สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบเฟสเซอร์ โดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลในการควบคุมการทำงาน

PHASOR APPLIED SPEED CONTROL OF 3 φ INDUCTION MOTOR USING DIGITAL SIGNAL PROCESSING CONTROLLER

T045891

จรัล ตั้งวงศ์ชูเกตุ

JARUN THANGWONGCHUKET

เลขหมู่........................
เลขทะเบียน 45891
วัน, เดือน, ปี 19 ก.ค. 2546

.b................................
.i................................

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ISBN 974-324-201-5

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHASOR APPLIED SPEED CONTROL OF 3 ϕ INDUCTION MOTOR USING DIGITAL SIGNAL PROCESSING CONTROLLER

JARUN THANGWONGCHUKET

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2003

ISBN 974-324-201-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบเฟสเซอร์ โดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลในการควบคุมการทำงาน
ชื่อนักศึกษา	นายจรัล ตั้งวงศ์ชูเกตุ
รหัสประจำตัว	42061017
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร. วิจิตร กิณเรศ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอเทคนิค, การวิเคราะห์และออกแบบการประยุกต์ทางด้านเฟสเซอร์สำหรับการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งการขับเคลื่อนของมอเตอร์นี้จะถูกควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์ชนิดจ่ายแรงดันด้วยเทคนิคการควบคุมกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์แบบอแดปทีฟพีดับบลิวเอ็ม รูปแบบพีดับบิวเอ็มจะได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่ากระแสไซน์อ้างอิงกับค่ากระแสจริงของมอเตอร์ โดยที่ค่าของกระแสไซน์อ้างอิงนี้สามารถหาได้จากวงจรสมมูลของมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำและข้อมูลที่พิกัดจากแผ่นป้ายของมอเตอร์ประกอบกับการประมาณค่าแรงบิดที่พิกัด ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในการสร้างอัลกอลึทึมเพื่อที่จะใช้ในการควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์ การรักษาระดับความเร็วรอบจะใช้กระบวนการควบคุมความเร็วรอบแบบวงรอบปิดโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งการควบคุมการทำงานทั้งหมดนี้จะใช้ดิจิตอลซิกแนลโพรเซสเซอร์ (DSP) เป็นฐานในการประมวลผลและวงรอบการควบคุมทั้งหมดจะกระทำในระบบดิจิตอล อีกทั้งในวิทยานิพนธ์นี้ยังได้แสดงหลักการวิเคราะห์การทำงานของการประยุกต์ทางด้านเฟสเซอร์สำหรับการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับอย่างละเอียดร่วมทั้งการจำลองโมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบการควบคุมดังกล่าวโดยใช้โปรแกรม Matlab & Simulink ซึ่งจากการควบคุมดังกล่าวจะเห็นได้ว่าหลักการประยุกต์ทางด้านเฟสเซอร์นี้เป็นหลักการที่ง่ายต่อความเข้าใจและใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการสร้างแพทเทอร์นการควบคุมการทำงานที่ไม่ยุ่งยาก ในตอนท้ายได้นำเครื่องต้นแบบไปทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาด 2 แรงม้า ภายใต้สภาวะการทำงานร่วมกับโหลดที่เป็นลักษณะสภาวะคงตัวและสเตปโหลด เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของระบบรวมทั้งการตอบสนองทางไดนามิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Phasor Applied Speed Control of 3 ϕ Induction Motor Using Digital Signal Processing Controller
Student	Mr. Jarun Thangwongchuket
Student ID.	42061017
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Vijit Kinnares

ABSTRACT

This thesis proposes the technique, analysis and design of phasor applied speed control of 3 phase induction motor. The induction motor drive is controlled by voltage source inverter based on an adaptive current PWM technique, generated from comparing between reference sinusoidal current and actual motor current. The reference sinusoidal current can be obtained from an equivalent circuit of induction motor, rated motor nameplate and rated torque estimation. These will be used to create an algorithm in order to control the motor drive. The closed loop proportional and integral (PI) controller in order to keep motor speed constant is included. All of control systems are implemented by a single-chip Digital Signal Processor (DSP) Controller. The system is accomplished by controlling program in DSP and all of process cycles are digital system. In this thesis, the analysis of operation of phasor applied induction motor speed control is fully described as well as simulation of mathematical model of the system using Matlab & Simulink. These all processes of phasor applied application are very easy to understand and mathematics equations are not complicated for operation control. Finally, a prototype of the phasor applied speed control is used for driving a 3 phase induction motor, 2Hp under steady and step load change conditions in order to investigate system performance as well as dynamic responses.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาเป็นอย่างสูงจาก ผศ. ดร. วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ เกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์นี้มาโดยตลอด ซึ่งผู้เขียนเองมีความรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ของท่าน ตลอดเวลาท่านเป็นผู้ให้โอกาสและเป็นผู้ชี้นำทางในการศึกษา จนทำให้ผู้เขียนมีวันนี้ได้ ขอกล่าวคำขอบคุณอย่างซาบซึ้งและนับถือแด่ ผศ. ดร.วิจิตร กิณเรศ

ขอบคุณ ประธานและคณะกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่มีส่วนช่วยในการชี้แนะเพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอบคุณ คุณสุธิณี บริษัท โชคชัยคอมโพแนนท์ จำกัด ที่ช่วยดูแลอำนวยความสะดวกในการติดต่อผ่านทางบริษัท Allen-Tech Resource & Development ที่ประเทศสิงคโปร์ และช่วยเหลือในการนำเข้าบอร์ด DSP56F805EVM จากประเทศสิงคโปร์มายังประเทศไทย

ขอบคุณ คุณ Lim Kah Ong บริษัท Future Techno Designs Pte จำกัด ประเทศสิงคโปร์ สำหรับโปรแกรมและลิขสิทธิ์ (License) ของโปรแกรม Code Wariror ที่จัดส่งให้เพื่อการศึกษาโดยไม่คิดมูลค่าใดๆ ทั้งสิ้น

ขอบคุณ ทีมงานวิศวกรจากบริษัท โมโตโรลา จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับคำตอบในการแก้ไขปัญหาและข้อมูลๆ ต่างเกี่ยวกับการใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DSP56F805EVM) ที่จัดส่งมาให้ในรูปแบบของ CD-ROM และทาง E-mail

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อนิรันดร์ คุณแม่สิริวรรณ ที่เป็นผู้ให้กำลังใจในการศึกษาเล่าเรียนและเป็นผู้สนับสนุนให้ทุกสิ่งทุกอย่างมาโดยตลอด

ขอบคุณ พี่สาวฐิติรัตน์, น้องสาวกาญจนา และน้องชายจรัส ที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือต่างๆ ตลอดจนกระทั่งทุนทรัพย์ในการทำวิจัยบางส่วน

ขอบคุณ คุณจักรพันธ์ เอกวาสนานันต์ ที่ได้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์บางส่วนแก่โครงงานวิจัย

ขอบคุณ คุณสุธิดา พิสิษฐ์รัตนวงศ์ ที่คอยให้กำลังใจ, ปลอบโยนและดูแลเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา

ท้ายที่สุดแต่ไม่ใช่น้อยที่สุดสำหรับคำขอบคุณอันพิเศษสุดที่ขอมอบให้แด่พี่และเพื่อนๆ นักศึกษากลุ่ม PMC ที่ให้ความช่วยเหลือและคอยให้กำลังใจอย่างต่อเนื่องตลอดการศึกษาของผู้วิจัย, ขอบคุณห้องสมุด KMITL, แหล่งข้อมูลจากอินเตอร์เน็ตสำหรับหนังสือและข้อมูลต่างๆ สำหรับงานวิจัยนี้ และขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสำหรับห้องวิจัยและเครื่องมือวัดต่างๆ ในการทำวิจัย

คุณค่าและประโยชน์ที่พึงจะมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ บิดา มารดา คุณครูบาอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

จรัล ตั้งวงศ์ชูเกตุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง X

สารบัญภาพ XI

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 3

1.3 วิธีการวิจัย 3

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย 4

1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ 4

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ 5

บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น 6

2.1 บทนำ 6

2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 6

2.1.2 หลักการทำงาน 6

2.1.3 คุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิกัดความถี่และที่พิกัดแรงดัน 13

2.1.4 คุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็ว 15

2.2 การควบคุมสมรรถนะของมอเตอร์ 17

2.2.1 ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่) 17

2.2.2 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด (ค่ากำลังงานคงที่) 19

2.2.3 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงมาก (ค่าความถี่ที่โรเตอร์คงที่) 19

2.3 ชนิดของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ 20

2.3.1 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI) 20

2.3.2 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส (Current Source Inverter: CSI) 21

2.4 รูปแบบของการมอดูเลท 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.1 เทคนิค Sinusoidal PWM 23

2.4.2 เทคนิค Third Harmonic PWM 27

2.4.3 เทคนิค 60^0 PWM 27

2.4.4 เทคนิค Space Vector PWM 27

2.4.5 เทคนิคการควบคุมแบบ 6 สเตป 29

2.4.6 เทคนิค Adaptive Current Control 29

2.5 รูปแบบของการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 31

2.5.1 การควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่ 32

2.5.2 การควบคุมแรงดันต่อความถี่ ชนิดตรวจจับกระแส 34

2.5.3 การควบคุมแรงดันต่อความถี่ ชนิดตรวจจับความเร็ว (Scalar Control) 34

2.5.4 การควบคุมแบบสลิปออฟติไมต์เซชั่น (Slip Optimization) 35

2.5.5 การควบคุมความถี่สลิป (Slip frequency control) 36

2.5.6 การควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control) 37

2.5.7 การควบคุมแบบไร้ตัวตรวจจับความเร็ว (Sensorless Vector Control) 39

2.6 สรุป 39

บทที่ 3 ทฤษฎีและการใช้งานตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล 40

3.1 บทนำ 40

3.2 การจำแนกตัวประมวลผลทางด้านสัญญาณดิจิตอลของบริษัท - โมโตโรลา จำกัด 41

3.2.1 คุณสมบัติทั่วไปของตัวประมวลผลทางด้านสัญญาณดิจิตอลในตระกูล DSP568XX 42

3.2.2 รายละเอียดของตัวประมวลผลทางด้านสัญญาณดิจิตอล - DSP56F805EVM 42

3.3 หน้าที่และตำแหน่งขาของ DSP56F805 44

3.4 การจัดการหน่วยความจำ 49

3.4.1 รายละเอียดหน่วยความจำข้อมูล 50

3.4.2 รายละเอียดหน่วยความจำโปรแกรม 52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 อินเตอร์รัพต์ 54
3.6 โมดูลต่างๆ ในตัวประมวลผล DSP 54
3.6.1 แอนะล็อก / ดิจิตอล 55
3.6.2 พอร์ตอินพุต / เอาท์พุตอิสระ (GPIO) 59
3.6.3 ชุด Controller Area Network (CAN) 62
3.6.4 พัลส์วิดม็อดดูเลชั่น (PWM) 64
3.6.5 การรับส่งแบบอนุกรม (Serial Communications Interface) 70
3.6.6 Serial Peripheral Interface (SPI) 76
3.6.7 ชุดตรวจจับพัลส์ความเร็ว (Quad Decoder) 80
3.6.8 ชุดการตรวจจับเวลา (Timer) 84
3.7 สรุป 91

บทที่ 4 เทคนิคการควบคุมความเร็วโดยการประยุกต์ทางด้านเฟสเซอร์และแบบจำลอง - สำหรับการออกแบบ 92
4.1 บทนำ 92
4.2 หลักการประยุกต์ทางด้านเฟสเซอร์สำหรับการควบคุมความเร็ว 92
4.3 การสร้างอัลกอลึทึมของหลักการควบคุมความเร็วแบบเฟสเซอร์ 96
4.4 การวิเคราะห์เทคนิคการควบคุมความเร็วแบบเฟสเซอร์ 98
4.4.1 การทำงานของวงรอบกระแสที่ใช้ในการสร้างสัญญาณขับนำ 99
4.4.2 การทำงานของวงรอบความเร็วจากสภาวะหยุดนิ่งไปสู่ค่าความเร็วรอบ - ที่ตั้งไว้ 101
4.4.3 การทำงานของวงรอบความเร็วจากค่าความเร็วรอบ ณ จุดหนึ่งไปอีกค่า - ความเร็วรอบหนึ่ง 101
4.4.4 การทำงานของวงรอบความเร็วในสภาวะต่อโหลด 102
4.4.5 การทำงานของวงรอบความเร็วในสภาวะปลดภาระ 103
4.4.6 การทำงานของวงรอบความเร็วในสภาวะกลับทิศทางหมุน 104
4.5 การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในควบคุม 105
4.6 โมเดลและการจำลองโดยใช้เทคนิคการควบคุมความเร็วรอบแบบเฟสเซอร์ 106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.7 สรุป 117

บทที่ 5 การออกแบบและการสร้าง 118

5.1 บทนำ 118

5.2 การออกแบบและสร้างชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์ 120

5.2.1 การออกแบบค่าและพิกัดของตัวเก็บประจุในวงจรกรอง 121

5.2.2 การเลือกพิกัดของไดโอดกำลังขาเข้า 122

5.2.3 การเลือกความต้านทานอนุกรมที่ใช้จำกัดกระแสอัดประจุขณะ - เริ่มเปิดเครื่อง 123

5.2.4 ความต้านทานขนานที่ใช้ในการคายประจุเมื่อตอนปิดเครื่อง 124

5.3 การออกแบบและสร้างชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ 125

5.4 การออกแบบและสร้างวงจร Dynamic Breaking 127

5.5 การออกแบบและสร้างวงจรขับนำและวงจรประวิงเวลา 128

5.6 การออกแบบและสร้างวงจรตรวจจับและป้อนกลับของกระแส 131

5.7 การออกแบบและสร้างวงจรป้องกันต่างๆ 133

5.7.1 วงจรป้องกันแรงดันเกิน 133

5.7.2 วงจรตรวจจับแรงดัน 134

5.7.3 วงจรป้องกันกระแสเกิน 134

5.8 การออกแบบภาคการควบคุมความเร็วรอบจากอุปกรณ์ตรวจจับความเร็ว 135

5.8.1 การคำนวณหาค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จากเอ็นโค๊ดเดอร์ 136

5.8.2 การคำนวณหามุมที่ได้จากการวัดค่าความเร็วจากพัลส์เอ็นโค๊ดเดอร์ 140

5.8.3 การแสดงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ 143

5.9 การออกแบบภาคการควบคุมแบบป้อนกลับพีไอของการควบคุมความเร็วรอบ 143

5.10 การออกแบบโครงสร้างทางซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุมการ - ขับเคลื่อนมอเตอร์ 149

5.10.1 Peripheral hardware and Software initialization 153

5.10.2 Speed Module 153

5.10.3 PI Control Module 153

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.10.4 Calculate θe and Current Module 154

5.10.5 Hyteresis Control Module 155

5.10.6 Check Switch Module 156

5.11 สรุป 156

บทที่ 6 ผลการทดลอง 157

6.1 การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบแพทเทอร์นของกระแสไซน์อ้างอิง 157

6.2 การทดสอบวัดรูปคลื่นจากหลักการควบคุมกระแสเทียบกับแบบควบคุมแรงดัน 162

6.3 การทดสอบสภาวะคงตัวของการควบคุมแบบเฟสเซอร์ 166

6.4 การทดสอบสภาวะการรับภาระโหลด 170

6.5 การทดสอบสภาวะการทำงานแบบสเตปคำสั่ง 176

6.5.1 การทดสอบแบบสเตปคำสั่งความเร็วจากจุดหยุดนิ่งไป 1500 รอบต่อนาที 176

6.5.2 การทดสอบแบบสเตปคำสั่งความเร็วจาก 600 รอบต่อนาทีไป 1500 รอบต่อนาที 180

6.6 การทดสอบกลับทิศความเร็วของมอเตอร์แบบสเตปคำสั่ง 184

6.7 การทดสอบรับภาระแบบสเตปโหลดและแบบคงสภาวะโหลด 187

บทที่ 7 บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง 192

7.1 วิจารณ์ผลการทดลอง 192

7.2 สรุป 192

7.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป 193

7.3.1 ทางด้านซอฟต์แวร์ 194

7.3.2 ทางด้านแหล่งจ่ายไฟตรงเพื่อจ่ายให้กับชุดกำลัง 194

7.3.3 รูปแบบการควบคุม 195

เอกสารอ้างอิง 196

ภาคผนวก ก 199

ภาคผนวก ข 200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค 202
ภาคผนวก ง 204
ภาคผนวก จ 206
ประวัติผู้เขียน 207

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 ตารางการเปรียบเทียบความเร็ว (μs) ระหว่าง CPU กับ DSP 39
3.2 แสดงรายละเอียดตระกูลของตัวประมวลสัญญาณดิจิตอล 41
3.3 ตารางแสดงรายละเอียดการทำงานของขาแหล่งจ่ายไฟและขาสัญญาณนาฬิกา 44
3.4 ตารางแสดงรายละเอียดการทำงานของขาสัญญาณบัสแอดเดรสและบัสข้อมูล 45
3.5 ตารางแสดงรายละเอียดการทำงานของขาสัญญาณควบคุมบัส 46
3.6 ตารางแสดงรายละเอียดการทำงานของขาสัญญาณอินเตอร์รัพต์และขาควบคุม 46
3.7 ตารางแสดงรายละเอียดการทำงานของขาสัญญาณ PWM 47
3.8 ตารางแสดงรายละเอียดการทำงานของขาสัญญาณอินเตอร์เฟส 47
3.9 ตารางแสดงรายละเอียดการทำงานของขาสัญญาณ A/D, ไทม์เมอร์ และดีบัส 48
3.10 ตารางแสดงรายละเอียดบิตใช้งานของรีจิตเตอร์บัสคอนโทรล 50
3.11 ตารางแสดงรายละเอียดบิตใช้งานของรีจิตเตอร์โอปเปอร์เรดติ้งโหมด 53
3.12 ตารางแสดงรายละเอียดบิตใช้งานของรีจิตเตอร์ควบคุม (ADCR1) 56
3.13 ตารางแสดงรายละเอียดบิตใช้งานของรีจิตเตอร์ควบคุม (ADCR2) 57
3.14 ตารางแสดงการเซตค่ารีจิตเตอร์เพื่อกำหนดสถานะของ GPIO 60
3.15 ตารางแสดงรายละเอียดการใช้งานบิตต่างๆ ของรีจิตเตอร์ PWM Control 67
3.16 อัตราการรับส่งข้อมูลเมื่อสมมุติสัญญาณนาฬิกาภายนอกเท่ากับ 40 เมกะเฮิรตซ์ 72
3.17 ตารางแสดงรายละเอียดการใช้งานในแต่ละบิตของรีจิตเตอร์ SCIBR 74
3.18 ตารางแสดงรายละเอียดการใช้งานในแต่ละบิตของรีจิตเตอร์ SCICR 74
3.19 ตารางแสดงรายละเอียดการใช้งานในแต่ละบิตของรีจิตเตอร์ SCISR 76
3.20 ตารางแสดงรายละเอียดการใช้งานในแต่ละบิตของรีจิตเตอร์ SPSCR 78
3.21 ตารางแสดงรายละเอียดการใช้งานบิตต่างๆ ของรีจิตเตอร์ DECCR 82
3.22 ตารางแสดงรายละเอียดการใช้งานบิตต่างๆ ของรีจิตเตอร์ควบคุม 87
3.23 ตารางแสดงรายละเอียดการใช้งานบิตต่างๆ ของรีจิตเตอร์สถานะและควบคุม 90
5.1 รูปแบบคำสั่งที่ใช้ในการรับ/ส่งข้อมูลแบบอนุกรมของไอซี MAX5251 143
5.2 สมการที่ใช้ในการคำนวณกระบวนการควบคุมแบบพีไอจากวิธีการต่างๆ 148

