7);                        //$cursor
                switch(key)
                        {
                                case 1:   loop =1;               //mode
                                          lcd_command(0x0c); //off
                                          break;
                                case 2:   start_m();
                                          break;
                                case 3:   stop_m();
                                          break;
                                case 4:   if(m_t<10)m_c++;       //up
                                          if(m_c == 10)
                                          {
                                                  m_c = 0;      //clr 0x
                                                  m_t++;
                                                  if(m_t >= 10){m_t = 10;m_c = 0;}  //clr x0
                                                  if(m_t==10)inttolcd(0xc1,m_t,10);
                                                  else {inttolcd(0xc2,m_t,10);}
                                          }
                                                  inttolcd(0xc3,m_c,10);
                                                  break;
                                case 5:   mo = ((m_t*10)+m_c);    //set
                                                  lcd_command(0x0c); //off
                                                  if(start) tx(mo+100);
                                                  break;
                                case 6:   tx(201);
                                          /*if(!ro_tate)
                                          {
                                                  tx(201);
                                          {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                                        lcd_command(0xC8);
                                        lcd_text('R');
                                        ro_tate = 1;
                                }       //rotate
                                if(ro_tate)
                                {
                                        tx(255);
                                        lcd_command(0xC8);
                                        lcd_text('F');
                                        ro_tate = 0;
                                }*/
                                break;
                        case 7: //tx(110);      //lcd_command(0x0f);        //cursor on
                                                //lcd_command(0xc3);        //cursor locate
                                break;
                        case 8: if(m_t==10)lcd_puts(0xc1,"  ");
                                if(m_c == 0)
                                {
                                        m_c = 10;
                                        if(m_t == 0){m_t = 1;m_c = 1;}
                                        m_t--;                  //down
                                        inttolcd(0xc2,m_t,10);
                                }
                                        m_c--;
                                        inttolcd(0xc3,m_c,10);
                                        break;
                }
        }
}
void main()
{
        lcd_init();
        lcd_clear();
        lcd_origin();
        lcd_puts(line1,"    Hallo     ");
        in_serial();
        delay(15000);
        ds1307_rd();
        fo = (f_t*10)+f_c;
        if(fo){start = 1;tx(fo);}
        while(1)
        {
                lcd_puts(line1,"  Main Manu   ");
        if(RI)
        {
                RI = 0;
                monitor();
        }
        if(manu==1)lcd_speed();
        if(manu==2)lcd_vdc();
        frequancy(1);
                /*sc_key();
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if(key)
{
	switch(key)
	{
		case 1:	frequancy(1);		//lcd_puts(line2,"key mode1 ");
			break;
		case 2:	start = 1;tx(fo);	//start
			break;
		case 3:	tx(0);			//stop
			start = 0;break;
		case 4:	manu=2;form=1;		//up
			break;
		case 5:				//set
			break;
		case 6:	tx(201);
			/*if(!ro_tate)
			{
				tx(201);
				lcd_command(0xC8);
				lcd_text('R');
				ro_tate = 1;
			}	//rotate
			if(ro_tate)
			{
				tx(255);
				lcd_command(0xC8);
				lcd_text('F');
				ro_tate = 0;
			}*
			break;
		case 7:				//cursor locate
			break;
		case 8:	manu=1;form=1;		//down
			break;
	}
	delay(100);