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 (ก) วงจรสมมูลของมอเตอร์อินดักชั่นและ (ข) เฟสเซอร์ไดอะแกรม 7

2.2 คุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วเมื่อค่าแรงดันและความถี่มีค่าเท่ากับค่าที่พิกัด 14

2.3 กราฟแสดงค่าของกระแสโรเตอร์เทียบกับความถี่ที่โรเตอร์เมื่อค่าแรงดันและความถี่มีค่าเท่ากับค่าที่พิกัด 15

2.4 การเริ่มเดินของมอเตอร์ โดยให้ค่าแรงดันและความถี่มีค่าเท่ากับค่าที่พิกัด 15

2.5 คุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วที่ค่าสลิปมีค่าต่ำ 16

2.6 คุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 18

2.7 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน 20

2.8 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส 21

2.9 สัญญาณขับนำสวิตซ์กำลังที่มีช่วงประวิงเวลา (dead time) 22

2.10 รูปแบบสัญญาณพัลส์พีดับบิวเอ็มที่ได้จากตัวประมวลผล 22

2.11 วิธีการม็อดดูเลตรูปคลื่นไซน์กับคลื่นพาหะสามเหลี่ยมภายในตัวประมวลผล 23

2.12 สัญญาณพัลส์ขับนำที่ได้จากการสร้างโดยใช้ตัวประมวลผล 24

2.13 รูปคลื่นไซน์ที่ได้จากการปรับค่าแอมปิจูดโดยใช้ตัวประมวลผล 25

2.14 รูปคลื่นไซน์ที่ได้จากการกำหนดค่าจำนวนนับข้ามในการสุ่ม 26

2.15 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการควบคุมโดยใช้เทคนิค Third Harmonic PWM 26

2.16 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการควบคุมโดยใช้เทคนิค 60^0 PWM 27

2.17 จังหวะการทำงานของสวิตซ์และทิศทางเวกเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงาน - ของสวิตซ์ 28

2.18 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการควบคุมโดยใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์ 28

2.19 คาบการทำงานของสวิตซ์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตซ์ 28

2.20 แพรเทินร์การทำงานของสวิตซ์และแรงดันเฟส, ไลน์ทางด้านเอาท์พุตจากการ - ควบคุมแบบ 6 สเตป 29

2.21 บล๊อกแสดงการควบคุมการทำงานโดยเทคนิค Adaptive Current Control PWM 30

2.22 รูปคลื่นกระแสและแรงดันโดยใช้เทคนิค Adaptive Current Control PWM 30

2.23 วงจรคอนเวอร์เตอร์ - อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ 31

2.24 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด 32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.25	กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดกรณีคำนึงถึงผลของค่าความต้านทาน - ทางด้านสเตเตอร์	32
2.26	บล๊อกการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่	33
2.27	กราฟแสดงบล๊อกความสัมพันธ์แรงดันต่อความถี่ที่ใช้ในการควบคุม	33
2.28	บล๊อกการควบคุมแรงดันต่อความถี่ชนิดตรวจจับกระแส	34
2.29	บล๊อกการควบคุมแรงดันต่อความถี่ ชนิดตรวจจับความเร็ว (Scalar Control)	35
2.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิด, ประสิทธิภาพและ PF เทียบกับค่าสลิป	35
2.31	บล๊อกการควบคุมแบบสลิปออฟติไมต์เซชั่น (Slip Optimization)	36
2.32	กราฟคุณสมบัติการควบคุมมอเตอร์	36
2.33	บล๊อกการควบคุมความถี่สลิป (Slip frequency control)	37
2.34	บล๊อกการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control)	38
2.35	บล๊อกการควบคุมแบบไร้ตัวตรวจจับความเร็ว (Sensorless Vector Control)	38
3.1	บล๊อกไดอะแกรมของตัวประมวลผลทางด้านสัญญาณดิจิตอล DSP56F805	43
3.2	ตัวประมวลผลทางด้านสัญญาณดิจิตอล DSP56F805 (144 Pin LQFP)	44
3.3	ตำแหน่งต่างๆ ของหน่วยความจำข้อมูล	49
3.4	รีจิตเตอร์บัสคอนโทรล (Bus Control Register) ในตำแหน่งสงวนที่ $FFF9	50
3.5	สภาวะการทำงานของบัสอ่าน / เขียน ที่ช่วงเวลาการรอคอยเท่ากับ 0	51
3.6	สภาวะการทำงานของบัสอ่าน / เขียน ที่ช่วงเวลาการรอคอยเท่ากับ 4	51
3.7	ตำแหน่งต่างๆ ของหน่วยความจำโปรแกรม	52
3.8	รีจิตเตอร์โอปเปอร์เรตติ้งโหมด (Operating Mode Register)	53
3.9	รีจิตเตอร์ระดับสิทธิ (PLR) ที่อยู่ภายในรีจิตเตอร์ระดับกรุ๊ป (GPR)	54
3.10	บล๊อกไดอะแกรมของกระบวนการแปลงแอนะล็อก/ดิจิตอล	55
3.11	รีจิตเตอร์ควบคุม (ADCR1)	55
3.12	รีจิตเตอร์ควบคุม (ADCR2)	57
3.13	โครงสร้างทางลอจิกของอินเตอร์รัพต์ที่เกิดจากรีจิตเตอร์ต่างๆ ใน A/D	58
3.14	บล๊อกไดอะแกรมแสดงการเชื่อมต่อภายในโมดูลของ GPIO (DSP56F805)	59
3.15	โครงสร้างทางลอจิกของขาสัญญาณ GPIO	60
3.16	โครงสร้างทางลอจิกสำหรับวงจรตรวจจับการทำงานของขา GPIO	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

3.17 ระบบ Controller Area Network (CAN) แบบ N โหนด 62

3.18 บล๊อกไดอะแกรมการทำงานของระบบ Controller Area Network 63

3.19 บล๊อกไดอะแกรมของชุดสัญญาณพัลส์วิดม็อดดูเลท 64

3.20 สัญญาณพาหะ(สามเหลี่ยม)ที่ใช้ในการกำหนดคาบเวลาของสวิตชิ่ง 65

3.21 บล๊อกสัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากรีจิตเตอร์ PWMVAL 66

3.22 บล๊อกการกำเนิดสัญญาณเดดไทม์ 66

3.23 สัญญาณพาหะ (สามเหลี่ยม) และพัลส์พีดับบิวเอ็มที่มีการเพิ่มช่วงเวลาเดดไทม์ 67

3.24 สภาวะการประวิงเวลาที่ใช้ในการขับนำสวิตซ์ในชุดอินเวอร์เตอร์ 67

3.25 รีจิตเตอร์ควบคุมการทำงานของชุดสัญญาณพีดับบิวเอ็ม (PWM Control Register) 67

3.26 ลอจิกการทำงานของขาสัญญาณฟอล์ตที่ส่งผลในการหยุดสัญญาณ PWM 70

3.27 รูปคลื่นสัญญาณพาหะและสัญญาณเอาท์พุต (พีดับบิวเอ็ม) แบบกำหนดขั้ว 70

3.28 บล๊อกไดอะแกรมการทำงานภายในของการรับส่งแบบอนุกรม (SCI) 71

3.29 รูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการรับส่งแบบอนุกรม 71

3.30 บล๊อกไดอะแกรมในการส่งข้อมูลแบบอนุกรม 73

3.31 บล๊อกไดอะแกรมในการรับข้อมูลแบบอนุกรม 73

3.32 รีจิตเตอร์การควบคุมอัตราการรับส่งข้อมูล (SCIBR) 74

3.33 รีจิตเตอร์การควบคุมการทำงานการรับส่งแบบอนุกรม (SCICR) 74

3.34 รีจิตเตอร์แสดงสถานะการทำงานการรับส่งแบบอนุกรม (SCISR) 75

3.35 บล๊อกไดอะแกรมการรับส่งข้อมูลแบบ Serial Peripheral Interface (SPI) 77

3.36 การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ Master และ Slave แบบ Full duplex 78

3.37 รีจิตเตอร์การควบคุมและแสดงค่าการรับส่งข้อมูล (SPSCR) 78

3.38 โครงสร้างทางลอจิกของบิตต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดอินเตอร์รัพต์ 79

3.39 รีจิตเตอร์ที่ใช้กำหนดขนาดจำนวนบิตของข้อมูล (SPDSR) 80

3.40 สัญญาณที่เกิดการอุปกรณ์เอ็นโค๊ดเดอร์ 81

3.41 บล๊อกไดอะแกรมการทำงานของ Quadrature Decoder module 81

3.42 รีจิตเตอร์ควบคุมการทำงาน (DECCR) ของ Quadrature Decoder module 82

3.43 บล๊อกไดอะแกรมของวงจรนับและจับเวลา (Timer) 84

3.44 สัญญาณที่ใช้กับโหมดการนับแบบ Quadrature 86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

3.45 รีจิตเตอร์ควบคุมการทำงานของชุดวงจรนับและจับเวลา (Control Register) 87

3.46 รีจิตเตอร์สถานะและควบคุม (Status and Control Register) 89

4.1 วงจรสมมูลของอินดักชั่นมอเตอร์ 93

4.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำเมื่อไม่คิดแรงดันตกคร่อมที่ลีคเกจ-อินดั๊กแตนซ์และแรงดันตกคร่อมค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ 93

4.3 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ 93

4.4 กราฟคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของค่าแรงบิดและความเร็ว 95

4.5 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ที่ได้จากการควบคุมแบบ – เฟสเซอร์ 98

4.6 กราฟคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของค่าแรงบิดและความเร็วที่ได้จากการ-ควบคุมแบบเฟสเซอร์ 98

4.7 บล๊อกไดอะแกรมของการควบคุมมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำโดยใช้หลักการประยุกต์ทางด้านเฟสเซอร์จากโครงสร้างของมอเตอร์ 99

4.8 บล๊อกไดอะแกรมของ PAC 99

4.9 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส และสัญญาณขับนำที่ได้จากการเปรียบเทียบ 100

4.10 รูปคลื่นกระแสที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สลิปต่อการเปลี่ยนแปลง-ค่าภาระแบบสเตปโหลด 103

4.11 โมเดลการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยตรง (Direct Online) 107

4.12 รูปคลื่นแรงดันไลน์, กระแส, แรงบิดและความเร็วรอบที่ได้จากการป้อนไฟที่มีขนาดแรงดันและความถี่พิกัดให้กับมอเตอร์ 107

4.13 รูปคลื่นกระแส 3 เฟสและแรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากการควบคุมแบบ - Direct Online 108

4.14 โมเดลการควบคุมแบบเฟสเซอร์ที่ใช้ในการทดลองในโปรแกรม Matlab & - Simulink 109

4.15 โมเดลภายในบล๊อก PAC (Phasor Applied Speed Control) 109

4.16 รูปคลื่นแรงดันไลน์, กระแส, แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการ - ควบคุมแบบเฟสเซอร์ 110

4.17 รูปคลื่นแรงดันไลน์ที่ได้จากการควบคุมแบบเฟสเซอร์ 111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.18 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส ที่ได้จากการควบคุมแบบเฟสเซอร์ 111

4.19 รูปคลื่นแรงดันไลน์, กระแส, แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการ - ทดสอบกลับทิศทางหมุนในสภาวะไร้ภาระ 112

4.20 รูปคลื่นกระแส, แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบกลับทิศทางหมุนในสภาวะไร้ภาระและมีการต่อภาระที่พิกัดที่เวลา 3 วินาที 113

4.21 รูปคลื่นกระแส, แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบโดย - การต่อภาระขนาด 5 นิวตัน-เมตร ตลอดเวลา 113

4.22 โมเดลการควบคุมแบบสเกล่าร์ที่ใช้ในการทดลองในโปรแกรม Matlab & - Simulink 114

4.23 รูปคลื่นแรงดันไลน์, กระแส, แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จาก - การทดสอบที่ค่าความเร็วคำสั่ง 0 ถึง 1500 รอบต่อนาที 115

4.24 รูปคลื่นแรงดันไลน์, กระแส, แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการ - ทดสอบใส่ค่าภาระขนาด 8 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 2 วินาที 115

4.25 รูปคลื่นแรงดันไลน์, กระแส, แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการ - ทดสอบกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์ ที่เวลา 1.5 วินาที 116

5.1 วิวัฒนาการจากการควบคุมแบบแอนะล็อกไปสู่การควบคุมแบบดิจิตอล 118

5.2 บล๊อกการควบคุมโดยใช้ DSP ควบคุมการทำงานของวงจรกำลังเพื่อการขับเคลื่อน 119

5.3 บล๊อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของชุดอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในโครงงานวิจัย 119

5.4 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์และวงจรกรอง 120

5.5 วงจรเรียงกระแสที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์และรูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ 121

5.6 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านไดโอดในตอนเริ่มเปิดเครื่องเมื่อแรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นไซน์และโคไซน์ 123

5.7 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านไดโอดในตอนเริ่มเปิดเครื่องเมื่อมีความต้านทานจำกัดกระแสและแรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นไซน์และโคไซน์ 124

5.8 ทรานซิสเตอร์โมดูลกำลังแบบ IGBT รุ่น PM30CSJ060 125

5.9 วงจรแยกโคดและชุดขับนำทรานซิสเตอร์โมดูลกำลังแบบ IGBT 126

5.10 คุณสมบัติแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
5.11	วงจรสร้างช่วงการประวิงเวลา (Dead time)	129
5.12	ตัวอย่างสัญญาณพัลส์ขับนำที่ได้จากการประวิงเวลา	130
5.13	วงจรควบคุมและหยุดพัลส์สัญญาณขับนำชุดอินเวอร์เตอร์	131
5.14	วงจรตรวจจับกระแสและรูปคลื่น	132
5.15	วงจรป้องกันแรงดันเกิน	133
5.16	วงจรตรวจวัดแรงดันไฟตรง	134
5.17	วงจรป้องกันกระแสเกิน	135
5.18	อุปกรณ์ตรวจจับความเร็วรอบ (เอ็นโค๊ดเดอร์) และวงจรสำหรับการเชื่อมต่อ - กับ DSP	136
5.19	ระดับสัญญาณพัลส์เอ็นโค๊ดเดอร์ที่ออกจากขาเอาท์พุต	136
5.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ได้กับนับจำนวนนับของไทม์เมอร์	138
5.21	พัลส์สัญญาณจากเอ็นโค๊ดเดอร์	139
5.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ได้จากการนับพัลส์จากเอ็นโค๊ดเดอร์	139
5.23	รูปคลื่นสัญญาณไซน์ที่ได้จากจำลองการทำงานตรวจจับความถี่ของมอเตอร์	142
5.24	การเชื่อมต่อระหว่างไอซี MAX5251 กับ DSP และฟังก์ชั่นภายในไอซี MAX5251	143
5.25	โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำในเทอมของแรงบิดและความเร็วรอบ	144
5.26	โครงสร้างวงรอบการควบคุมความเร็วรอบ	145
5.27	ทางเดินรากของวงรอบการควบคุมความเร็ว	146
5.28	แผนภาพโบดของระบบควบคุมความเร็ววงรอบเปิดที่ได้ทำการออกแบบ	146
5.29	วิธีการประมาณค่าแบบ Trapezoidal, Forward rectangle และ Backward rectangle	148
5.30	โปรแกรม Code Wariror ของบริษัท Metro works จำกัด	150
5.31	ส่วนของโปรแกรมที่ใช้ในการตรวจสอบและดูค่าสถานะต่างๆ ในตัวประมวล	151
5.32	โครงสร้างหลักของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุม	152
5.33	โครงสร้างทางซอฟต์แวร์ของกระบวนการควบคุมแบบพีไอ (PI Control)	153
5.34	โครงสร้างทางซอฟต์แวร์สำหรับการคำนวณมุมและสร้างกระแสอ้างอิง	154
5.35	โครงสร้างทางซอฟต์แวร์สำหรับตรวจเช็คค่าของมุม (Forward หรือ Reverse) และกำหนดตัวชี้ตำแหน่งมุม (เก็บค่ามุมเพียง 90 องศา)	154

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

5.36 โครงสร้างทางซอฟต์แวร์สำหรับการขับนำสวิตซ์โดยใช้หลักการอีสเตอร์ - รีสซีสแบนด์ 155

6.1 รูปคลื่นแสดงพฤติกรรมกระแสไซน์อ้างอิงที่ได้จากการประมวลผลภายในตัว DSP 159

6.2 รูปคลื่นกระแสเฟส A และเฟส B ที่ได้จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำใน - สภาวะไร้ภาระ 159

6.3 รูปคลื่นกระแสเฟส A และสัญญาณขับนำสวิตซ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบ 160

6.4 รูปคลื่นกระแสที่ได้จากการแปลงจาก 3 แกน (i_a, i_b, i_c) ไปเป็น 2 แกน (i_β, i_α) 160

6.5 เส้นทางเดินของแทร็กกระแสที่ได้จากการแปลงค่ากระแสจากระบบ 3 แกน - มา 2 แกน 161

6.6 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 161

6.7 สเปคตราฮาร์โมนิกส์ของกระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 162

6.8 สเปคตราฮาร์โมนิกส์ของแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 163

6.9 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ดีซีบัส 164

6.10 สเปคตราฮาร์โมนิกส์ของกระแสที่ดีซีบัส 164

6.11 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ป้อนเข้าวงจรทางด้านเอซีไลน์ 164

6.12 สเปคตราฮาร์โมนิกส์ของแรงดันที่ป้อนเข้าวงจรทางด้านเอซีไลน์ 165

6.13 สเปคตราฮาร์โมนิกส์ของกระแสที่ป้อนเข้าวงจรทางด้านเอซีไลน์ 165

6.14 รูปคลื่น, สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของกระแสและแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ที่ - ความถี่ 10 เฮิรตซ์ และ 20 เฮิรตซ์ 167

6.15 รูปคลื่น, สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของกระแสและแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ที่ - ความถี่ 30 เฮิรตซ์ และ 40 เฮิรตซ์ 168

6.16 รูปคลื่น, สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของกระแสและแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ที่ - ความถี่ 50 เฮิรตซ์ และ 60 เฮิรตซ์ 169

6.17 รูปคลื่น, สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของกระแสและแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ที่ - ความถี่ 70 เฮิรตซ์ 170

6.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงบิดที่ได้จากการควบคุมที่ความถี่ต่างๆ 171

6.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความถี่อินเวอร์เตอร์ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ที่ ความเร็วคำสั่งเท่ากับ 1200 รอบต่อนาที 171

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

6.20 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ได้จากการทดสอบการรับภาระโหลดที่ความถี่ต่างๆ 173

6.21 รูปคลื่นกระแสและความเร็วมอเตอร์ขณะไร้ภาระ (ซีกซ้าย) และขณะต่อภาระ (ซีกขวา) ที่คำสั่งความถี่ต่างๆ 175

6.22 รูปคลื่นกระแสและความเร็วมอเตอร์ขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่ง 1500 รอบ - ต่อนาที 177

6.23 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่มอเตอร์ขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่ง 1500 รอบ - ต่อนาที 177

6.24 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ดีซีบัสขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่ง 1500 รอบ - ต่อนาที 178

6.25 รูปคลื่นกระแสเฟส A และกระแสเฟส B ขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่ง 179

6.26 รูปคลื่นกระแสและความเร็วมอเตอร์ขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่งจาก 0 ไป 1500 ไป 750 ไป 1500 และไปยัง 0 รอบต่อนาที 179

6.27 รูปคลื่นกระแสและความเร็วมอเตอร์ขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่งระหว่างความเร็ว 600 รอบต่อนาทีกับความเร็ว1500 รอบต่อนาที 180

6.28 รูปคลื่นกระแสและความเร็วมอเตอร์ขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่ง 600 รอบต่อนาที ไปยังความเร็ว1500 รอบต่อนาที 180

6.29 รูปคลื่นกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่งระหว่างความเร็ว 600 รอบต่อนาทีกับความเร็ว1500 รอบต่อนาที 181

6.30 รูปคลื่นกระแสที่เอซีไลน์ขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่งระหว่างความเร็ว 600 รอบต่อนาทีกับความเร็ว1500 รอบต่อนาที 181

6.31 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ดีซีบัสขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่งระหว่างความเร็ว 600 รอบต่อนาทีกับความเร็ว1500 รอบต่อนาที 182

6.32 รูปคลื่นกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในช่วงสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็ว 183

6.33 รูปคลื่นกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในช่วงสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็ว แบบสเตปคำสั่งที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0 รอบต่อนาที 184

6.34 รูปคลื่นกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์และความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงสภาวะที่มีการทดสอบการกลับทางหมุนของมอเตอร์ 184

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

6.35 รูปคลื่นกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์เฟส A และเฟส B ขณะกลับทิศทางหมุน - จากความเร็ว 1500 ไปยัง – 1500 รอบต่อนาที 185

6.36 รูปคลื่นกระแสมอเตอร์และความเร็วรอบมอเตอร์ขณะกลับทิศทางหมุน - (100 ms/div) จากความเร็ว 1500 ไปยัง – 1500 รอบต่อนาที 185

6.37 รูปคลื่นกระแสมอเตอร์และความเร็วรอบมอเตอร์ขณะทดสอบกลับทางหมุน - แล้วหยุด 186

6.38 รูปคลื่นกระแสมอเตอร์เฟส A และเฟส B ขณะทดสอบกลับทางหมุนแล้วหยุด 186

6.39 รูปคลื่นกระแสมอเตอร์และความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ 186

6.40 รูปคลื่นแสดงผลการตอบสนองของกระแสมอเตอร์และความเร็วรอบของมอเตอร์ ที่ได้จากการใส่ภาระที่พิกัดโหลดต่างๆ ที่ความเร็ว 750 และ 1500 รอบต่อนาที 189

6.41 รูปคลื่นกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในช่วงสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าภาระ 190

6.42 ผลการตอบสนองความเร็วรอบเมื่อปลดภาระโหลดแบบทันทีทันใด 190

6.43 ผลการตอบสนองความเร็วรอบเมื่อคงสภาวะโหลดขนาด 5 นิวตัน-เมตร 191

7.1 การนำ DSP มาใช้ในการควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง 194

7.2 การนำ DSP มาใช้ในการควบคุมแรงดันทางด้านเข้า 195

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวัตถุประสงค์แล้วเพื่อต้องการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้เป็นไปตามคำสั่งและมีความเหมาะสมกับโหลด ในแต่ละงานจึงต้องการระบบควบคุมที่มีสมรรถนะแตกต่างกัน เช่นในระบบสายพานลำเลียง ระบบม้วนใยที่ต้องการควบคุมความตึงจะต้องสามารถควบคุมความเร็วได้แตกต่างกันตามขนาดของม้วนที่ใหญ่ขึ้นเพื่อรักษาความตึงให้คงที่ หรือระบบลิฟต์ที่ต้องการเริ่มและหยุดการทำงานอย่างนุ่มนวล ดังนั้นอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือที่เรียกกันว่า อินเวอร์เตอร์ จึงมีอยู่ค่อนข้างหลากหลายเพื่อตอบสนองความต้องการใช้งานที่แตกต่างกัน ในระยะต้นของการพัฒนาระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเป็นแนวทางที่เรียกว่า การควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่ ซึ่งเป็นระบบเปิด (ไม่มีการป้อนกลับของลูปความเร็ว) ซึ่งผลที่ได้จากการควบคุมดังกล่าวก็คือจะให้แรงบิดที่คงที่ได้ในย่านไม่เกินความเร็วที่พิกัดของมอเตอร์ แต่เมื่อมีภาระสูงขึ้นค่าความเร็วรอบที่ได้จากการควบคุมจะมีค่าลดลง ต่อมาจึงได้มีพัฒนาขึ้นไปอีกขั้นโดยมีการป้อนกลับของลูปความเร็วที่เรียกว่า การควบคุมแบบสเกลาร์ (Scalar Control) ซึ่งให้ผลการตอบสนองต่อความเร็วรอบก็ยังไม่ดีนักจึงได้มีการพัฒนามาสู่การควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control) ที่ให้สมรรถนะที่ดีกว่ามาก แต่ในงานควบคุมบางประเภทที่ต้องการผลการตอบสนองต่อโหลดที่ดีกว่าการควบคุมแบบสเกลาร์ และไม่มีความจำเป็นจะต้องใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์ ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบเฟสเซอร์ ซึ่งการควบคุมที่กำลังศึกษาและวิจัยนี้จะเป็นการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์โดยตรงโดยควบคุมจากกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งการควบคุมดังกล่าวเป็นการควบคุมทั้งเฟส (Phase) และขนาด (Magnitude) โดยอาศัยสมการเพียงเล็กน้อยในการคำนวณ โดยการควบคุมดังกล่าวนี้จะให้ผลการตอบสนองความเร็วรอบที่ดีในช่วงการทำงานคงตัว (Steady state) และจะให้ผลตอบสนองดีกว่าการควบคุมแบบสเกลาร์ในช่วงการทำงานชั่วขณะ (Transient) เนื่องจากการควบคุมแบบสเกลาร์ไม่ได้เป็นการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์โดยตรง แต่เป็นการควบคุมผ่านปริมาณสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นและความเร็วสลิปในขณะที่มอเตอร์ทำงาน และถ้าหากเปรียบเทียบกับการควบคุมแบบเวกเตอร์แล้ว การตอบสนองความเร็วของการควบคุมแบบเวกเตอร์จะรวดเร็วกว่าหลักการที่นำเสนอนี้อยู่เนื่องจากควบคุมแบบเวกเตอร์จะอาศัยการควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กโดยตรง โดยอาศัยขั้นตอนการทำงานที่ยุ่งยากเพื่อให้ได้มาซึ่งสมรรถนะของการควบคุมการทำงานที่ดีเลิศ

การควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ก่อนจะใช้อุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมการทำงาน ซึ่งแต่เดิมนั้นระบบต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมจะใช้สัญญาณแอนะล็อกใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะเข้าและออกจากระบบต่างๆ อย่างต่อเนื่องกับเวลา ระบบดังกล่าวมักจะมีราคาถูกและมีการออกแบบที่ง่าย แต่ข้อเสียก็คือขาดความแม่นยำในการประมวลผล และมีขีดจำกัดทางด้านประสิทธิภาพ ซึ่งข้อเสียนี้กลายเป็นอุปสรรคกับระบบสมัยใหม่อันเป็นระบบที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำมาก ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงระบบการประมวลผลสัญญาณให้เป็นระบบดิจิตอลโดยใช้เทคโนโลยีวงจรรวม (Integrated Circuit) ซึ่งได้รับการพัฒนาให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงและราคาไม่แพงนัก อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับไมโครโพรเซสเซอร์ คอมพิวเตอร์ และเกทต่างๆ ได้ โดยข้อดีของการประมวลผลแบบดิจิตอลก็คือ สัญญาณมีสถานะตายตัว 0 และ 1 ทำให้การประมวลผลมีความแน่นอนสูง มีความละเอียดมากกว่า 1 ใน 1000 ส่วน ในขณะที่ระบบแอนะล็อกทำได้ไม่ดีเท่า เนื่องจากอุปกรณ์แบบแอนะล็อกมีคุณสมบัติแปรค่าตามอุณหภูมิจึงทำให้ความแม่นยำและความเชื่อถือของระบบต่ำลง และการประมวลผลสัญญาณทางดิจิตอลจะมีความยืดหยุ่นมากกว่าการประมวลผลแบบแอนะล็อกเพราะสามารถเปลี่ยนแปลงอัลกอลิทึมได้ เพื่อให้ตัวฮาร์ดแวร์เดียวกันทำงานได้หลายอย่าง จึงใช้งานได้กว้างกว่า ซึ่งจะทำให้ต้นทุนโดยรวมสำหรับการใช้งานหลายๆ อย่างนั้น มีราคาต่ำกว่าที่จะต้องสร้างวงจรแอนะล็อกขึ้นมาหลายๆ วงจรเพื่อทำงานทุกงานอย่างเดียวกับการทำงานแบบดิจิตอล ทางด้านข้อเสียของการประมวลผลสัญญาณทางดิจิตอลนั้นก็มีจุดบกพร่องอยู่เช่นกัน ได้แก่ ต้องอาศัยอุปกรณ์ประเภท D/A และ A/D ที่มีประสิทธิภาพและความเร็วในการทำงานสูงในการทำงานร่วมกัน จึงทำให้ราคาค่อนข้างแพง และระบบสัญญาณดิจิตอลมักมีข้อจำกัดทางด้านแถบความถี่ (Bandwidth) ทำให้ใช้งานได้กับแถบความถี่ไม่กว้างมากเท่ากับระบบทางสัญญาณแอนะล็อก แต่อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีทางด้านไอซี (IC) ได้ถูกพัฒนาให้มีความเร็วสูงขึ้นจึงทำให้อนาคตอันใกล้นี้ ระบบสัญญาณดิจิตอลจะสามารถใช้งานกับแถบความถี่กว้างๆ ได้ ในปัจจุบันการใช้การประมวลผลสัญญาณทางดิจิตอลเริ่มเข้ามามีบทบาทอย่างมากในวงการอินเวอร์เตอร์ไดร์ฟ เนื่องจากเทคโนโลยีในเรื่องของการควบคุมจะเป็นจุดขายและเป็นจุดที่แสดงถึงขีดความสามารถของการทำงานของเครื่องได้ ซึ่งการควบคุมส่วนใหญ่จะใช้การประมวลผลทางด้านสัญญาณดิจิตอลร่วมกับอุปกรณ์จำพวกคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมต่างๆ และสามารถกระทำผ่านทางซอฟต์แวร์ซึ่งมีความละเอียด ความแม่นยำ และมีความยืดหยุ่นสูง อันเป็นการแสดงถึงระบบควบคุมที่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากเหตุผลดังกล่าวในข้างต้นของการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ประกอบเทคโนโลยีที่มีในปัจจุบันอันเป็นจุดขายและจุดที่แสดงขีดความสามารถต่างๆ ในวิทยานิพนธ์จึงได้มีการนำตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (Digital Signal Processor) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่ล่าสุดเข้ามาใช้ในวงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์โดยใช้หลักการควบคุมแบบเฟสเซอร์ที่อาศัยสมการที่ได้จากโครงสร้างของมอเตอร์ร่วมกับความเร็วรอบที่ได้จากตัวตรวจจับความเร็วภายนอกมาทำการประมวลผลและสั่งการควบคุมมอเตอร์ให้มีการทำงานดังที่ตั้งวัตถุประสงค์ไว้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ดังกล่าวยังได้แสดงถึงที่มาของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการ, การออกแบบวงจรใช้งานและสร้างเครื่องต้นแบบพร้อมกับทดลองหลักการดังกล่าวจากการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อ ๆ ไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ต้องการนำเสนอแนวทางการศึกษา, การค้นคว้าและพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับการควบคุมการทำงานโดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณทางด้านดิจิตอลในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 2 แรงม้า โดยการใช้หลักการประยุกต์ทางเฟสเซอร์จากโครงสร้างมอเตอร์ ในการสร้างสมการที่ใช้ในการสร้างแพรเทิร์นการทำงาน ซึ่งทฤษฎีการควบคุมที่นำเสนอนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยควบคุมจากคำสั่งแรงบิดที่ให้กับมอเตอร์โดยตรงซึ่งหมายถึงเป็นการควบคุมกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์นั้นเอง โดยการควบคุมนี้จะมีวงรอบการทำงานของลูปกระแสและลูปความเร็วที่มีการทำงานที่สัมพันธ์กัน โดยที่ลูปความเร็วจะอาศัยสัญญาณความเร็วรอบที่ได้จากการตรวจจับความเร็วรอบมาทำการประมวลผลและสั่งการส่วนที่ลูปกระแสจะอาศัยการตรวจจับสัญญาณกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์มาทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์อ้างอิงเพื่อใช้ในการควบคุมการสร้างแพรเทิร์นการทำงานของสวิตซ์กำลังต่อไป และเมื่อจัดทำเครื่องต้นแบบเสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้วจะนำไปทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 2 แรงม้า ภายใต้สภาวะการทำงานร่วมกับโหลดที่เป็นลักษณะสภาวะคงตัวและสเตปโหลด เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของระบบ รวมทั้งผลการตอบสนองทางไดนามิคเทียบกับการทดลอง

1.3 วิธีการวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้าทฤษฎีจากบทความ, จากวารสาร, เอกสารและตำราที่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับเทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์
2. วิเคราะห์และออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยการประยุกต์ทางเฟสเซอร์จากโครงสร้างมอเตอร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
3. ออกแบบวงจรการทำงานโดยใช้การจำลองวงจรจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์
4. ศึกษา, ทดลองและควบคุมการทำงานตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล
5. สร้าง, ติดตั้งและแก้ไขส่วนของฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในโครงงานวิจัย
6. สร้าง, ทดลองและแก้ไขวงจรที่ทำการวิจัยในแต่ละส่วน
7. นำแต่ละส่วนมาประกอบรวมกันและทดลองร่วมกันทั้งหมด
8. แก้ไข, ปรับปรุงวงจรและทำการทดสอบวงจรทั้งหมด
9. เก็บผลที่ได้จากการทดลองเทียบกับการจำลอง
10. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลองแล้วพิมพ์วิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. จะต้องวิเคราะห์หลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้หลักการประยุกต์ทางเฟสเซอร์ให้อยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการออกแบบวงจร
2. การควบคุมดังกล่าวจะต้องใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DSP) เป็นตัวประมวลผลและสั่งการควบคุมวงจรทั้งหมด
3. จะต้องสร้างเครื่องต้นแบบของชุดอินเวอร์เตอร์และฮาร์ดแวร์ทั้งหมดที่ใช้กับหลักการดังกล่าว เพื่อทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 2 แรงม้า

1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษา วิเคราะห์ วิจัย เพื่อออกแบบและทดลองการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้หลักการทางเฟสเซอร์ในการรักษาความเร็วรอบให้มีค่าคงที่ ซึ่งรายละเอียดที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์สามารถแบ่งเป็นบทๆ ได้ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ เนื้อหาคราวๆ ในแต่ละบท ที่มาของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ การวิจัย ขอบเขต โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ และประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานมอเตอร์และการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ชนิดของอินเวอร์เตอร์, รูปแบบของการม็อดดูเลท, คุณสมบัติและหลักการต่างๆ ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

บทที่ 3 ทฤษฎีและการใช้งานตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล การใช้งานตัวประมวลผล การใช้งานหน่วยความจำ ชนิดและหน้าที่ของขาสัญญาณต่างๆ

บทที่ 4 อธิบายถึงหลักการควบคุมความเร็วรอบแบบเฟสเซอร์ หลักการประยุกต์ทางเฟสเซอร์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิเคราะห์คุณสมบัติที่ได้จากหลักการพร้อมทั้งทำการซิมมูลเลตผลลัพธ์ที่ได้จากหลักการประยุกต์ทางเฟสเซอร์จากคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Matlab & Simulink

บทที่ 5 การออกแบบและการสร้าง หลักการออกแบบวงจรกำลัง ชุดควบคุมการทำงาน ระบบป้องกัน ระบบควบคุมความเร็วรอบจากอุปกรณ์ตรวจวัด ระบบควบคุมป้อนกลับและการออกแบบโครงสร้างทางซอฟต์แวร์สำหรับการทำงานของตัวประมวลสัญญาณดิจิตอล

บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลองขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้การควบคุมแบบเฟสเซอร์ ภายใต้สภาวะการทำงานร่วมกับโหลดที่เป็นลักษณะสภาวะคงตัวและสเตปโหลด การทดสอบการทำงานแบบสเตปคำสั่ง การทดสอบกลับทิศความเร็วของมอเตอร์