}*/
	}
}
```

โปรแกรมส่วนของการสร้าง PWM

```
// Program : PWM for 3 phase induction motor
#include<p30f2010.h>
#include<pwm.h>
#include<math.h>
#include<uart.h>
#include<InCap.h>			// Module function for Input Capture
#include<timer.h>
#include<qei.h>
#include<adc10.h>
void pwm_initial();
//variable for system
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
short x=100,y=100,z=100;
int t,ys,zs,us,f_new=0;
float pi,m,st,cly,f=1;
int j,k[151],l;
int kx,ky,kz,kj;
unsigned int speed;
unsigned int count=0;
char f_mem,rotate=0,en_rot=0;
int table=150;
int io,vdc;
char i_pri,i_sec,i_thi;
char v_fir,v_ten,v_hu;
char s_fir,s_ten,s_hu,s_th;
char f_fir,f_ten,f_hu,f_th;
#define pi 3.14
#define us 10000
#define over_m1 1.1547
#define over_m3 0.1925
void _ISR _ADCInterrupt(void)
{
        IFS0bits.ADIF = 0;
        io = ReadADC10(0);
        io-=80;io/=4;io*=2.12;
        i_pri = i_sec = i_thi = 0;
        while(io>99){io-=100;i_pri++;}i_pri+=130;
        while(io>9){io-=10;i_sec++;}i_sec+=120;
        i_thi = io+110;
        vdc = ReadADC10(1);
        //vdc*= 1.145;
        v_hu = v_ten = v_fir = 0;
        while(vdc>99){vdc-=100;v_hu++;}v_hu+= 100;
        while(vdc>9){vdc-=10;v_ten++;}v_ten+= 90;
        v_fir = vdc+80;
}
void adc_init()
{
        unsigned int Channel, PinConfig, Scanselect, Adcon3_reg, Adcon2_reg,Adcon1_reg;
        ADCON1bits.ADON = 0;            // Turn on ADC
        Channel     =       ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN0 &   // Channel 0 positive input select AN0
                            ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN1 &   // Channel 0 positive input select AN1
                            ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN2 &   // Channel 0 positive input select AN2
                            ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN3 &   // Channel 0 positive input select AN3
                            ADC_CH0_NEG_SAMPLEA_NVREF ;          // Channel 0 negative VREF
        SetChanADC10(Channel);                                   // Set channel configuration
        ConfigIntADC10(ADC_INT_ENABLE & ADC_INT_PRI_3);          // Disable interrupt for ADC
        PinConfig   =       ENABLE_AN0_ANA &                     // Enable AN0-AN3 analog port
                            ENABLE_AN1_ANA &
                            ENABLE_AN2_ANA &
                            ENABLE_AN3_ANA ;
        Scanselect  =       SKIP_SCAN_AN4 &                      // Scan for AN0-AN3
                            SKIP_SCAN_AN5 &
                            SKIP_SCAN_AN6 &
                            SKIP_SCAN_AN7;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        Adcon3_reg =        ADC_SAMPLE_TIME_10 &                    // Sample for 10 time
                            ADC_CONV_CLK_INTERNAL_RC &              // Internal Clock
                            ADC_CONV_CLK_13Tcy;
        Adcon2_reg =        ADC_VREF_AVDD_AVSS &                    // Vref at Vdd and Vss
                            ADC_SCAN_ON &                           // Enable scan for ADC
                            ADC_ALT_BUF_OFF &                       // Disable alternate buffer
                            ADC_ALT_INPUT_OFF &                     // Disable alternate input
                            ADC_CONVERT_CH0&                        // Select CH0 convert
                            ADC_SAMPLES_PER_INT_16;                 // 16 sample between interrupt
        Adcon1_reg =        ADC_MODULE_ON &                         // Enable module ADC
                            ADC_IDLE_CONTINUE &                     // ADC run on idle mode
                            ADC_FORMAT_INTG &                       // Output value integer format
                            ADC_CLK_MPWM &                          // ADC manual clock
                            ADC_SAMPLE_SIMULTANEOUS &               // ADC sampling simultaneous
                            ADC_AUTO_SAMPLING_ON;                   // ADC auto sampling
        OpenADC10(Adcon1_reg, Adcon2_reg,Adcon3_reg,PinConfig, Scanselect);   // Turn on ADC module
}
void _ISR _QEIInterrupt(void)
{
        POSCNT = 0;
        IFS2bits.QEIIF = 0;
}
void qei_init(void)
{
        unsigned int config_qei,config_filter;
        ADPCFG = 0xFFFF;
        ConfigIntQEI(QEI_INT_PRI_1 &QEI_INT_ENABLE);
        POSCNT = 0;
        MAXCNT = 50000;
        config_qei = (QEI_DIR_SEL_CNTRL &
                QEI_EXT_CLK &
                QEI_INDEX_RESET_DISABLE &
                QEI_CLK_PRESCALE_1 &
                QEI_GATED_ACC_ENABLE &
                QEI_NORMAL_IO &
                QEI_INPUTS_NOSWAP &
                QEI_MODE_TIMER &
                QEI_UP_COUNT &
                QEI_IDLE_CON);
        config_filter = (QEI_QE_OUT_ENABLE & QEI_QE_CLK_DIVIDE_1_256);
        OpenQEI(config_qei,0);
}
//pwm interrupt & calculation duty
//Interrupt service routine Capture every Falling edge
void _ISR _IC2Interrupt(void)
{
        IFS0bits.IC2IF = 0;             // Clear IC2 interrupt flag
        //speed_count++;                // Increase frequency counter value 1 time
}
void _ISR _PWMInterrupt(void)
{
        IFS2bits.PWMIF = 0;             //clr pwm interrupt
        st+=cly;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        if(!rotate)                                     //FF
        {
                SetDCMCPWM(1,x,0);                      //chanel,duty,updatedisable
                SetDCMCPWM(2,y,0);
                SetDCMCPWM(3,z,0);
        }
        else                                            //RE
        {
                SetDCMCPWM(1,x,0);                      //chanel,duty,updatedisable
                SetDCMCPWM(2,y,0);
                SetDCMCPWM(3,z,0);
        }//Encoder
        count++;
        if(count>=10000)                                // Block for 5 sec
        {
                count = 0;                              // Clear counter value
                speed = ReadQEI();                      // Keep frequency count value
                POSCNT = 0;                             // Clear frequency count value
                speed*=60;
                speed/=9;
                {
                        s_fir=s_ten=s_hu=s_th=0;
                        while(speed>999){speed-= 1000;s_th++;}s_th+=30;
                        while(speed>99){speed-= 100;s_hu++;}s_hu+=20;
                        while(speed>9){speed-= 10;s_ten++;}s_ten+=10;
                        s_fir=speed;
                }
        }
}
void capture_init()
{
        ConfigIntCapture2(IC_INT_PRIOR_1 & IC_INT_ON);  // Enable IC1 interrupt
        T3CON = 0x8000;                                 // Start timer 3
        OpenCapture2(IC_IDLE_STOP &                     // Capture disable in idle mode
        IC_TIMER3_SRC &                                 // Timer 3 count for IC1
        IC_INT_1CAPTURE &                               // Capture per 1 count for interrupt
         IC_EVERY_FALL_EDGE);                           // Capture every falling edge only
}
void _ISR _FLTAInterrupt(void)
{
        IFS2bits.FLTAIF = 0;
}
void _ISR _U1TXInterrupt(void)
{
        IFS0bits.U1TXIF = 0;                            // Clear TX interrupt flag
}
void _ISR _U1RXInterrupt(void)
{
        int f_rx;
        f_rx = ReadUART1();
        if(f_rx==201){en_rot=1;if(!f_new){if(rotate)rotate=0;else rotate=1;en_rot=0;}}
        if(f_rx>=0&&f_rx<60)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            {
                        if(!f_new){if(f_rx)pwm_initial();}
                        f_new = f_rx;
                        en_rot=0;
            }
            IFS0bits.U1RXIF = 0;                                    // Clear RX interrupt flag
            WriteUART1(255);
}
void uart1_init()
{
            unsigned int baudvalue;                                 // Keep baud rate value for Load into U1BRG
            unsigned int U1MODEvalue;                               // Keep value for Load into U1MODE
            unsigned int U1STAvalue;                                // Keep value for Load into U1STA