บทที่ 7 บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ภาคผนวก ก. ข้อมูลในแผ่นป้าย (Name plate) และค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์

ภาคผนวก ข. การคำนวณค่าโมเมนต์ของความเฉื่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค. เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

ภาคผนวก ง. เครื่องต้นแบบและภาพโครงงานโดยรวมของโครงงานวิจัย

ภาคผนวก จ. กล่าวถึงผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ในการประชุมทางวิศวกรรม

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. เป็นการประยุกต์ใช้หลักการของมอเตอร์ในการควบคุมกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ซึ่งหลักการควบคุมดังกล่าวจะเป็นหลักการอีกหลักการหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้
2. รู้จักและสามารถใช้เทคโนโลยีที่มีมากับชิฟ (Chip) ต่างๆ ประกอบกันเข้ากับโครงงานวิจัยที่ทำ
3. รู้จักการแก้ปัญหากับผลที่เกิดขึ้นจากการควบคุมโดยใช้ตัวประมวลสัญญาณทางดิจิตอล
4. รู้จักการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทำงานทั้งกระบวนการควบคุมได้
5. ได้อินเวอร์เตอร์ที่ใช้หลักการควบคุมความเร็วแบบเฟสเซอร์ที่สามารถควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสได้
6. เป็นพื้นฐานอีกรูปแบบหนึ่งในการศึกษาวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์
7. สามารถนำเทคนิคการประยุกต์ทางเฟสเซอร์ไปใช้งานในทางด้านเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ได้ เช่น งานทางด้าน Auto motive เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 บทนำ

2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส มีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ส่วนคือส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) และส่วนที่หมุน (Rotor) โดยสามารถแบ่งชนิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. แบบกรงกระรอก (Squirrel cage) โครงสร้างภายในของโรเตอร์จะทำด้วยแผ่นลามิเนทเซาะผิวทางด้านนอกให้เป็นร่อง ตรงกลางแผ่นจะเจาะรูสำหรับสอดเพลา เมื่อนำแผ่นเหล่านี้มาอัดเข้าด้วยกันจะได้เป็นแกนโรเตอร์ โดยภายในร่องจะมีแกนอลูมิเนียมอยู่ในร่องของผิวด้านนอกของกรงกระรอก และที่ปลายของแกนอลูมิเนียมทั้งสองข้างจะมีการต่อเชื่อมถึงกันโดยวงแหวนหรือเรียกว่า "End Ring" ส่วนที่ปลายเพลาอาจมีคลีบยื่นออกไปเพื่อใช้ในการติดตั้งใบพัดระบายความร้อน

2. แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound rotor) โรเตอร์แบบนี้จะใช้ขดลวดทองแดงในการพันรอบโรเตอร์แทนที่จะใช้แกนอะลูมิเนียมอย่างมอเตอร์ชนิดกรงกระรอก และที่ปลายของขดลวดจะมีการต่อกับสลิปริงเพื่อใช้ในการต่อร่วมกับวงจรภายนอกในการสตาร์ทการทำงานของมอเตอร์ โดยโรเตอร์ดังกล่าวจะต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วที่สเตเตอร์

2.1.2 หลักการทำงาน

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส สมดุลย์ที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ให้กับขดลวดที่สเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นในสเตเตอร์ เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนตัดตัวนำที่ฝังอยู่ในตัวโรเตอร์จะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้น และเนื่องจากโรเตอร์ถูกลัดวงจรจึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงบิดขึ้นที่ตัวโรเตอร์ จึงทำให้โรเตอร์หมุนไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนซึ่งความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนหรือที่เรียกว่าความเร็วซิงโครนัส (ω_s) สามารถหาได้จาก

$$\omega_s = \frac{(2\pi)/(P/2)}{1/f} = \frac{2\omega}{P} \qquad \text{rad / s} \tag{2.1}$$

หากเขียนอยู่ในรูปของหน่วยรอบต่อนาที (rpm) จะได้ค่าความเร็วซิงโครนัสเท่ากับ

$$n_s = 60 \cdot \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{120\,f}{P} \qquad \text{rpm} \tag{2.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

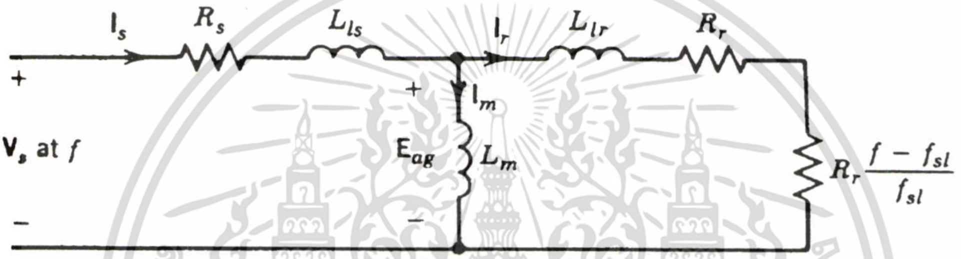
เมื่อ n_s คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์

ω_s คือ ค่าความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า

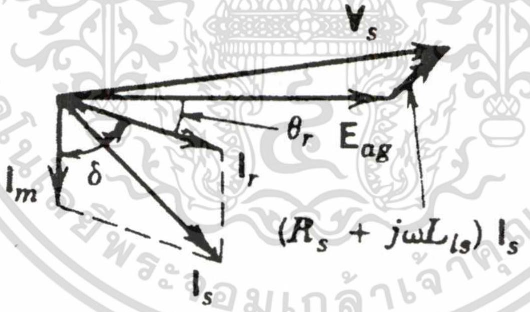
f คือ ความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

ฟลักซ์ในช่องอากาศ (Air-gap Flux) ที่เกิดจากการกระจายของความหนาแน่นของฟลักซ์ (B_{ag}) จะหมุนที่ความเร็วซิงโครนัสรอบๆ ขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่กับที่ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำระหว่างช่องว่างอากาศ (Air-gap Voltage) หรือ E_{ag} ซึ่งแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีความถี่เท่ากับความถี่แหล่งจ่าย สามารถแสดงได้ในภาพที่ 2.1



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.1 (ก) วงจรสมมูลของมอเตอร์อินดักชั่นและ (ข) เฟสเซอร์ไดอะแกรม

เมื่อ V_s คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส

R_s คือ ค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์

R_r คือ ค่าความต้านทานขดลวดโรเตอร์

L_m คือ ค่าความเหนี่ยวนำในการสร้างสนามแม่เหล็ก

L_{ls} คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์

L_{lr} คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเนื่องจากการกระจายความหนาแน่นของฟลักซ์เป็นไปในลักษณะของฟังก์ชั่นไซน์นูโซดอย์ จากกฎของฟาราเดย์ทำให้สามารถหาแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำได้จาก

$$e_{ag} = N_s \frac{d\phi_{ag}}{dt} \tag{2.3}$$

เมื่อ e_{ag} คือ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศ

N_s คือ จำนวนรอบของขดลวด

ϕ_{ag} คือ ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ (Air gap)

เมื่อฟลักซ์ในช่องอากาศที่คล้องขดลวดสเตเตอร์มีค่า $\phi_{ag}(t)$ เท่ากับ $\phi_{ag} \sin \omega t$ จะได้

$$e_{ag} = N_s \phi_{ag} \omega \cos \omega t \tag{2.4}$$

โดย ω มีค่าเท่ากับ $2\pi f$

เมื่อแทนค่า $\cos \omega t$ เท่ากับหนึ่งและทำสมการ (2.4) เป็นค่าอาร์เอ็มเอสจะได้

$$E_{ag} = 4.44 N_s \phi_{ag} f \tag{2.5}$$

แรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำเกิดจากการทำปฏิกิริยากับฟลักซ์ในช่องอากาศกับกระแสในโรเตอร์ ถ้าโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนด้วยความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ ก็จะไม่เกิดความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กกับโรเตอร์และจะไม่เกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ด้วย ดังนั้นก็จะไม่เกิดกระแสไหลในส่วนของโรเตอร์และเมื่อไม่มีกระแสเกิดขึ้นก็จะไม่เกิดแรงบิดขึ้นด้วยเช่นกัน แต่ถ้าตัวโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ (ความเร็วซิงโครนัส) ค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัส (ω_s) กับความเร็วโรเตอร์ (ω_r) เรียกว่า ความเร็วสลิป (ω_{sl}) สามารถหาได้จาก

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r \tag{2.6}$$

โดยอัตราส่วนระหว่างความเร็วสลิป (ω_{sl}) กับความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส (ω_s) จะเรียกว่า สลิป (s) สามารถหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Slip, } s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega_{slip}}{\omega_s} \tag{2.7}$$

เมื่อ ω_s คือ ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ (stator angular frequency)

ω_r คือ ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (rotor angular frequency)

ω_{sl} คือ ความถี่เร็วเชิงมุมสลิป (slip angular frequency)

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่ ฟลักซ์แม่เหล็กของสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่หมุนผ่านขั้วแม่เหล็กที่ตัวสเตเตอร์และโรเตอร์ด้วยความเร็วซิงโครนัส จะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำทำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ซึ่งมีความถี่เดียวกันกับแหล่งจ่ายไฟโดยค่าของแรงดันเหนี่ยวนำและกระแสนั้นจะมีค่าสูงสุดขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดในโรเตอร์และสเตเตอร์ ดังนั้นความสัมพันธ์ไฟฟ้าของแรงดันเหนี่ยวนำทั้งสองส่วนนี้จึงมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดทั้งสอง ในขณะที่มอเตอร์อยู่กับที่ (ความเร็วรอบเท่ากับศูนย์) ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในโรเตอร์จะมีค่าเท่ากับความถี่ของสาย กรณีดังกล่าวจะมีค่าสลิปหรือค่าการลื่นไถลเท่ากับ 1 หรือ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อโรเตอร์มีการหมุนที่ความเร็วใดๆ ค่าสลิปจะมีค่าแปรผันตามกันจึงทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์มีค่าเป็นสัดส่วนกับค่าสลิป สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$E_r = s\,E_{ag} \tag{2.8}$$

เมื่อ E_r คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ขณะทำงาน

E_{ag} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ช่องว่างอากาศ

ในทำนองเดียวกันความถี่ของโรเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามค่าสลิป

$$f_{sl} = s\,f \tag{2.9}$$

เมื่อ f_{sl} คือ ค่าความถี่ไฟที่โรเตอร์

f คือ ค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์

การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังกลของมอเตอร์ไฟฟ้าจะเกิดขึ้นที่โรเตอร์ ในมอเตอร์เหนี่ยวนำกำลังทางด้านอินพุตไม่ได้เกิดจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโรเตอร์โดยตรงแต่เป็นการส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านกำลังทางช่องว่างอากาศ (Air Gap) ด้วยการเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและความถี่ขึ้นที่โรเตอร์ ซึ่งค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟสสามารถหาได้จากสมการ (2.8) โดยถ้านำค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าหารด้วยค่าอิมพิแดนซ์ที่โรเตอร์ต่อเฟส (Z_r) จะได้ค่าของกระแสที่โรเตอร์ (I_r) ที่ไหลอยู่ในตัวโรเตอร์เมื่อมอเตอร์ทำงานอยู่ที่ค่าสลิปใดๆ โดยสามารถหาได้จากสมการ (2.10)

$$\vec{I}_r = \frac{s\,E_r}{Z_r} = \frac{s\,E_r}{R_r + j2\pi f s L_{lr}} \qquad (2.10)$$

จากสมการ (2.10) ใช้คำนวณหาค่ากระแสในโรเตอร์ได้ทั้งขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุนและหมุนอยู่ที่ค่าสลิปใดๆ โดยขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุนจะมีค่าสลิปเท่ากับ 1

การอธิบายการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำอาจจะอาศัยหลักการเช่นเดียวกับหม้อแปลงในการเขียนวงจรสมมูลได้ หากแต่ทางด้านโรเตอร์เป็นส่วนที่เคลื่อนที่เท่านั้น ดังนั้นวงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์จะเหมือนกับวงจรสมมูลทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงคือ ประกอบด้วยค่าความต้านทานของสเตเตอร์และค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหลของสเตเตอร์ ส่วนที่สร้างสนามแม่เหล็กให้กับโรเตอร์ได้แก่ ค่ารีแอคแตนซ์ ส่วนค่าความต้านทานของแกนเหล็กในบางครั้งสามารถละเลยได้ ย้อนกลับไปภาพที่ 2.1 กระแส I_m ที่ไหลในขดลวดความต้านทานของสเตเตอร์ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นในแกนเหล็ก (Core loss) และการสูญเสียในขดลวด (Copper loss) โดยจะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นในการคำนวณทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถที่จะย้ายวงจรขนานที่ I_m ไหลอยู่มาไว้ในส่วนด้านหน้าของวงจรได้ โดยค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเล็กน้อย อันเนื่องมาจากแรงดันตกคร่อมความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหลของทางด้านสเตเตอร์ และเพื่อการคำนวณที่ง่ายขึ้นถ้าเราทราบอัตราระหว่างจำนวนรอบของขดลวดที่สเตเตอร์กับโรเตอร์ (ratio) ก็สามารถที่จะย้ายค่าวงจรสมมูลของขดลวดทั้งสองมารวมกันได้เช่นเดียวกับในหม้อแปลงไฟฟ้า ในที่นี้หากต้องการย้ายค่าของวงจรเทียบเคียงทางด้านโรเตอร์มาทางด้านสเตเตอร์สามารถหาค่าได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E'_r = a\,E_r = E_m \qquad (2.11)$$

เมื่อ E'_r คือ แรงดันไฟฟ้าขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่โดยย้ายค่ามาทางด้านสเตเตอร์

E_m คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์

a คือ อัตราส่วนระหว่างขดลวดทางด้านสเตเตอร์กับขดลวดทางด้านโรเตอร์

และจากความสัมพันธ์ของกระแสในโรเตอร์สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์ได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{E}_r = R_r\bar{I}_r + j2\pi f s L_{lr}\bar{I}_r \tag{2.12}$$

ผลของเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ_{ag}) กับสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นโดยกระแสโรเตอร์จะทำให้เกิดแรงบิดสนามไฟฟ้า (Electromagnatic Toque) ซึ่งเราสามารถหาค่าสูญเสียในขดลวดโรเตอร์ได้ดังสมการ (2.13)

$$P_r = 3R_r I_r^2 \tag{2.13}$$

และจากสมการ (2.12) หากคูณด้วยค่า 1/s จะได้

$$\bar{E}_{ag} = \frac{R_r}{s}\bar{I}_r + j2\pi f L_{lr}\bar{I}_r \tag{2.14}$$

จากภาพที่ 2.1 เทอมของค่า R_r/s ถูกแทนด้วยผลบวกของค่า R_r กับค่า $R_r(1-s)/s$ และจากสมการ (2.14) ปริมาณต่างๆ ทั้งหมดของโรเตอร์สามารถอ้างอิงได้จากจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์ หากนำสมการ (2.14) คูณด้วยค่าคอนจูเกตของกระแสในโรเตอร์ แล้วนำเฉพาะค่าจำนวนจริงมาใช้ เราจะได้ค่ากำลังงานที่ข้ามช่องอากาศหรือที่เรียกว่า Air-gap Power (P_{ag})

$$P_{ag} = 3\frac{R_r}{s}I_r^2 \tag{2.15}$$

จากสมการ (2.13) และ (2.15) ค่ากำลังไฟฟ้าทางกล (P_{em}) และค่าแรงบิดทางกล (T_{em}) สามารถหาได้จาก

$$P_{em} = P_{ag} - P_r$$

$$= 3I_r^{\,2}R_r\left(\frac{1-s}{s}\right) \tag{2.16}$$

และ

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_r} \tag{2.17}$$

และจากสมการ (2.13), (2.15) และ (2.17) จะได้

$$T_{em} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} \tag{2.18}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 2.1 ค่ากระแส (I_s) ที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์เป็นผลรวมของกระแสที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก (I_m) กับ กระแสที่ไหลผ่านวงจรสมมูลโรเตอร์ (I_r) โดยจะมีค่าเท่ากับ

$$\vec{I}_s = \vec{I}_m + \vec{I}_r \quad (2.19)$$

เฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันที่สเตเตอร์และกระแสที่สเตเตอร์แสดงไว้ในภาพที่ 2.1 กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (I_m) ซึ่งเป็นตัวสร้างฟลักซ์แม่เหล็กจะล้าหลังแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (E_{ag}) อยู่ 90 องศา โดยที่ค่ากระแสในโรเตอร์ (I_r) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดแรงบิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าล้าหลังแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำอยู่เป็นมุมเท่ากับตัวประกอบกำลังของวงจรโรเตอร์ (Power Factor Angle of Rotor Circuit)

$$\theta_r = tan^{-1}\left(\frac{2\pi\ f\ L_{lr}}{R_r/s}\right) \quad (2.20)$$

จากทฤษฎีของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าค่าของแรงบิดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ

$$T_{em} = K_1 \phi_{ag} I_r \sin\delta \quad (2.21)$$

เมื่อ K_1 คือ ค่าคงที่

δ มีค่าเท่ากับ $90^o + \theta_r$

ซึ่งค่าของ δ ก็คือมุมแรงบิด (Torque Angle) หรือมุมระหว่างกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (I_m) ที่เป็นตัวสร้างฟลักซ์แม่เหล็กที่แอร์แก็ปกับค่ากระแสที่โรเตอร์ ค่าของแรงดันที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ $\vec{V}_s$ สามารถหาได้จาก

$$\vec{V}_s = \vec{E}_{ag} + \left(R_s + j\,2\pi\ f\ L_{ls}\right)\vec{I}_s \quad (2.22)$$

ในสภาวะความเป็นจริงมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ออกแบบโดยทั่วๆไป ค่าของความถี่สลิปจะมีค่าค่อนข้างน้อยซึ่งมีผลทำให้ค่า $2\pi\ f\ L_{lr} << R_r$ ดังนั้นค่าของมุมตัวประกอบกำลัง θ_r จะมีค่าประมาณเท่ากับ 0 และมุมแรงบิด δ จะมีค่าเท่ากับ 90 องศา ดังนั้นในสมการ (2.21) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{em} = K_1 \phi_{ag} I_r \quad (2.23)$$