            CloseUART1();                                           // Disable UART1
            ConfigIntUART1(UART_RX_INT_EN &                                      // Enable RX interrupt UART1
                                    UART_RX_INT_PR6 &               // Set RX interrupt Priority ==>6
                                    UART_TX_INT_EN &                // Enable TX interrupt UART1
                                    UART_TX_INT_PR2);               // Set RX interrupt Priority ==>2
            baudvalue = 2082;                                       // Baud rate 600 bps
            U1MODEvalue =           UART_EN &                       // Enable UART1
                                    UART_IDLE_CON &                 // UART1 working in idle mode
                                    UART_RX_TX&                     // UART1 normal pin(TX==>RF3 pin,RX==>RF2 pin)
                                    UART_DIS_WAKE &                 // Disable wake-up on start UART
                                    UART_DIS_LOOPBACK &             // Disable loop back mode
                                    UART_DIS_ABAUD &                // Disable autobaud mode
                                    UART_NO_PAR_8BIT &              // Set data 8 bit ,no parity bit
                                    UART_1STOPBIT;                          // Set 1 stop bit
            U1STAvalue =            UART_INT_TX_BUF_EMPTY &         // Interrupt on buffer empty mode
                                    UART_TX_PIN_NORMAL &            // TX Break bit normal
                                    UART_TX_ENABLE &                // Enable TX for UART
                                    UART_INT_RX_3_4_FUL&            // UART interrupt receive mode
                                    UART_ADR_DETECT_DIS &           // Disable detect address mode
                                    UART_RX_OVERRUN_CLEAR;          // Reset buffer over run
            OpenUART1(U1MODEvalue, U1STAvalue, baudvalue);          // Execute configuration for UART1
}
void pwm_initial()
{
unsigned int config;
unsigned int config1;
unsigned int config2;
unsigned int config3;
unsigned int period;
unsigned int dutycyclereg;
unsigned int dutycycle;
unsigned int sptime;
unsigned char updatedisable;
unsigned int duty1,duty2,duty3;

#define period 0x03e7                                   //time 100 uS/10kHz
#define EC_IO
//Deadtime Configuration
SetMCPWMDeadTimeGeneration(PWM_DTAPS1 PWM_DTA30);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
//Interrupt Configuration
ConfigIntMCPWM(PWM_INT_EN &
                    PWM_FLTA_EN_INT &
                    PWM_INT_PR7);
//cofiguration to fltacon register
SetMCPWMFaultA(PWM_OVA1H_ACTIVE &
                    PWM_OVA2H_ACTIVE &
                    PWM_OVA3H_ACTIVE &
                    PWM_FLTA_MODE_LATCH &
                    PWM_FLTA1_EN &
                    PWM_FLTA2_EN &
                    PWM_FLTA3_EN);
sptime = 0x0000;
//configuration to ptcon register
config1 = (PWM_EN &
                    PWM_OP_SCALE1 &
                    PWM_IPCLK_SCALE1 &
                    PWM_MOD_UPDN );
//configuration to pwmcon1 register
config2 = (PWM_MOD1_COMP &          //Complimentary Mode
                    PWM_MOD2_COMP &
                    PWM_MOD3_COMP &
                    PWM_PEN3H &                    //Configuration pwm port
                    PWM_PEN2H &
                    PWM_PEN1H &
                    PWM_PEN3L &
                    PWM_PEN2L &
                    PWM_PEN1L );
//configuration to pwmcon2 register
config3 = (PWM_SEVOPS1 &
                    PWM_OSYNC_PWM &
                    PWM_UEN);
OpenMCPWM(period,sptime,config1,config2,config3);
}
void frequancy(void)
{
        if(en_rot==1)
        {
                f_mem=f_new;
                f_new=1;
                en_rot=2;
        }
        if(f<1)
        {       if(!f_new)
                {CloseMCPWM();while(!f_new);}
                if(en_rot==2)
                {f_new=f_mem;en_rot=0;if(rotate)rotate=0;else rotate=1;}
        }
        if(f>f_new)
                f-=0.1;
        if(f<f_new)
                f+=0.1;
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
int main()
{
        {
                for(t=1;t<=table;t++)
                {
                        k[t]=(1000*sin(2*pi*t/table));                                  //table sine
                }
        }

        //capture_init();
        uart1_init();                   // Initial UART1
        //pwm_initial();                // Initial PWM
        qei_init();
        adc_init();
        frequancy();
        while(1)
        {
                //if(f)
                {
                cly=150.0/(us/f);               //step pwm duty
                m=f*2*0.01;                     //V/Hz
                ys+=50;zs+=100;j*=3;
                while(j>table)j-=table;
                if(ys>table)ys-=table;
                if(zs>table)zs-=table;t=st;
                kx=k[t]+(st-t)*(k[t+1]-k[t]);
                ky=k[t]+(ys-t)*(k[t+1]-k[t]);
                kz=k[t]+(zs-t)*(k[t+1]-k[t]);
                }
                //if(f>=40)
                {
                        t=j;
                        kj=k[t]+(j-t)*(k[t+1]-k[t]);
                        x=m*(over_m1*kx+over_m3*kj)+1000;
                        y=m*(over_m1*ky+over_m3*kj)+1000;
                        z=m*(over_m1*kz+over_m3*kj)+1000;
                }
                if(st>table){st-=table;frequancy();}
                if(count==1000)WriteUART1(s_fir);               //speed 0-39
                if(count==2000)WriteUART1(s_ten);
                if(count==3000)WriteUART1(s_hu);
                if(count==4000)WriteUART1(s_th);
                //if(count==1000)WriteUART1(f_fir);             //frequancy 40-79
                //if(count==1200)WriteUART1(f_ten);
                //if(count==1400)WriteUART1(f_hu);
                //if(count==1600)WriteUART1(f_th);
                if(count==5000)WriteUART1(v_fir);               //dc volt 80-109
                if(count==6000)WriteUART1(v_ten);
                if(count==7000)WriteUART1(v_hu);
                if(count==8000)WriteUART1(i_pri);               //current 110-139
                if(count==9000)WriteUART1(i_sec);
                if(count==10000)WriteUART1(i_thi);
                //if(count==1000)WriteUART1(p_fir);             //pulse/wr 140-159
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        //if(count==1200)WriteUART1(p_ten);
        //if(count==1400)WriteUART1(tem_fir);        //temp 160-179
        //if(count==1600)WriteUART1(tem_ten);
    }
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PE16

การออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการสร้าง พี ดับบลิว เอ็ม แบบเธิดฮาร์มอนิกส์ อินเจ็กชั่น โดยใช้ตัวประมวลผลเชิงเลข

Third-Harmonic Injection PWM Method Control of Induction Motor DSP-Based Design

ชัยวัฒน์ ศรีเพชร และ ทศพร ผดุงกุล

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร.0-2737-3000 E-mail:c_sripet@hotmail.com

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอรูปแบบการสร้าง พี ดับบลิว เอ็ม แบบเธิดฮาร์มอนิกส์อินเจ็กชั่น (Third-Harmonic Injection PWM) สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบแหล่งแรงดัน (VSI) ในงานควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้การควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่คงที่ (Constant V/Hz) ซึ่งนิยมใช้วิธีการมอดูเลตแบบ ไซน์ พี ดับบลิว เอ็ม (SINE PWM) ทำให้ขนาดของแรงดันเฟสต่อเฟสสูงสุดถูกจำกัดที่ 86.6% ของแรงดันไฟตรง ด้วยเทคนิคที่นำเสนอนี้ทำให้สามารถเพิ่มขนาดของความถี่หลักมูล (Fundamental) สูงสุดเท่ากับแรงดันไฟตรงหรือเพิ่มขึ้น 15.4% จากวิธีการ ไซน์ พี ดับบลิว เอ็ม แบบเดิม โดยที่ไม่สร้างฮาร์มอนิกส์ต่ำ ระบบดังกล่าวควบคุมการทำงานและสร้างสัญญาณ พี ดับบลิว เอ็ม ด้วยตัวประมวลผลเชิงเลข (DSP) ของบริษัท Microchip Technology เบอร์ dsPIC30F2010