จากสมการ (2.8) และสมการ (2.12) จะได้ค่าประมาณของกระแสที่โรเตอร์เท่ากับ

$$I_r \approx K_2 \phi_{ag}\, s\, f \quad (2.24)$$

เมื่อ K_2 คือ ค่าคงที่

ดังนั้นค่าของแรงบิดจากสมการ (2.23) จะมีค่าเท่ากับ

$$T_{em} \approx K_3 \phi_{ag}^2\, s\, f \quad (2.25)$$

เมื่อ K_3 คือ ค่าคงที่

จากการประมาณค่าทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า

$$I_s \approx \sqrt{I_m^2 + I_r^2} \quad (2.26)$$

สำหรับค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ปกติทั่วๆ ไป จะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการ (2.22) มีค่าเท่ากับ

$$V_s \approx 4.44 N_s \phi_{ag} f$$

$$V_s \approx E_{ag} \quad (2.27)$$

จากสมการ (2.27) สามารถใช้ในการคำนวณหาค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำโดยประมาณได้ ยกเว้นการทำงานที่ความถี่ต่ำ และค่าอัตราส่วนของกำลังสูญเสียในโรเตอร์ต่อกำลังกลที่โรเตอร์จะมีค่าเท่ากับ

$$\%P_r = \frac{P_r}{P_{em}} = \frac{s}{1-s} \quad (2.28)$$

2.1.3 คุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิกัดความถี่และที่พิกัดแรงดัน

ตัวอย่างของคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้ความถี่และแรงดันที่ระบุไว้ในแผ่นป้ายมอเตอร์ (Name Plate) แสดงไว้ดังภาพที่ 2.2 และ 2.3 โดยในภาพที่ 2.2 จะแสดงค่าของแรงบิดทางกล (T_{em}) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความเร็วรอบของโรเตอร์และค่าความถี่ที่โรเตอร์ ในภาพที่ 2.3 แสดง

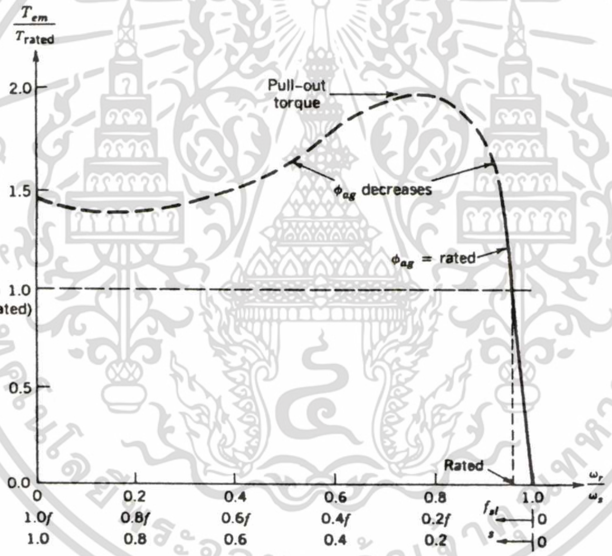
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากระแสที่โรเตอร์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเร็วรอบที่โรเตอร์และค่าความถี่ที่โรเตอร์ พิจารณาที่ค่าความถี่โรเตอร์ต่างๆ ค่าแรงบิดทางกลและค่ากระแสที่โรเตอร์จะไม่เปลี่ยนแปลงในลักษณะแบบเชิงเส้นตามค่าของความถี่โรเตอร์ ที่เป็นอย่างนี้เนื่องมาจาก

1. ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรโรเตอร์มีค่ามากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานที่โรเตอร์

2. ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรโรเตอร์มีค่ามากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานที่โรเตอร์จึงทำให้มีค่าของมุมตัวประกอบกำลังของวงจรโรเตอร์ (θ_r) ดังนั้นค่าของมุมแรงบิด δ จึงไม่เท่ากับ 90 องศา

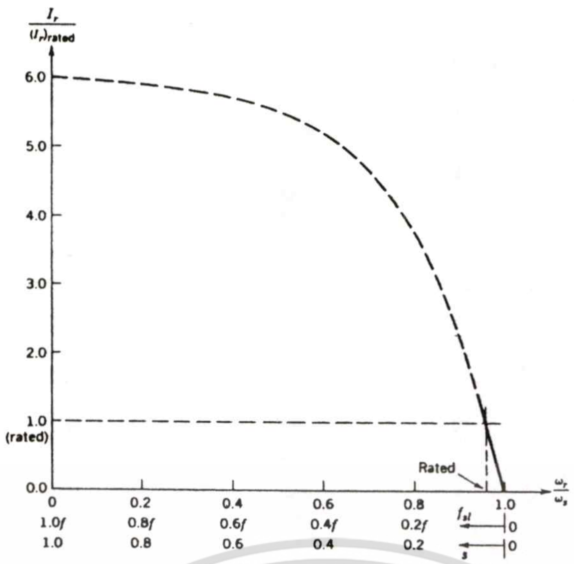
3. ค่ากระแสที่โรเตอร์มีค่ามาก จึงทำให้เราต้องพิจารณาค่าของแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ที่สเตเตอร์อันเนื่องจากค่าของกระแสที่สเตเตอร์ตามสมการ (2.22) ดังนั้นค่าของฟลักซ์ที่แอร์แก็ปซึ่งมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่แอร์แก็ปต่อค่าความถี่จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าของฟลักซ์ที่แอร์แก็ปที่ได้จากแรงดันและความถี่ของแหล่งจ่าย (V_s / f)



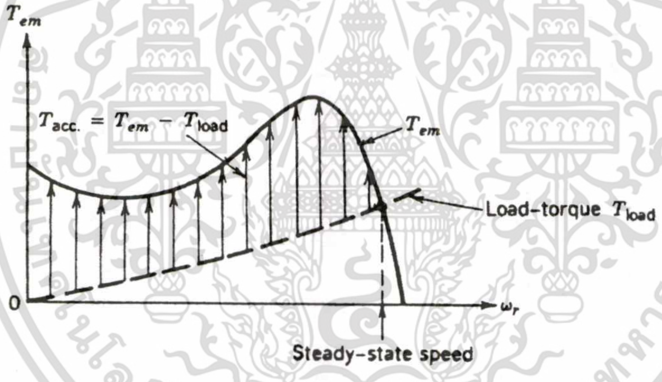
ภาพที่ 2.2 กราฟคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วเมื่อค่าแรงดันและความถี่มีค่าเท่ากับค่าที่พิกัด

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นทั้งสามข้อนี้จะเกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่งส่งผลทำให้คุณลักษณะของแรงบิดและกระแสที่ความถี่โรเตอร์มีค่ามากๆ มีลักษณะดังเส้นปะดังที่แสดงในภาพที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ ค่าแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้เราเรียกว่า "Pull-Out Torque" จากที่กล่าวมาทั้งหมดถ้าเราต้องการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเราจะต้องพยายามรักษาค่าของความถี่ที่โรเตอร์ให้มีค่าน้อยๆ เพื่อที่เราจะได้ไม่ต้องพิจารณาส่วนที่เป็นเส้นปะในภาพที่ 2.2 และ 2.3 แต่อย่างไรก็ตามถ้าเราเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยปราศจากการควบคุมทางด้านเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ค่าขนาดของกระแสขณะเริ่มเดินจะมีค่าสูงถึง 6 – 8 เท่าของกระแสที่พิกัดดังแสดงในภาพที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.3 กราฟแสดงค่าของกระแสโรเตอร์เทียบกับความถี่ที่โรเตอร์เมื่อค่าแรงดันและความถี่มีค่าเท่ากับค่าที่พิกัด



ภาพที่ 2.4 การเริ่มเดินของมอเตอร์โดยให้ค่าแรงดันและความถี่มีค่าเท่ากับค่าที่พิกัด

ในภาพที่ 2.4 แสดงค่าของแรงบิดเพื่อการเร่ง (T_{acc}) ของมอเตอร์ โดยที่ค่าแรงบิดนี้เป็นตัวช่วยในการเร่งความเร็วรอบของมอเตอร์ให้สูงขึ้นจากจุดหยุดนิ่ง และจากภาพยังแสดงถึงคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วของโหลดด้วย โดยจุดตัดของคุณลักษณะของมอเตอร์และโหลดเป็นตัวบอกสภาวะคงตัวของการทำงาน

2.1.4 คุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็ว

จากความสัมพันธ์ของการควบคุมมอเตอร์ ถ้าค่าความถี่โรเตอร์มีค่าน้อยๆ การรักษาค่าของฟลักซ์แม่เหล็กให้มีค่าคงที่จะทำให้ความสัมพันธ์ของแรงบิดทางกลทางด้านเอาท์พุตและค่าความถี่โรเตอร์มีลักษณะที่เป็นเชิงเส้นตลอดทุกๆ ช่วงของความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{em} \approx K_4\, s\, f \tag{2.29}$$

เมื่อ K_4 คือ ค่าคงที่

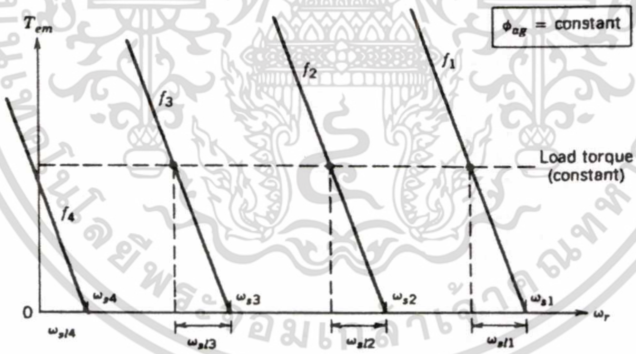
จากสมการ (2.29) จะเป็นการแสดงถึงคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วซึ่งแสดงในภาพที่ 2.5 เมื่อค่าความถี่มีการเปลี่ยนแปลงเรานิยมแสดงค่าของแรงบิดทางกลให้อยู่ในเทอมของความเร็วสลิป และจากสมการ (2.1) และ (2.9) จะได้

$$\omega_{slip} = \frac{f_{slip}}{f}\,\omega_s = \frac{4\pi}{P} f_{slip} \tag{2.30}$$

และจากสมการ (2.29) และ (2.30) จะได้

$$T_{em} \approx K_5\, \omega_{slip} \tag{2.31}$$

เมื่อ K_5 คือ ค่าคงที่



ภาพที่ 2.5 กราฟคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วที่ค่าสลิปมีค่าต่ำ

คุณลักษณะในภาพที่ 2.5 ค่าความถี่ f จะถูกแทนด้วย f_1 ซึ่งก็คือค่าของความเร็วซิงโครนัส ω_{s1} นั้นเอง จากความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วจะเลื่อนไปตามแนวนอนในลักษณะที่ขนานกันไป โดยจะมีการแสดงที่ค่าความถี่ต่างๆ จำนวน 4 ค่า ในการอธิบายกราฟในภาพที่ 2.5 ให้เราพิจารณาที่ค่าความถี่ f_1 และ f_2 ค่าความเร็วซิงโครนัส ω_{s1} และ ω_{s2} จะมีความสัมพันธ์กับค่าความถี่ f_1 และ f_2 โดยจะเห็นได้ว่าค่า ω_{slip1} จะมีค่าเท่ากับค่า ω_{slip2} ถ้าแรงบิดของโหลดที่ความถี่ทั้งสองเท่ากัน ดังนั้นจากระนาบของแรงบิด-ความเร็วของภาพที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าที่แรงบิดเท่ากัน ค่าความเร็วสลิป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ใช้ก็จะมีค่าเท่ากัน ซึ่งทำให้คุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วที่ความถี่ต่างๆ มีลักษณะเหมือนกันและมีการขนานกันไปตามแนวนอน ถ้าค่าแรงบิดของโหลดคงที่ก็จะทำให้ค่าความถี่สลิปมีค่าคงด้วยเช่นกัน แต่จากสมการ (2.9) ค่าของสลิปจะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่มีค่าลดลง ดังนั้นเปอร์เซ็นต์กำลังงานสูญเสียในโรเตอร์ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ที่เป็นเช่นนี้ก็เพื่อทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลดลง ซึ่งการอธิบายหลักการนี้จะกล่าวถึงในหัวข้อของการควบคุมสมรรถนะของมอเตอร์ต่อไป

2.2 การควบคุมสมรรถนะของมอเตอร์

การควบคุมสมรรถนะของมอเตอร์โดยให้มอเตอร์สามารถที่จะทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัดหรือสูงกว่าพิกัดได้โดยการควบคุมแรงดันและความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ซึ่งวิธีการควบคุมดังกล่าวนี้เป็นเทคนิคที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยจะใช้อินเวอร์เตอร์ในการขับเคลื่อนเพื่อที่จะให้ได้แรงดันและความถี่ทางด้านเอาท์พุตเป็นไปตามที่ต้องการของหลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยจะทำให้สมรรถนะของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไป ทั้งการทำงานที่ความเร็วต่ำและที่สูงกว่าพิกัด สมรรถนะนี้เป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำส่วนใหญ่มีโครงสร้างที่แข็งแรงจึงทำให้มันสามารถปฏิบัติงานที่ความเร็วสูงเป็น 2 เท่าของความเร็วที่พิกัดได้โดยไม่มีปัญหาทางกลเกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแรงบิดและกำลังงานซึ่งเป็นฟังก์ชั่นของความเร็วโรเตอร์เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาให้ละเอียดและชัดเจน กราฟคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วจะแสดงอยู่ในภาพที่ 2.6 (ก) และในภาพที่ 2.6 (ข) จะแสดงค่าของแรงดัน, ความถี่, กระแสและแรงบิดซึ่งจะถูกพล๊อตให้เป็นฟังก์ชั่นของความเร็วโรเตอร์ ส่วนในภาพที่ 2.6 (ค) จะเป็นแสดงการพล๊อตค่าความถี่ที่โรเตอร์กับค่าของสลิป และจากภาพที่ 2.6 สามารถแบ่งช่วงการทำงานออกได้เป็น 3 ช่วงดังนี้

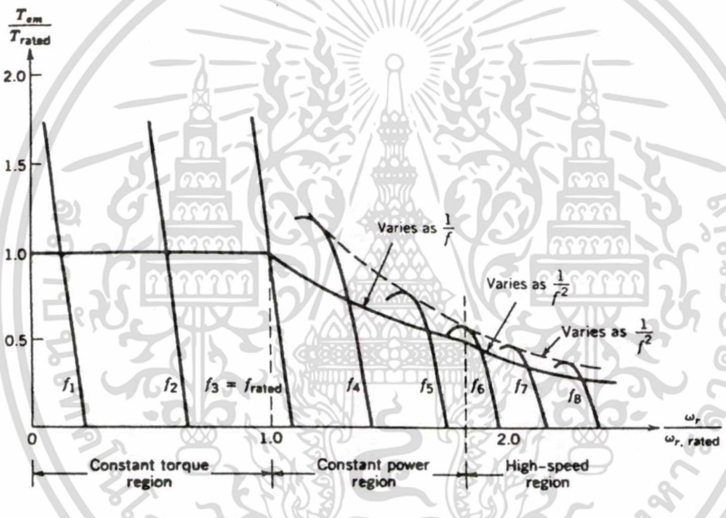
- ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่)
- ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด (ค่ากำลังงานคงที่)
- ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงมาก (ค่าความถี่ที่โรเตอร์คงที่)

2.2.1 ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่)

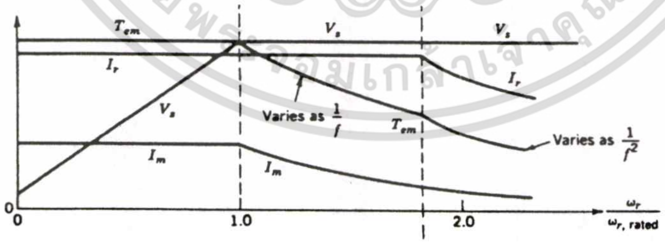
ในช่วงที่ความเร็วของมอเตอร์ต่ำกว่าพิกัดในภาพที่ 2.6 (ก) จะแสดงถึงคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์ที่ค่าความถี่ที่โรเตอร์ต่ำๆ และค่าฟลักซ์ในแอร์แก็ปที่มีค่าคงที่โดยการควบคุมค่าแรงดันต่อความถี่ ในภาพที่ 2.6 (ข) จะเห็นได้ว่าขนาดของแรงดันที่สเตเตอร์จะลดลงในลักษณะเชิงเส้นตามความถี่ โดยเริ่มจากค่าที่พิกัดของมอเตอร์และลดลงมาจนถึงค่าต่ำสุดที่ตั้งไว้อยู่ค่าหนึ่ง ทั้งนี้เพราะที่ความถี่ต่ำๆ ค่าของกระแสแมกนีไตซิงค์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขดลวดแมกนีไตซิงค์ที่ใช้สนามแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว เนื่องจากค่าความต้านทานของสเตเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับขดลวดแมกนีไตซิงค์ดังนั้นจึงต้องเพิ่มแรงดันที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ของอินดักชั่นมอเตอร์เพื่อชดเชยแรงดันที่ตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

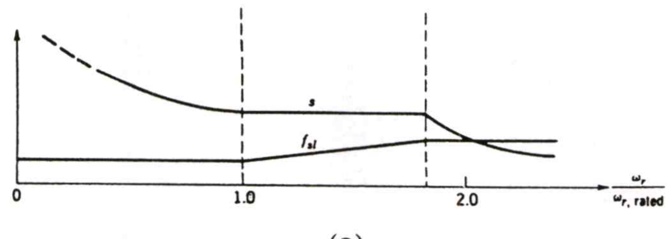
คร่อมค่าความต้านทานของสเตเตอร์ ในกรณีที่ใช้การควบคุมค่าแรงดันต่อความถี่นั้นหากค่าฟลักซ์ในแอร์แก็ปถูกรักษาให้คงที่แล้วมอเตอร์ก็สามารถให้แรงบิดที่พิกัดได้อย่างต่อเนื่อง โดยค่าของกระแสที่ใช้งานจะเป็นค่าที่พิกัด และค่าความถี่ที่โรเตอร์มีค่าคงที่ดังที่แสดงไว้ดังภาพที่ 2.6 (ข) ซึ่งในช่วงการทำงานนี้จะเรียกว่า ช่วงแรงบิดคงที่ (Constant Torque Region) ในช่วงนี้ค่าของความถี่ที่โรเตอร์จะถูกรักษาให้คงที่เท่ากับค่าซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่มอเตอร์ทำงานเต็มพิกัด ดังที่แสดงในภาพที่ 2.6 (ค) และช่วงที่แรงบิดคงที่เท่ากับที่พิกัดนั้นค่ากำลังงานสูญเสียในโรเตอร์ก็จะมีค่าคงที่ด้วย นั่นหมายถึงค่าของกระแสโรเตอร์ก็มีค่าคงที่เช่นกัน อย่างไรก็ตามการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัดนั้นจะเกิดปัญหาในเรื่องของการระบายความร้อนขึ้นซึ่งเป็นความร้อนที่เกิดจากกำลังงานสูญเสียที่โรเตอร์ หากมีปัญหาในเรื่องของความร้อนที่ไม่สามารถระบายได้ทัน (มอเตอร์ที่มีลักษณะระบายความร้อนผ่านโครงอย่างเดียว) อาจทำให้แรงบิดที่ได้มีการลดลง