คำสำคัญ: PWM Inverter , Third-Harmonic Injection PWM

Abstract

This paper presents the switching method for generating the third-harmonic injection PWM (pulse width modulation) signal which is applicable for the three-phase VSI (voltage source inverter). The conventional method based on the constant V/Hz concept made use of the sine PWM. This caused the limitation in the amplitude of phase-to-phase voltage at 86.6% to the DC level. By using the proposed method, the limitation was eradicated. The amplitude of phase-to-phase voltage can be increased up to the DC level, another word was that the 15.4% better compared to the convention method. In addition, the lower harmonics were not generated. To enhance the system, the dsPIC30F2010 was used to generate the controlling PWM signal..

Keywords: PWM Inverter , Third-Harmonic Injection PWM

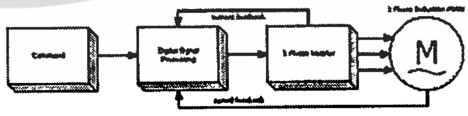
1. บทนำ

ปัจจุบันการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นไปอย่างแพร่หลายในระบบอุตสาหกรรม เนื่องจากต้นทุนที่ต่ำและการบำรุงรักษาที่ง่าย ทั้งการพัฒนาตัวประมวลผลทางดิจิตอลที่มีความก้าวหน้าไปมาก ทำให้มีการนำอุปกรณ์ดิจิตอลยุคใหม่ เข้ามาใช้ในระบบควบคุมมอเตอร์มากขึ้น เช่น Microcontroller , FPGA[1] , DSP เพื่อเป็นการลดจำนวนอุปกรณ์และเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ ส่วนของรูปแบบการสร้างสัญญาณควบคุมก็มีการนำเสนอวิธีการต่างๆ เข้ามาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ[2] เพิ่มแรงบิด[3] ในแต่ละย่านการทำงาน แต่ในบางครั้งวิธีการที่ส่งผลให้เพิ่มแรงบิดก็มีผลให้เกิดฮาร์มอนิกส์ต่ำ เช่น วิธีการมอดูเลตเกิน (overmod) ในวิธีไซน์ พี ดับบลิว เอ็ม เป็นผลให้กำลังงานสูญเสียในมอเตอร์เพิ่มขึ้น

บทความนี้จึงนำเสนอวิธีการสร้างสัญญาณ พี ดับบลิว เอ็ม แบบเธิดฮาร์มอนิกส์อินเจ็กชั่น ทำให้แรงดันหลักมูลของ เฟสต่อเฟสสูงสุดเท่ากับแรงดันไฟตรง มากกว่าแบบ ไซน์ พี ดับบลิว เอ็ม ที่ได้แรงดัน เฟสต่อเฟส สูงสุด 0.866 เท่าของแรงดันไฟตรง [4]

2. หลักการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์ 3 เฟส นั้นสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วนหลักๆ คือ Command เป็นส่วนที่ทำหน้าที่รับคำสั่งจากภายนอก Digital Signal Processing (DSP) เป็นตัวประมวลผลหลักของระบบควบคุม ทำหน้าที่สร้างสัญญาณ พี ดับบลิว เอ็ม รวมทั้งเวลาหยุดพัก (dead time) ของอุปกรณ์กำลัง ให้เหมาะสมกับความเร็วรอบและแรงบิดที่ต้องการ โดยใช้การควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่คงที่ (constant V/Hz) ซึ่งได้รับการ



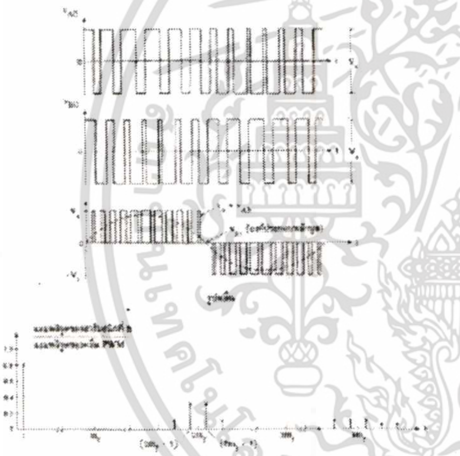
รูปที่ 1 Block Diagram ของระบบควบคุมมอเตอร์ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้อนกลับสัญญาณจากตัวตรวจจับความเร็ว (speed sensor) และตัวป้อนกลับกระแสผ่าน A/D Converter ภายในตัว DSP ในส่วนของอุปกรณ์กำลัง (power switch) นั้นใช้โครงสร้างอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบแหล่งแรงดัน (Voltage Source Inverter ,VSI) ใช้แรงดันไฟตรงที่ 600VDC ประกอบด้วย IGBT 6 ตัว เบอร์ IRG4PH50KD และส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

2.1 เทคนิค SINE PWM

การทำงานของอินเวอร์เตอร์ในแต่ละเฟสใช้การสวิตช์แรงดันแบบ 2 ขั้ว (bipolar voltage switching) มีเฟสต่างกัน 120° ทำงานเป็นอิสระ ซึ่ง V_o มีค่าแรงดันทั้งบวกและลบ เมื่อนำ 2 เฟสมาเปรียบเทียบกันสัญญาณที่ได้จะเป็นแบบการสวิตช์ขั้วเดียว (unipolar voltage switch) จะสวิตช์ระหว่างค่าบวกกับศูนย์เป็นเวลาครึ่งคาบ และอีกครึ่งคาบจะสวิตช์ระหว่างค่าศูนย์กับค่าลบ ดังรูปที่ 2 โดยค่าแรงดันเฉลี่ยชั่วขณะของแต่ละเฟสหาได้จากสมการที่ 1



รูปที่ 2 การสวิตช์แรงดันแบบ Bipolar และ ขนาดของฮาร์มอนิกส์

จากรูปที่ 2 นั้นแสดงให้เห็นถึงลักษณะของสัญญาณแบบ unipolar ที่ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณ bipolar 2 เฟส ซึ่งสัญญาณ unipolar ที่ได้นั้นจะมีความถี่การสวิตช์เป็น 2 เท่าคือ 20 kHz ของสัญญาณ bipolar ซึ่งสวิตช์ที่ 10 kHz ทำให้ฮาร์มอนิกส์ต่ำสุดไปอยู่ที่ความถี่ 2 เท่าด้วย[7] จากวิธีที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นโครงสร้างที่สามารถใช้ได้ทั้งกับวิธีการ SINE PWM และ Third-Harmonic Injection PWM ซึ่งทั้งสองวิธีจะต่างกันที่ขนาดของแรงดัน (amplitude) ของความถี่หลักมูลที่จ่ายให้กับมอเตอร์เท่านั้น

สมการที่ใช้หาค่าแรงดันเฉลี่ยชั่วขณะ

$$\frac{V_o}{V_{dc}/2} = 2D - 1 \tag{1}$$

ถ้าเราให้ความกว้างพัลส์ D เป็นฟังก์ชันของเวลา $d(t)$ แปรค่าอย่างช้าๆ ของแต่ละคาบการสวิตช์ตามฟังก์ชันไซน์

$$d(t) = 0.5 + ma \sin \omega t \tag{2}$$

ma คือ อัตราการมอดูเลตขนาด $ma \leq 0.5$

ωt คือ ความถี่ในการมอดูเลต

เมื่อแทนสมการที่ 2 ลงในสมการที่ 1 จะได้ค่าเฉลี่ยแรงดันเฉพาะที่ดังสมการที่ 3

$$V_o = V_{dc}/2 + V_{dc} ma \sin(\omega t) \tag{3}$$

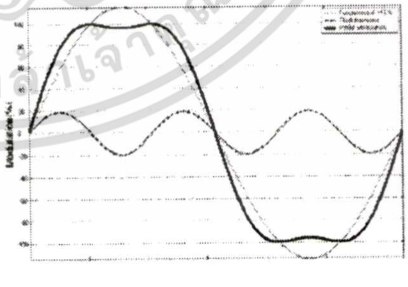
จากสมการที่ 3 นั้นเป็นแรงดัน V_o เฉลี่ยของแต่ละเฟส และเมื่อต้องการค่าแรงดันของ 3 เฟสที่ต่างกันก็สามารถหาได้จากสมการที่ 4

$$\begin{aligned} V_u &= V_{dc}/2 + V_{dc} ma \sin(\omega t) \\ V_v &= V_{dc}/2 + V_{dc} ma \sin(\omega t + 120^o) \\ V_w &= V_{dc}/2 + V_{dc} ma \sin(\omega t - 120^o) \end{aligned} \tag{4}$$

จากสมการที่ 4 สามารถหาแรงดันระหว่างเฟสได้จากสมการที่ 5

$$V_{uv} = 0.866 V_{dc} \sin(\omega t - 30) \tag{5}$$

2.2 เทคนิค Third-harmonic Injection PWM



รูปที่ 3 เทคนิค Third-Harmonic Injection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3 ซึ่งเป็นเทคนิค SINE PWM ถ้าเราต้องการแรงดันระหว่างเฟส V_{uv} ในสมการที่ 5 เท่ากับแรงดันไฟตรง เราต้องเพิ่มอัตราการมอดูเลต ma ขึ้น 15.4% แต่การเพิ่มอัตราการมอดูเลตนั้นทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของความถี่หลักมูลเนื่องจากการมอดูเลตเกิน แต่ถ้าพิจารณารูปที่ 3 ประกอบด้วย จะเห็นว่าการเพิ่มฮาร์มอนิกส์ที่ 3 เข้าไปกับความถี่หลักมูลสามารถแก้ไขความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้น จากการมอดูเลตเกินนี้ได้ โดยขนาดของฮาร์มอนิกส์ที่ 3 ที่น้อยที่สุดคือ 19.2% [6] ดังนั้นสามารถเขียนสมการคำนวณหาขนาดของแรงดันช่วงขณะต่อเฟส V_o เมื่อใช้วิธี Third-Harmonic Injection PWM ได้ดังสมการที่ 6