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 2.6 คุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด (ค่ากำลังงานคงที่)

การเพิ่มความถี่ของสเตเตอร์ให้สูงกว่าที่พิกัดนั้น จะทำให้ความเร็วของมอเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วพิกัดได้ ในงานที่มีการปรับความเร็วของมอเตอร์จะต้องไม่เกินกว่าค่าพิกัดของตัวมอเตอร์ ดังนั้นเราจึงต้องรักษาค่าของแรงดันให้มีค่าคงที่เท่ากับพิกัดที่แหล่งจ่าย โดยเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นอัตราส่วนของค่าแรงดันต่อความถี่จะมีค่าลดลง ซึ่งมีผลต่อการลดลงของค่าฟลักซ์ในแอร์แก็ปด้วย โดยจะเห็นได้ว่า ณ การทำงานที่ความถี่สูงกว่าพิกัดแล้วเส้นโค้งแรงบิด-ความเร็วจะมีความชันแปรตามค่า $1/f$ ดังแสดงในภาพที่ 2.6 (ก) และที่ขีดจำกัดของมอเตอร์ในช่วงนี้ค่าของกระแสที่โรเตอร์จะมีค่าเท่ากับค่าที่พิกัดเหมือนกับในช่วงที่แรงบิดคงที่ แต่ในช่วงนี้ค่าของสลิปจะมีค่าคงที่ ส่วนค่าของความถี่ที่โรเตอร์จะมีค่ามากขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นโดยจะเห็นได้ว่าค่าแรงบิดสูงสุดจะมีค่าแปรผันกับความถี่ดังที่แสดงในสมการ (2.32)

$$T_{em,\max} = \frac{f_{rated}}{f} T_{rated} \tag{2.32}$$

$$P_{em,\max} = \omega_r \; T_{em,\max} \tag{2.33}$$

ในสมการ (2.33) จะแสดงถึงค่าคงที่ที่ค่าพิกัดโดยจะเห็นได้ว่าความเร็วรอบจะแปรตามความถี่ ดังนั้นในช่วงนี้เราจึงเรียกว่าช่วงกำลังงานคงที่ (Constant Power Region) ในทางปฏิบัติแล้วมอเตอร์สามารถจ่ายกำลังสูงกว่าพิกัดโดยไม่เกิดอะไรขึ้นเนื่องจาก

1. ค่าของกระแสแมกนีไตซิงค์ลดลงเป็นผลทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง ดังนั้นค่ากระแสในขดลวดสเตเตอร์จึงมีค่าเท่ากับค่ากระแสที่พิกัดจึงทำให้กระแสในโรเตอร์มีค่าสูงขึ้นได้ ดังนั้นแรงบิดและกำลังก็สูงขึ้นได้
2. เมื่อค่ากระแสแมกนีไตซิงค์ลดลงค่าสูญเสียในแกนเหล็กก็จะมีค่าลดลงในขณะเดียวกันการระบายความร้อนก็จะดีเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความเร็วสูงกว่าที่พิกัด

2.2.3 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงมาก (ค่าความถี่ที่โรเตอร์คงที่)

เมื่อเราให้ค่าของแรงดันทางด้านอินพุตมีค่าเท่ากับที่พิกัด ค่าของความเร็วที่เพิ่มขึ้น 1.5 ถึง 2 เท่าของพิกัด (ขึ้นอยู่กับการออกแบบมอเตอร์) จะทำให้ค่าของฟลักซ์ในแอร์แก็ปมีค่าลดลงมากซึ่งมอเตอร์จะมีค่าเข้าใกล้ Pull-Out Torque ดังแสดงในภาพที่ 2.6 (ก) และที่ความเร็วสูงกว่าที่พิกัดมอเตอร์จะจ่ายแรงบิดได้ไม่ถึงค่าพิกัด ในขณะที่ค่าความถี่ที่โรเตอร์จะมีค่าคงที่ส่งผลทำให้สมรรถนะของแรงบิดลดลงเป็นอัตราส่วน $1/f^2$ ซึ่งทั้งแรงบิดและกระแสมอเตอร์จะลดลงในขณะที่ความเร็วเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.6 (ข) การรักษาค่าของแรงดันทางด้านเอาท์พุตให้คงที่นั้น ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแรงบิดของมอเตอร์ในช่วงนี้จะไม่ได้ถูกจำกัดโดยกระแสที่มอเตอร์ได้รับ ดังนั้นกระแสที่ขีดจำกัดจะมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสที่พิกัดและจะลดลงตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น

จากเทคนิคการควบคุมด้วยการเปลี่ยนแรงดันและความถี่เป็นวิธีที่สะดวกในแง่ของการปฏิบัติ โดยสามารถเร่งความเร็วจากศูนย์ถึงความเร็วที่ต้องการ โดยให้มีทอร์คสูงสุดได้ และสามารถควบคุมให้มีการทำงานที่เร็วกว่าที่พิกัดหรือต่ำกว่าที่พิกัดได้ นอกจากนี้ในตอนที่ต้องการหยุดการทำงานของอินดักชั่นมอเตอร์อาจจะควบคุมให้สลิปมีค่าเป็นลบซึ่งหมายถึงทำให้อินดักชั่นมอเตอร์ทำงานเป็นอินดักชั่นเจนเนเรเตอร์ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นกำลังงานไฟฟ้าเข้าไปยังอินเวอร์เตอร์เพื่อทำการสลายพลังงานหรือคืนพลังงานกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟได้

2.3 ชนิดของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์

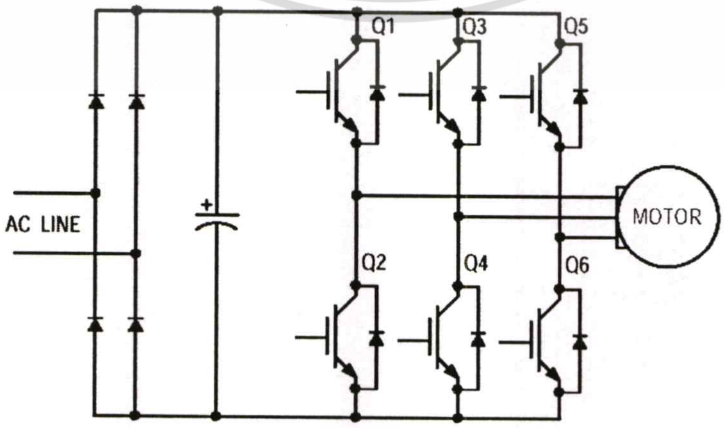
ชนิดของการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามารถจำแนกประเภทได้ 2 ประเภทใหญ่ คือ

- อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI)
- อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส (Current Source Inverter: CSI)

โดยอินเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบนี้จะให้คุณสมบัติและลักษณะของรูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่แตกต่างกันและเหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันออกไปดังที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

2.3.1 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI)

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดันจะประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุฟิลเตอร์ที่มีค่ามากอยู่ระหว่างดีซีลิงค์ซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันทางด้านอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ส่งผลทำให้แรงดันทางด้านเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์คงที่ไม่ขึ้นอยู่กับโหลด ซึ่งข้อดีของการอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดันคือสามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้ง่าย สามารถใช้กับมอเตอร์หลายๆ ตัวที่ทำงานพร้อมกันได้

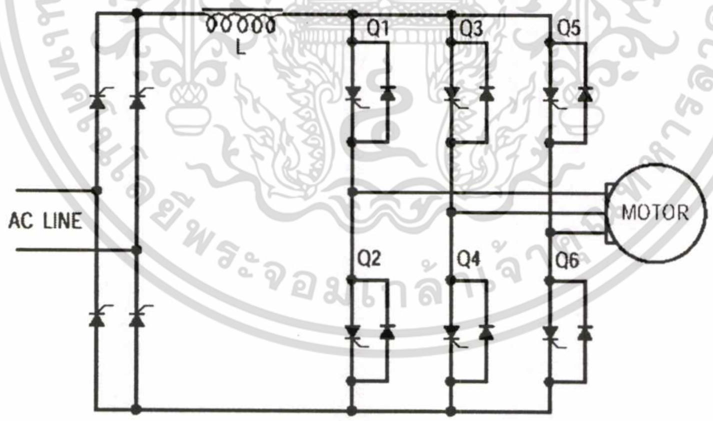


ภาพที่ 2.7 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส (Current Source Inverter : CSI)

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแสจะประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำที่มีค่ามากอยู่ระหว่างดีซีลิงค์ซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งจ่ายกระแสทางด้านอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยในส่วนของวงจรแปลงเป็นไฟตรงจะใช้การควบคุมเฟสของเอซีไลน์โดยใช้ไทรริสเตอร์ในการทำงานหรือบางกรณีอาจใช้ดีซีชอบเปอร์ในการควบคุมการทำงานได้เช่นกันและในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์จะใช้ไทรริสเตอร์ในการควบคุมกระแสที่สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ได้ เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยลักษณะของแรงดันทางด้านเอาท์พุตจะมีรูปคลื่นที่ใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ ส่วนรูปร่างของกระแสที่จ่ายให้กับทางด้านเอาท์พุตจะขึ้นอยู่กับการควบคุม การควบคุมการทำงานอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแสมีข้อดีคือวงจรที่ได้มีกำลังขนาดใหญ่และมีค่าเสถียรภาพสูงและส่วนสำคัญอีกอย่างหนึ่งของการควบคุมแบบจ่ายกระแสคือ สามารถทำงานในโหมดรีเจนเนเรตีฟได้โดยควบคุมการทำงานของสวิตซ์ในการนำกำลังไฟฟ้ากลับเข้าสู่ระบบ ส่วนข้อเสียของการควบคุมแบบจ่ายกระแสคือ ช่วงความถี่ของอินเวอร์เตอร์สามารถปรับได้ค่อนข้างต่ำนอกจากนี้ขนาดของตัวเหนี่ยวนำที่อยู่ในดีซีลิงค์จะมีขนาดใหญ่จึงทำให้อินเวอร์เตอร์ดังกล่าวมีน้ำหนักมากและมีราคาแพง ส่วนเรื่องของการควบคุมนั้น การตอบสนองในการทำงานค่อนข้างช้าและมีปัญหาของความเสถียรภาพที่ภาระโหลดต่ำและสภาวะความเร็วรอบในการใช้งานสูง การควบคุมแบบนี้เหมาะกับมอเตอร์ที่มีพิกัดปานกลางจนถึงขนาดพิกัดกำลังสูง



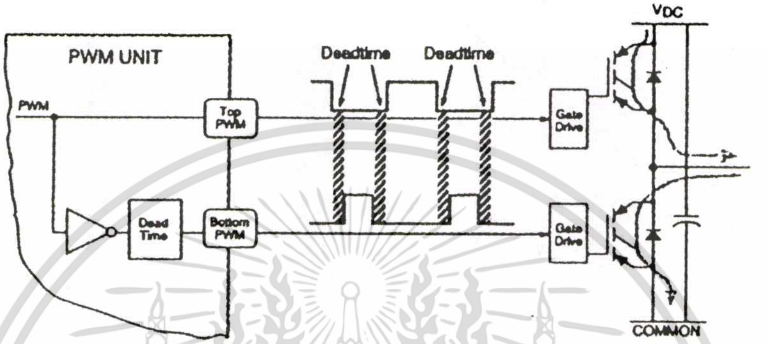
ภาพที่ 2.8 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส

2.4 รูปแบบของการม็อดดูเลท

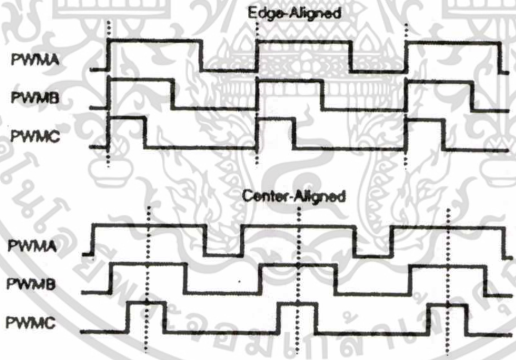
รูปแบบการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ที่อยู่ในรูปของซอฟต์แวร์หรือการเขียนโปรแกรมนั้นจะต้องมีการกำหนดค่า (ขนาด) ของรูปคลื่น (Wave forms) ที่ต้องการสร้าง ความถี่และขนาดของรูปคลื่นที่จะสร้างนั้นจะต้องสามารถควบคุมได้ ซึ่งรูปแบบของการควบคุมความถี่และแรงดันในที่นี้จะนำเสนอเฉพาะเทคนิคการสร้างพัลส์วิดม็อดดูเลชั่น (PWM) ซึ่งเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มีไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสร้างรูปคลื่นแรงดันที่นำมาใช้ในการควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์อย่างแพร่หลาย โดยที่สัญญาณขับนำที่สร้างนี้จะเป็นส่วนหนึ่งในการควบคุมการทำงานของสวิตซ์กำลังที่ใช้ในวงจรกำลัง ซึ่งการทำงานของสวิตซ์ในหนึ่งกิ่งจะมีสวิตซ์ 2 ตัว คือตัวบนและตัวล่าง สวิตซ์ทั้งสองนี้จะต้องทำงานไม่พอกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.9 จะสังเกตได้ว่าการทำงานของสวิตซ์ทั้งสองจะมีการทำงานที่กลับกันอยู่ โดยที่มีช่วงประวิงเวลา (dead time) ซึ่งค่าช่วงประวิงเวลานี้จะทำให้สวิตซ์ทั้งสองตัวไม่สามารถทำงานที่เวลาเดียวกันได้



ภาพที่ 2.9 สัญญาณขับนำสวิตซ์กำลังที่มีช่วงประวิงเวลา (dead time)



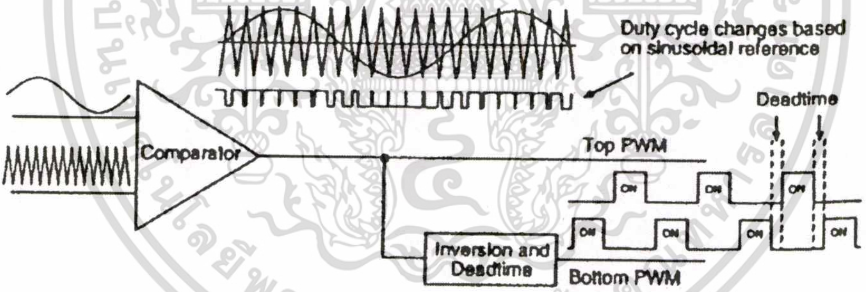
ภาพที่ 2.10 สัญญาณพัลส์พีดับบิวเอ็มแบบขอบขาเดียวและขอบขาคู่ที่ได้จากตัวประมวลผล

ในการเขียนโปรแกรมการควบคุมสัญญาณพัลส์พีดับบิวเอ็มในไมโครคอนโทรลเลอร์ (μc) หรือตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DSP) จำเป็นต้องมีการอัพเดตข้อมูลที่ใช้ในการสร้างรูปคลื่นตลอดเวลา ซึ่งการอัพเดตจะส่งผลทำให้ค่าการม็อดดูเลทและตำแหน่งมีการเปลี่ยนแปลง ผลที่ได้คือ พัลส์พีดับบิวเอ็มจะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งเทคนิคที่นิยมนำมาใช้งานได้แก่ เทคนิค SPWM ซึ่งเป็นเทคนิคพื้นฐานในการสร้างอย่างง่ายและได้มีการพัฒนาไปสู่เทคนิคการม็อดดูเลทแบบอื่นๆ อีกได้แก่ Third Harmonic PWM, 60^0 PWM และ Space Vector เป็นต้น ซึ่งเทคนิคดังกล่าวกำลังได้รับความนิยมอย่างมากในวงการอินเวอร์เตอร์ไดร์ฟเพราะสามารถสร้างแรงดันฟันดาเมนทอลทางด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาท์พุตได้สูงโดยไม่เกิดสภาวะโอเวอร์มือดดูเลท [1] ซึ่งเทคนิคทั้งหมดที่กล่าวถึงในที่นี้ในเรื่องของการเขียนโปรแกรมจะต้องอาศัยการคำนวณที่แตกต่างกันและรูปแบบการทำงานที่แตกต่างกัน เทคนิคการสร้างพัลส์วิดม็อดดูเลชั่นที่พบเห็นบ่อยจะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณควบคุมกับสัญญาณพาหะในการกำเนิดพัลส์พีดับบิวเอ็ม ดังนั้นในการสร้างพัลส์พีดับบิวเอ็มจำเป็นต้องอาศัยคลื่นพาหะ (สัญญาณสามเหลี่ยม) เพื่อกำหนดความถี่สวิตซิ่งที่ใช้งาน ซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยีในจุดนี้ได้มีการพัฒนาให้มีการบรรจุอยู่ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์หรือตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว [2] ซึ่งจะทำหน้าที่สร้างสัญญาณพาหะภายในตัวประมวลผลโดยอาศัยการเปรียบเทียบกับสัญญาณควบคุม เช่น สัญญาณควบคุมแบบคลื่นไซน์ เป็นต้น ซึ่งเทคนิคการสร้างที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้ได้แก่

- เทคนิค Sinusoidal PWM (SPWM)
- เทคนิค Third Harmonic PWM
- เทคนิค 60^0 PWM
- เทคนิค Space Vector PWM
- เทคนิคการควบคุมแบบ 6 สเตป
- เทคนิค Adaptive Current Control



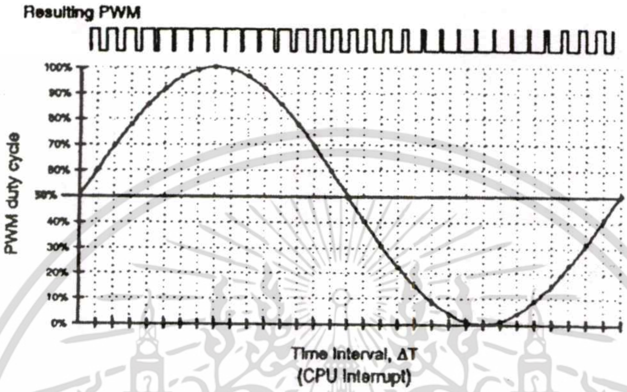
ภาพที่ 2.11 หลักการพื้นฐานของการม็อดดูเลทรูปคลื่นไซน์กับคลื่นพาหะสามเหลี่ยมที่ใช้ในการ - สร้างสัญญาณขับนำสวิตซ์กำลัง