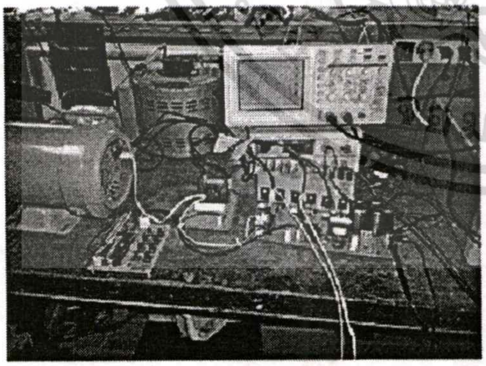
$$V_o = V_{dc}/2 + (1.154V_{dc}ma\sin(\omega t) + 0.192V_{dc}ma\sin(3\omega t)) \quad (6)$$

จากสมการที่ 5 แรงดันเฟสต่อเฟสเมื่อใช้แรงดันเฟสในสมการที่ 6 มีขนาดเพิ่มขึ้นเท่ากับแรงดันไฟตรงและไม่มีเทอมของฮาร์มอนิกส์ที่ 3 ดังสมการที่ 7

$$V_{uv} = V_{dc}\sin(\omega t - 30) \quad (7)$$

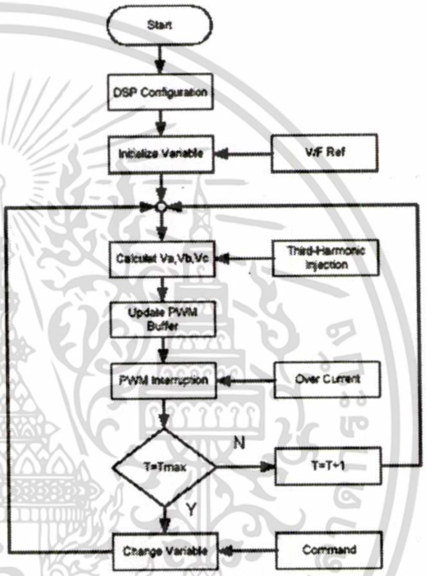
3. การออกแบบวงจรและผลการทดลอง

ระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสการทำงานของระบบรวมทั้งสร้าง PWM นั้นทำโดย DSP ทั้งหมด ซึ่งใช้โครงสร้างอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งแรงดัน (VSI) ใช้แรงดันที่ 600VDC ส่วนรูปแบบการสวิตช์ใช้การควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่คงที่ (Constant V/Hz) ด้วยความถี่การสวิตช์ 10 kHz การสวิตช์จะแยกอิสระระหว่างเฟสด้วยสัญญาณ PWM จาก DSP ผ่านวงจร Isolator ส่วนตัวมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้เป็นแบบ 3 เฟส 380/220V 4 Pole ขนาด 1 แรงม้ายี่ห้อ Mitsubishi

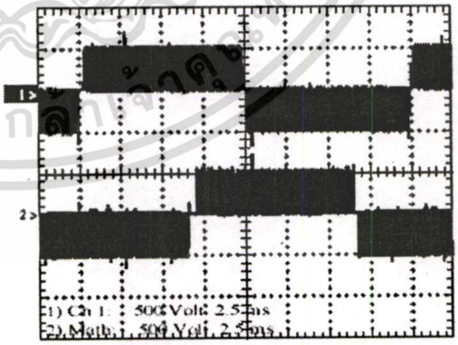


รูปที่ 4 บอร์ดที่ใช้ในการพัฒนาและมอเตอร์ 3 เฟส 1 แรงม้า

ลำดับขั้นการทำงานของ DSP สำหรับควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคเธิดฮาร์มอนิกส์อินเจ็กชั่น ในรูปที่ 6 เริ่มจากการกำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆ จากนั้นจะเข้าสู่ลูปการสร้าง PWM ซึ่งทำการคำนวนหา duty ที่เหมาะสมทุกๆ 100 uS จากการอ้างอิงรูปแบบการสวิตช์แบบแรงดันต่อความถี่คงที่และเทคนิคการสร้าง พี ดับบลิว เอ็ม แบบ เธิดฮาร์มอนิกส์อินเจ็กชั่น ทำให้สามารถที่จะปรับความถี่หลักมูลได้กว้างตั้งแต่ 0.01 Hz และความละเอียดในการเปลี่ยนความถี่น้อยกว่า 0.01 Hz ตลอดย่านความถี่หลักมูล