2.4.1 เทคนิค SPWM

พัลส์สัญญาณที่ใช้ในการขับนำสวิตซ์กำลังจะได้มาจากการเปรียบเทียบของคลื่นพาหะสามเหลี่ยมภายในตัวประมวลผลกับสัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบดิจิตอลที่อาจจะเขียนอยู่ในรูปของข้อมูลแบบตาราง (Lookup table) โดยสัญญาณที่ใช้ในการม็อดดูเลทจะมีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐาน เช่นต้องการควบคุมที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ จะต้องสร้างสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 50 เฮิรตซ์ มาทำการม็อดดูเลทกับคลื่นพาหะซึ่งผลของการเปรียบเทียบจะเกิดจุดตัดกันของรูปคลื่นทั้งสอง ซึ่งจุดตัดกันนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมสวิตซ์กำลังของอินเวอร์เตอร์ต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไป ดังแสดงในภาพที่ 2.11 วงจรแอนะล็อกที่ใช้สร้างสัญญาณขับนำแบบ SPWM นี้จะมีกระบวนการออกแบบและทำค่อนข้างง่ายแต่ถ้านำมาประยุกต์สร้างใช้ในเชิงดิจิตอลแล้วการทำงานจะต้องอาศัยจังหวะของสัญญาณอ้างอิงหรือสัญญาณนาฬิกาเป็นเกณฑ์ในการเปลี่ยนแปลงข้อมูลหรือเปลี่ยนแปลงสภาวะลอจิกเป็นต้น เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้นถึงกระบวนการสร้างสัญญาณเชิงดิจิตอลในวิทยานิพนธ์นี้จะขอกล่าวถึงการสร้างสัญญาณขับนำแบบ SPWM ซึ่งสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการสร้างสัญญาณขับนำโดยใช้เทคนิคอื่นๆ ต่อไป

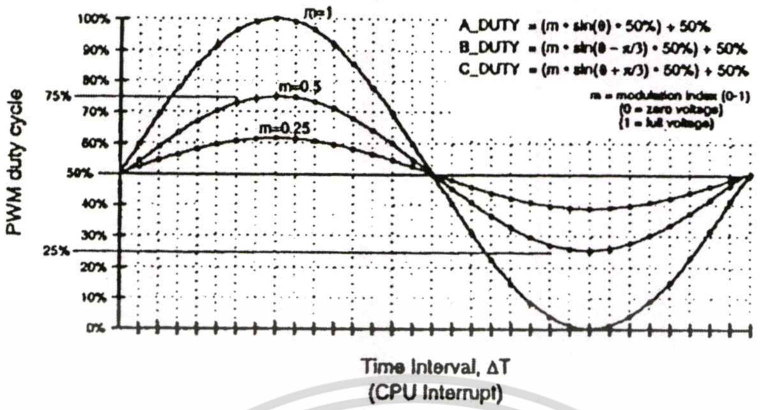


ภาพที่ 2.12 สัญญาณคลื่นไซน์ที่ได้จากการสร้างโดยใช้ตัวประมวลผล

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าการทำงานในรูปแบบเชิงดิจิตอลจะต้องอาศัยจังหวะในการทำงานเพื่อการสุ่มข้อมูลหรืออัพเดตข้อมูล โดยที่คาบการทำงานดังกล่าวจะต้องมีคาบการทำงานที่คงที่ตลอดเวลาการทำงาน ซึ่งจากภาพที่ 2.12 จะแสดงการสร้างรูปคลื่นสัญญาณไซน์โดยจะเห็นได้ว่ามีคาบการสุ่ม (Sampling) เท่ากับ ΔT ตลอดที่ตัวประมวลผลทำงาน ทุกๆ คาบใน ΔT จะมีการอัพเดตข้อมูลค่าไซน์ตลอดเวลา ผลที่ได้ก็คือจะเกิดสัญญาณไซน์ในเชิงดิจิตอลขึ้นได้ ในทางปฏิบัติคาบการสุ่มสามารถใช้ตัวนับเวลา (Timer) ในการจับเวลาเพื่อทำให้เกิดการอินเตอร์รัพต์ขึ้นเพื่อทำการอัพเดตข้อมูลได้ ส่วนการควบคุมขนาดของสัญญาณไซน์อ้างอิงในเชิงดิจิตอลผ่านอุปกรณ์จำพวกไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถทำได้โดยการกำหนดค่าในรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ซึ่งค่าดังกล่าวนี้ส่วนใหญ่จะได้มาจากข้อมูลที่อยู่ในตาราง (Lookup table) เช่น สัญญาณไซน์ต้องการแอมปิจูดสูงสุดขนาด 14 บิต (16,384 ค่า) ในการทำงานจะต้องแบ่งค่าระดับสัญญาณออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งจะได้เท่ากับ 8,192 ค่า โดยที่ค่านี้จะมีค่าเท่ากับค่าศูนย์บนตำแหน่งของรูปคลื่นไซน์ จากนั้นให้เก็บค่าขนาดสัญญาณไซน์ขนาด 1 เปอร์เซ็นต์ไว้ในตาราง หากต้องการปรับเปลี่ยนค่าแอมปิจูดก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มและลดค่าตัวคูณดังกล่าวในรูปคลื่นไซน์ได้ เช่น หากต้องการเพิ่มค่าแอมปิจูดเป็น 25 เปอร์เซ็นต์สามารถทำได้โดยการนำค่า 25 คูณทั้งทางซีกบวกและซีกลบของรูปคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไซน์หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นการปรับค่าการมอดูเลทของสัญญาณเท่ากับ 0.25 เป็นต้น ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 สัญญาณคลื่นไซน์ที่ได้จากการปรับค่าแอมปิจูดโดยใช้ตัวประมวลผล

ส่วนการควบคุมความถี่ของสัญญาณไซน์โดยการเขียนโปรแกรมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถทำได้โดยการกำหนดคาบของการสุ่มหรือจังหวะการสุ่มข้อมูลได้ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการดังต่อไปนี้

$$Output_frequency = \frac{1}{update_time \, . \, number_of_sampling} \qquad (2.34)$$

เมื่อ $Output_frequency$ คือ ค่าความถี่ที่ได้จากการสุ่มหรือ Sampling

$update_time$ คือ ช่วงเวลาการสุ่ม

$number_of_sampling$ คือ จำนวนครั้งของการสุ่ม

ตัวอย่างเช่น หากมีการกำหนดคาบหรือช่วงเวลาการสุ่มเท่ากับ 250 ไมโครวินาที และมีจำนวนครั้งของการสุ่มเท่ากับ 64 ครั้ง นั้นหมายถึง ความถี่ของรูปคลื่นสัญญาณควบคุมที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 62.5 เฮิรตซ์ โดยที่ความถี่นี้จะมีความสัมพันธ์กับขนาดของข้อมูลที่เก็บ หากข้อมูลที่เก็บมีค่ามากนั้นหมายถึงความละเอียดของความถี่ที่ได้ก็จะมีค่าสูงตามไปด้วยดังสมการ (2.35)

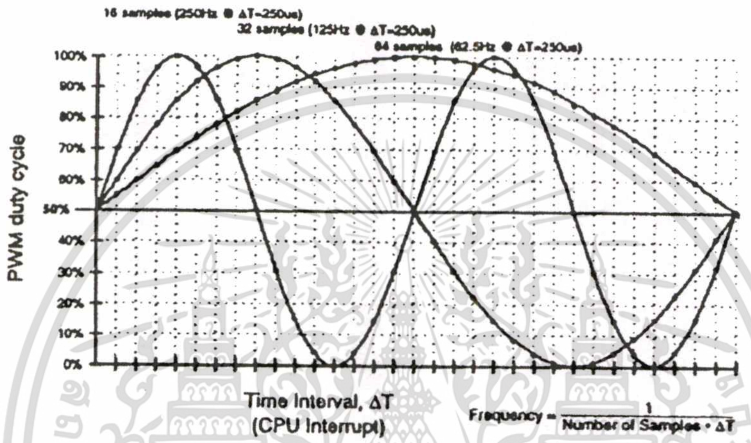
$$Output_frequency = \frac{inctement_value}{update_time \, . \, table_size} \qquad (2.35)$$

เมื่อ $table_size$ คือ ขนาดของข้อมูลที่ใช้ในการเก็บ

$inctement_value$ คือ ค่าจำนวนนับข้ามในการสุ่ม

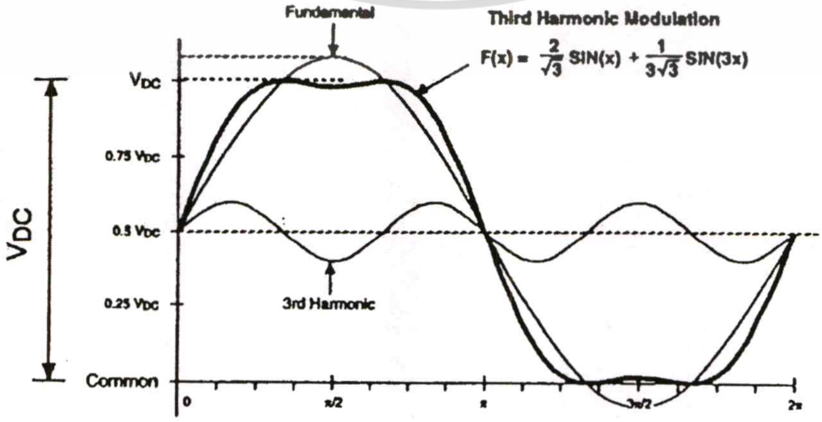
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ... เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างเช่น หากมีการกำหนดขนาดของข้อมูลที่ใช้ในการเก็บเท่ากับ 5,000 ค่า และมีค่าจำนวนนับข้ามในการสุ่มเท่ากับ 2 โดยที่ช่วงเวลาการสุ่มเท่ากับ 200 ไมโครวินาที จะทำให้ได้ความถี่ของสัญญาณที่ได้มีค่าเท่ากับ 2 เฮิรตซ์ และหากมีการกำหนดค่าจำนวนนับข้ามในการสุ่มเท่ากับ 40 จะทำให้ได้ความถี่เท่ากับ 40 เฮิรตซ์ และถ้าหากมีการเพิ่มขนาดของข้อมูลที่ใช้ในการเก็บเป็น 10,000 ค่า โดยที่กำหนดค่าจำนวนนับข้ามในการสุ่มเท่ากับ 2 จะทำให้ได้ความถี่เท่ากับ 1 เฮิรตซ์ เป็นต้น จะสังเกตได้ว่าหากขนาดของข้อมูลที่ใช้ในการเก็บมากเท่าไรก็หมายถึงความละเอียดที่ได้มีค่ามากเท่านั้น



ภาพที่ 2.14 รูปคลื่นไซน์ที่ได้จากการกำหนดค่าจำนวนนับข้ามในการสุ่ม

จากเทคนิคการสร้างสัญญาณขับนำแบบ SPWM ที่กล่าวถึงจะเป็นพื้นฐานในการสร้างเทคนิคการควบคุมแบบต่างๆ ได้อีก เพียงแต่อาศัยการปรับเปลี่ยนรูปแบบของสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมเท่านั้นเอง



ภาพที่ 2.15 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการควบคุมโดยใช้เทคนิค Third Harmonic PWM

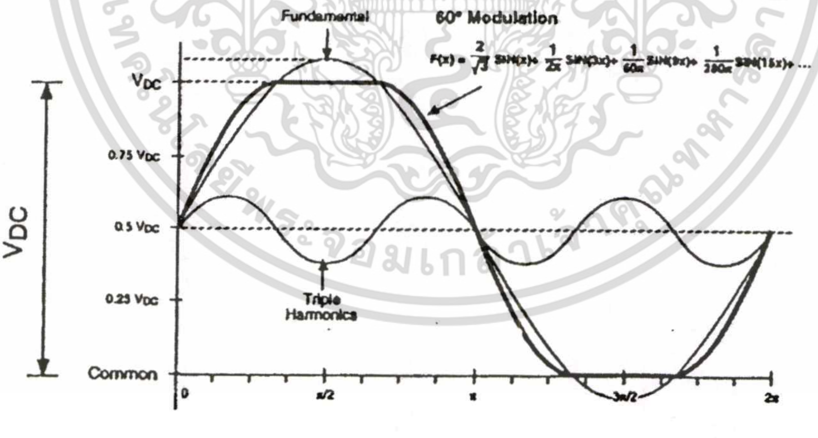
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 เทคนิค Third Harmonic PWM

เนื่องจากเทคนิคแบบ SPWM สามารถให้ค่าแรงดันองค์ประกอบมูลฐานไลน์-ไลน์ทางด้านเอาท์พุตได้เพียง 0.866 เท่าของแรงดันทางด้านดีซี ซึ่งเป็นข้อเสียของการควบคุมแบบ SPWM ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวนี้จึงได้มีเทคนิคการเพิ่มค่าของฮาร์โมนิกส์ที่ 3 เข้าไปร่วมกับค่าขององค์ประกอบมูลฐานเพื่อขยายย่านเชิงเส้นของการมีอดดูเลทให้มีค่าสูงขึ้น [1] ส่งผลทำให้ค่าแรงดันองค์ประกอบมูลฐานทางด้านเอาท์พุตมีค่าสูงขึ้นโดยไม่เกิดการโอเวอร์มีอดดูเลทดังแสดงในภาพที่ 2.15 ซึ่งการทำงานในรูปแบบเชิงดิจิตอลของเทคนิคนี้จะทำเหมือนกับแบบ SPWM คืออาศัยการเปรียบเทียบของรูปคลื่นอ้างอิงกับคลื่นพาหะในการสร้างสัญญาณขับนำสวิตซ์กำลัง หากจะแตกต่างกันในเรื่องของสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมเท่านั้นเอง

2.4.3 เทคนิค 60^0 PWM

เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ใช้แก้เสียของเทคนิค SPWM เนื่องจากเทคนิคแบบ SPWM ความถี่ที่ใช้ในการสวิตซ์จะมีค่าสูง ทำให้แรงดันองค์ประกอบมูลฐานทางด้านเอาท์พุตมีค่าต่ำ โดยเทคนิคนี้จะเป็นการเพิ่มแรงดันองค์ประกอบมูลฐานทางด้านเอาท์พุตให้มีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกับเทคนิค Third Harmonic PWM แต่ข้อดีที่เห็นได้ชัดคือ เทคนิคนี้จะช่วยลดความสูญเสียที่เกิดจากสวิตชิ่ง (Switching Loss) เนื่องจากการทำงานของสวิตซ์จะมีการทำงาน (เปิด-ปิด) น้อยกว่าเทคนิคที่กล่าวมาแล้ว [3]



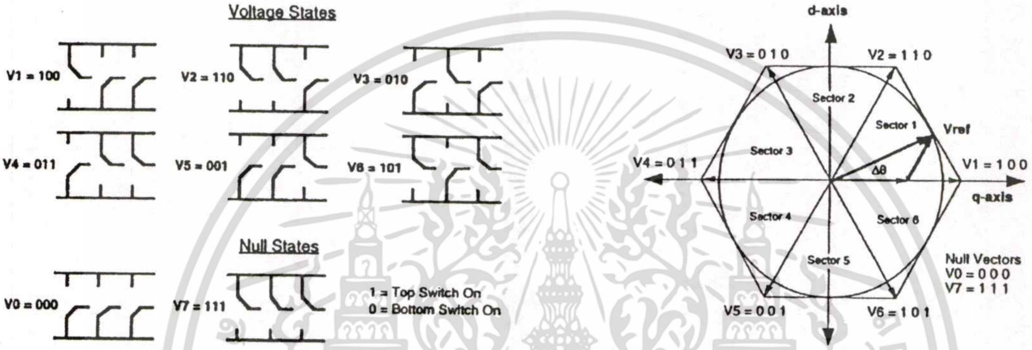
ภาพที่ 2.16 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการควบคุมโดยใช้เทคนิค 60^0 PWM

2.4.4 เทคนิค Space Vector PWM

เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน โดยเทคนิคนี้จะแบ่งการทำงานของสวิตซ์กำลังออกเป็น 8 จังหวะ 6 เซกเตอร์ ดังภาพที่ 2.17 โดยที่สถานะของสวิตซ์จะแทนด้วยเวกเตอร์แรงดัน เช่น V1 – V6 ซึ่งเทคนิคนี้อาจกล่าวได้ว่าเป็นการนำรูปคลื่น

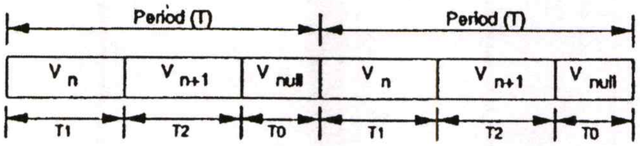
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามเหลี่ยมที่มีค่าแอมปิจูดเท่ากับ 0.25 เท่าของรูปคลื่นไซน์ประกอบกับมีค่าความถี่เป็น 3 เท่าของรูปคลื่นไซน์เข้าไปรวมกับรูปคลื่นไซน์ซึ่งผลของแรงดันที่ได้จะแสดงอยู่ในภาพที่ 2.18 โดยมีคาบการทำงานของสวิตซ์ดังภาพที่ 2.19 และเทคนิคนี้ก็ยังเป็นเทคนิคที่ช่วยทำให้แรงดันองค์ประกอบมูลฐานทางด้านเอาท์พุตมีค่าสูงขึ้นเหมือนกับเทคนิค Third Harmonic PWM อีกทั้งยังช่วยในเรื่องของการลดค่าความสูญเสียที่เกิดจากการสวิตชิ่งได้ด้วย [1,3] และเนื่องจากเทคนิคการควบคุมแบบสเปซเวกเตอร์สามารถสร้างหรือเขียนโปรแกรมการทำงานของสวิตซ์ได้จากสมการ (2.36) จึงทำให้การควบคุมคาบการทำงานของสวิตซ์ค่อนข้างแน่นอน จึงได้รับความนิยมและถูกนำไปใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของสวิตซ์กำลัง ซึ่งรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถหาได้ใน [3]



ภาพที่ 2.17 จังหวะการทำงานของสวิตซ์และทิศทางเวกเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของสวิตซ์