รูปที่ 6 Flowchart for Third-Harmonic PWM

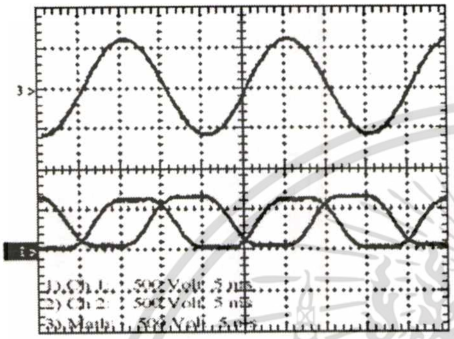


รูปที่ 7 สัญญาณ PWM เฟสต่อเฟส ที่ป้อนให้ตัวมอเตอร์

PE16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง PWM ที่มาจากเทคนิค Third-Harmonic Injection เมื่อกรองความถี่การสวิตช์ออกโดยใช้ตัวกรองผ่านความถี่ต่ำ (LPF) แบบ RC ความถี่ตัดที่ 1 kHz ใช้ความถี่หลักมูล 50Hz ที่ Modulation 100 % แสดงในรูปที่ 8 สังเกตเห็นว่าสัญญาณทางเวลาเฉพาะเฟสด้านล่างนั้น จะมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกส์ที่ 3 อยู่ด้วยตามสมการที่ 6



รูปที่ 8 Ch1,Ch2 Output Phase หลังผ่าน LPF ซึ่งมี Third-Harmonic อยู่ด้วยและถูกหักล้างเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันแบบเฟสต่อเฟสใน Ch3

เมื่อนำสัญญาณของทั้งสองเฟสมาเปรียบเทียบกันจะได้ดังรูปที่ 8 ด้านบน สังเกตได้ว่าสัญญาณเฟสต่อเฟสที่ได้ เป็นสัญญาณที่ไม่มีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกส์ที่ 3 และมีขนาดสูงสุดเท่ากับแรงดัน DC ที่ 600VDC ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 7 โดยวัดและเก็บผลด้วยสโคป TEKTRONIX รุ่น TDS220 (1GS/s) ผ่านโปรแกรม Wavestar

4. บทสรุป

ระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้วิธีการของ Third-Harmonic Injection PWM นั้นเป็นวิธีการหนึ่งที่มีการนำมาใช้พอสมควร แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ อาจจำเป็นต้องใช้ตัวประมวลผลที่มีความเร็วในการประมวลผลที่สูง โดยที่ไม่จำเป็นต้องเก็บตารางการสวิตช์ไว้ในหน่วยความจำหรือใช้ตัวประมวลผลที่มีความเร็วไม่สูงมากนักแต่ต้องการหน่วยความจำในการเก็บตารางการสวิตช์ที่มาก เพื่อให้ได้ไว้ซึ่งความถี่หลักมูลที่มีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกส์ต่ำน้อยที่สุดและสามารถที่จะตอบสนองการเปลี่ยนความถี่หลักมูลที่กว้าง

เอกสารอ้างอิง

[1] Ying-Yu Tzou and Hau-Jean Hsu, "FPGA Realization of Space-Vector PWM Control IC for Three-Phase PWM Inverter", IEEE Transactions on Power Electronic, VOL.12, NO.6 November 953-963, 1997.

[2] Andrzej M. Trzynadlowski and Stanislaw Legowski, "Minnimum-Loss Vector PWM Stategy for Three-Phase Inverters", IEEE Transactions on Power Electronic, VOL.9, NO.1 January 26-34, 1994.

[3] Thomas G. Habetler, Francesco Profumo, Michele Pastorelli and Leon M. Tolbert, "Direct Torque Control of Induction Machines Using Space Vector Modulation", IEEE Transactions on Industry Applications, VOL.28, NO.5 September/October 1045-1053, 1992.

[4] Muhammad H. Rashid, Power Electronics Circuit , Devices , and Applications, Third Edition, Pearson Education International USA, 2004.

[5] John G. Kassakian, Martin F. Schlecht, George C. Verghese, Principle of Power Electronics, Addison-Wesley Publishing: Massachusets USA, 1991.

[6] Muhammad H. Rashid, Power Electronics Handbook, Academic Press Canada, 2001.

[7] ไถกม อาริยา, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2, ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ, 2544.

ชัยวัฒน์ ศรีเพชร
นักศึกษาบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง Email: c_sripet@hotmail.com

ผศ.พลผดุง ผดุงกูล
อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
Email: Polphadung@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายชัยวัฒน์ ศรีเพชร เกิดเมื่อวันที่ 30 ธันวาคม พ.ศ.2522 ที่อำเภอวังวิเศษ จังหวัดตรัง สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2546 โดยในปี พ.ศ. 2546 ได้เข้าทำงานที่บริษัท เดลเทคอิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ในตำแหน่งวิศวกร ฝ่ายวิจัยและพัฒนา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้