ภาพที่ 2.18 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการควบคุมโดยใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์



$$Vref = V_n \cdot T1 + V_{n+1} \cdot T2 + V_{null} \cdot T0$$

ภาพที่ 2.19 คาบการทำงานของสวิตซ์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_1 = T \cdot m \cdot \sin(60 - \Delta\theta)$$
$$T_1 = T \cdot m \cdot \sin(\Delta\theta) \qquad (2.36)$$
$$T_0 = T - T_1 - T_2$$

เมื่อ T คือ คาบเวลาที่สวิตซ์ทำงาน

m คือ ค่าการม็อดดูเลทชั่นอินเด็ก

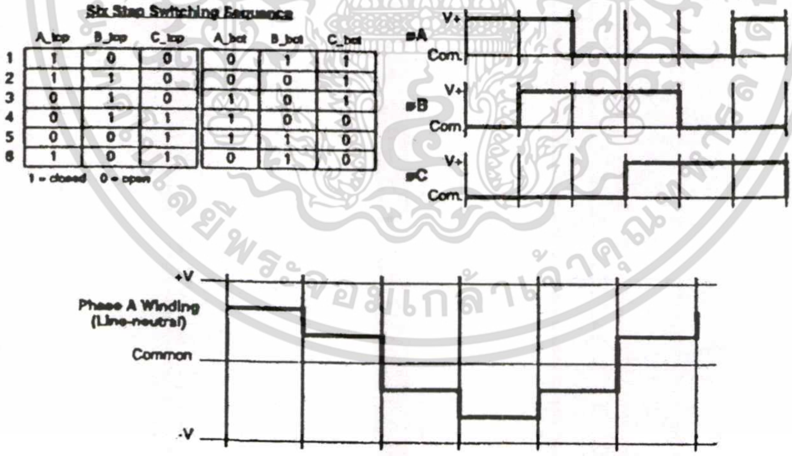
$\Delta\theta$ คือ ค่ามุมระหว่างเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงกับเวกเตอร์แรงดัน ($V_1 - V_6$)

V_N คือ เวกเตอร์แรงดันใดๆ (เมื่อ N เท่ากับ 1 ถึง 6)

V_{null} คือ เวกเตอร์แรงดันศูนย์

2.4.5 เทคนิคการควบคุมแบบ 6 สเตป

ในการควบคุมการทำงานแบบ 6 สเตป จะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่เกิดการโอเวอร์ม็อดดูเลท ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถควบคุมขนาดของแรงดันทางด้านเอาท์พุตให้เป็นไปตามต้องการได้ โดยที่รูปคลื่นของแรงดันไลน์เอาท์พุตที่ได้จะมีรูปร่างเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมหรือกึ่งสแควร์ ส่วนแรงดันเฟสจะมีรูปร่างรูปคลื่นเป็น 6 สเตป สังเกตได้ในภาพที่ 2.20 โดยทั่วไปแล้วมักจะไม่นำย่านนี้ไปใช้งาน เนื่องจากจะมีผลของฮาร์โมนิกส์อันดับต่ำเข้ามาร่วม [1]



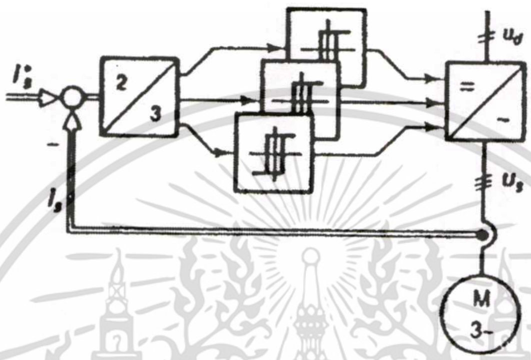
ภาพที่ 2.20 แพรเทินร์การทำงานของสวิตซ์และแรงดันเฟส, ไลน์ทางด้านเอาท์พุตจากการควบคุมแบบ 6 สเตป

2.4.6 เทคนิค Adaptive Current Control

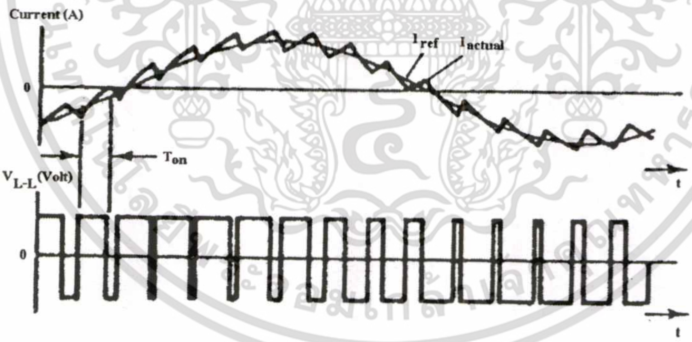
ในการวิเคราะห์ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันเอาท์พุตของแหล่งจ่ายแบบแรงดันโดยส่วนใหญ่จะเป็นการสมมติให้แรงดันทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าในอุดมคติซึ่งจะมีค่าคงที่โดยไม่เกิดริปเปิ้ล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในทางปฏิบัติค่าของริปเปิ้ล อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากค่าของคาปาซิเตอร์ฟิลเตอร์มีค่าไม่มากพอ ดังนั้นเทคนิคที่สามารถควบคุมกระแสโดยใช้ขอบเขตของฮีสเตอร์รีซีสหรือมีการปรับตัวเองโดยอัตโนมัติก็จะแก้ปัญหาของการเกิดริปเปิ้ล ในส่วนของดีซีลิงค์ได้ ซึ่งเทคนิคนี้จะใช้การควบคุมกระแส ดังแสดงวงจรควบคุมการทำงานในภาพที่ 2.21 และในภาพที่ 2.22 แสดงสัญญาณกระแสไซน์อ้างอิงซึ่งมีขนาดและความถี่ตามต้องการแล้วนำมาเปรียบเทียบกับกระแสเฟสจริงที่ได้จากการตรวจวัดโดยหม้อแปลงกระแส (CT), Hall Sensor หรือ LEM เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตซ์กำลังต่อไป



ภาพที่ 2.21 บล๊อกแสดงการควบคุมการทำงาน โดยเทคนิค Adaptive Current Control PWM



ภาพที่ 2.22 รูปคลื่นกระแสและแรงดันโดยใช้เทคนิค Adaptive Current Control PWM

จากภาพที่ 2.22 เมื่อกระแสมีค่าเกินค่าขอบเขตของฮีสเตอร์รีซีสที่กำหนดไว้ สวิตซ์ตัวบนในกิ่งของวงจรบริจด์อินเวอร์เตอร์จะทำการหยุดนำกระแส ในขณะที่สวิตซ์ตัวล่างในกิ่งของวงจรบริจด์อินเวอร์เตอร์จะนำกระแสแทนเป็นผลทำให้แรงดันทางด้านเอาท์พุตที่จะนำไปใช้ในการควบคุมสวิตซ์เปลี่ยนจากบวกไปเป็นลบ และเมื่อกระแสเริ่มลดลงจนกระทั่งกระแสลดลงมาถึงขอบเขตของฮีสเตอร์รีซีสทางด้านล่างก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนการทำงานของสวิตซ์อีกครั้งหนึ่งและจะเป็นเช่นนี้ไปตลอดการควบคุมการทำงาน รูปคลื่นของกระแสจริงจะถูกบังคับให้ติดตามสัญญาณไซน์อ้างอิงโดยให้อยู่ในขอบเขตฮีสเตอร์รีซีสที่ต้องการโดยการสลับสวิตซ์การทำงานไปมา ดังนั้นกระแสริป

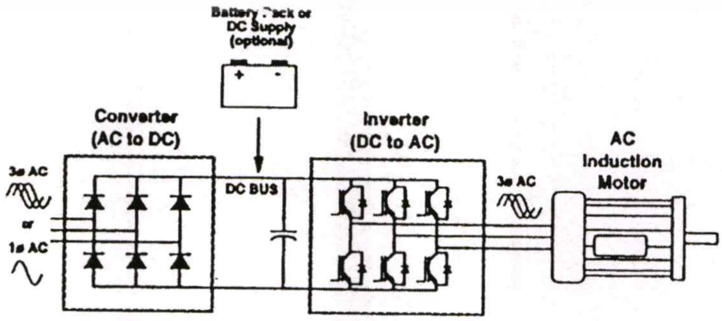
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปิ้ลจึงถูกควบคุมให้ปรับตัวอยู่ในขอบเขตของฮีสเตอร์รีซีสตามค่าของแรงดันที่มีการกระเพื่อม จึงทำให้ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสริปเปิ้ล และค่าพีค-ทู-พีคของกระแสริปเปิ้ล มีความสัมพันธ์กัน อันจะเป็นการทำให้ลดอุณหภูมิของมอเตอร์ขณะใช้งานลงอีกด้วย [4] นอกจากนี้เทคนิค Adaptive Current Control ที่ใช้หลักการของฮีสเตอร์รีซีสแบนด์แล้ว ยังมีเทคนิคแบบฟิกแบนด์ (Fixed Band) และเทคนิคแบบไซนูซอยดัลแบนด์ (Sinusoidal Band) ซึ่งแต่ละแบบจะขึ้นอยู่กับการใช้งานที่ต้องการความแตกต่างกันออกไป [5]

2.5 รูปแบบของการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การควบคุมการทำงานของมอเตอร์โดยพื้นฐานสามารถทำได้โดยการปรับค่าความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์หรือปรับขนาดของแรงดันหรือกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งการทำงานสามารถทำได้โดยการใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์ - อินเวอร์เตอร์ในการสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.23 วงจรคอนเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่ในการแปลงไฟจากไฟฟ้ากระแสสลับมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นวงจรอินเวอร์เตอร์ก็จะทำการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยสามารถปรับเปลี่ยนความถี่และขนาดของแอมปิจูดที่ป้อนให้กับมอเตอร์ได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขนาดและความถี่ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์จะมีวิธีการควบคุมการทำงานด้วยกันอยู่หลายรูปแบบ ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงรูปแบบที่นิยมใช้ในวงการอุตสาหกรรมไดร์ฟ ซึ่งได้แก่

- การควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่ แบบวงรอบเปิด (Open Loop V/F)
- การควบคุมแรงดันต่อความถี่ ชนิดตรวจจับกระแส (V/F with DC current sensing)
- การควบคุมแรงดันต่อความถี่ ชนิดตรวจจับความเร็ว (Scalar Control)
- การควบคุมแบบสลิปออฟติไมต์เซชั่น (Slip Optimization)
- การควบคุมความถี่สลิป (Slip frequency control)
- การควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control)
- การควบคุมแบบไร้ตัวตรวจจับความเร็ว (Sensorless Vector Control)

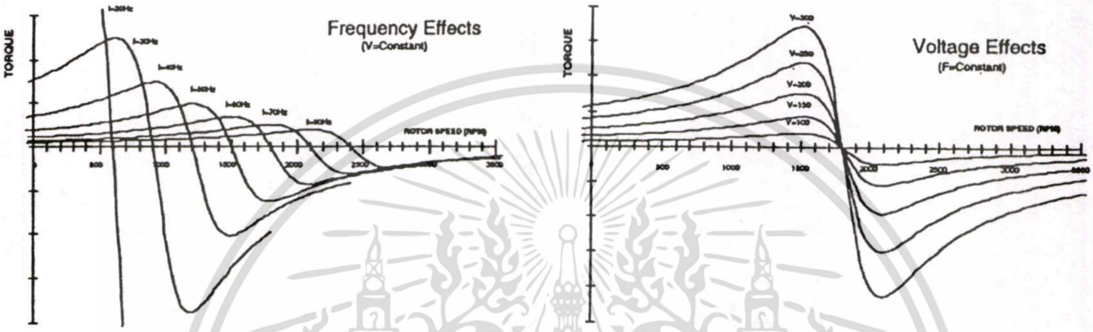


ภาพที่ 2.23 วงจรคอนเวอร์เตอร์ - อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

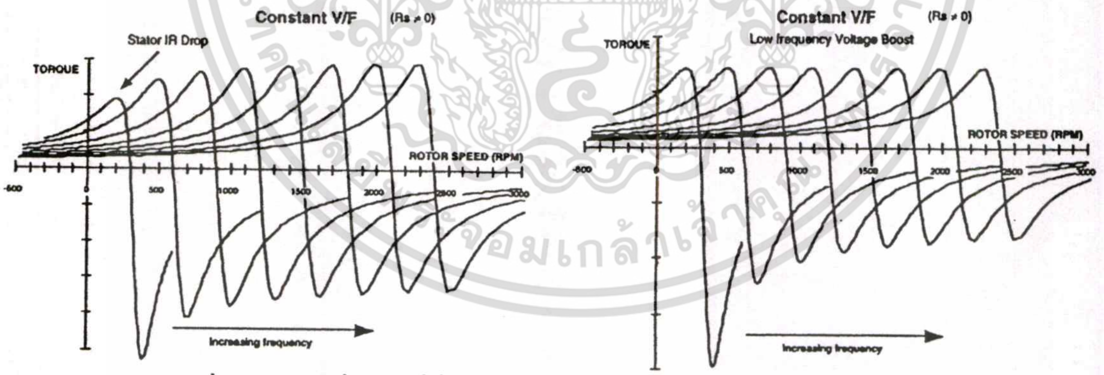
2.5.1 การควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่

ก่อนที่จะกล่าวถึงวิธีการควบคุมการทำงานแบบแรงดันต่อความถี่ เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้น จะขอกล่าวถึงหลักการการควบคุมแรงบิดให้มีค่าคงที่ตลอดย่านการควบคุมอีกครั้งโดยละสมการต่างๆ ดังที่เคยได้กล่าวมาแล้วในข้อหัวที่ผ่านมา ในเรื่องของการควบคุมแรงบิดให้มีค่าคงที่ตลอดย่านการควบคุม หากการควบคุมที่ได้มานั้นมีการปรับเปลี่ยนเฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่งจะทำให้ค่าของแรงบิดที่ได้มีขนาดไม่คงที่ โดยในที่นี้จะสมมติให้มีมอเตอร์มีค่าความเร็วพิกัดเท่ากับ 1800 รอบต่อนาที และมีค่าความถี่พิกัดเท่ากับ 60 เฮิรตซ์



(ก) แรงดันคงที่อาศัยการปรับความถี่ (ข) ความถี่คงที่อาศัยการปรับแรงดัน

ภาพที่ 2.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิด



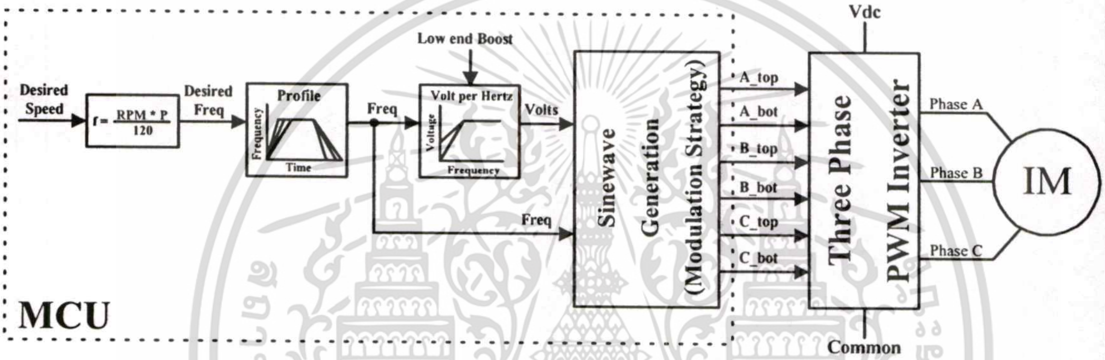
(ก) แรงบิดที่มีค่าลดลงที่ความถี่ต่ำ (ข) ชดเชยโดยการเพิ่มแรงดันบูต

ภาพที่ 2.25 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดกรณีคำนึงถึงผลของค่าความต้านทานทางด้านสเตเตอร์

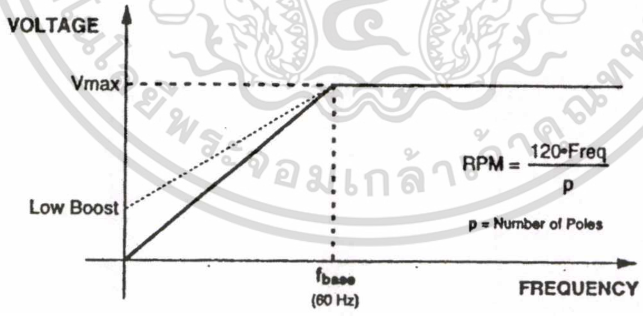
จากภาพที่ 2.24 (ก) จะเห็นได้ว่าหากมีการกำหนดให้ค่าของแรงดันมีค่าคงที่แล้วอาศัยการปรับความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์แล้วค่าของแรงบิดที่ได้จะมีค่าลดลงเป็นสัดส่วนกับค่าความถี่ ส่วนในภาพที่ 2.24 (ข) แสดงถึงการปรับเปลี่ยนแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์โดยคงที่ค่าความถี่ จะสังเกตได้ว่าค่าของแรงบิดที่ได้จะมีค่าเป็นสัดส่วนกับค่าของแรงดัน การควบคุมมอเตอร์ในทางอุมคติแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันต่อความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์เพื่อสร้างแรงบิดที่มีค่าที่พิกัดนั้นจะต้องมีค่าเป็นสัดส่วนกัน แต่ในความเป็นจริงโครงสร้างของมอเตอร์จะประกอบไปด้วยขดลวดทางด้านสเตเตอร์ซึ่งมีค่าความต้านทานจำนวนหนึ่ง หากต้องการควบคุมให้มีการทำงานที่ความถี่ต่ำจะทำให้ค่าของแรงบิดที่ได้มีการลดลงไปเนื่องมาจากค่าของแรงดันตกคร่อมค่าความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์ ดังนั้นในการทำงานจริงจะต้องมีการเพิ่มแรงดันบูตในช่วงความถี่ต่ำเพื่อช่วยชดเชยในส่วนของค่าแรงดันตกคร่อมค่าความต้านทานสเตเตอร์ของมอเตอร์ ดังภาพที่ 2.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดกรณีคำนึงถึงผลของค่าความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ ในภาพที่ 2.25 (ก) แสดงค่าแรงบิดที่มีค่าลดลงในกรณีที่มีการทำงานที่ความถี่ต่ำและภาพที่ 2.25 (ข) แสดงค่าแรงบิดที่มีการชดเชยโดยการเพิ่มแรงดันบูตในช่วงความถี่ต่ำ



ภาพที่ 2.26 บล๊อกการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่



ภาพที่ 2.27 กราฟแสดงบล๊อกความสัมพันธ์แรงดันต่อความถี่ที่ใช้ในการควบคุม

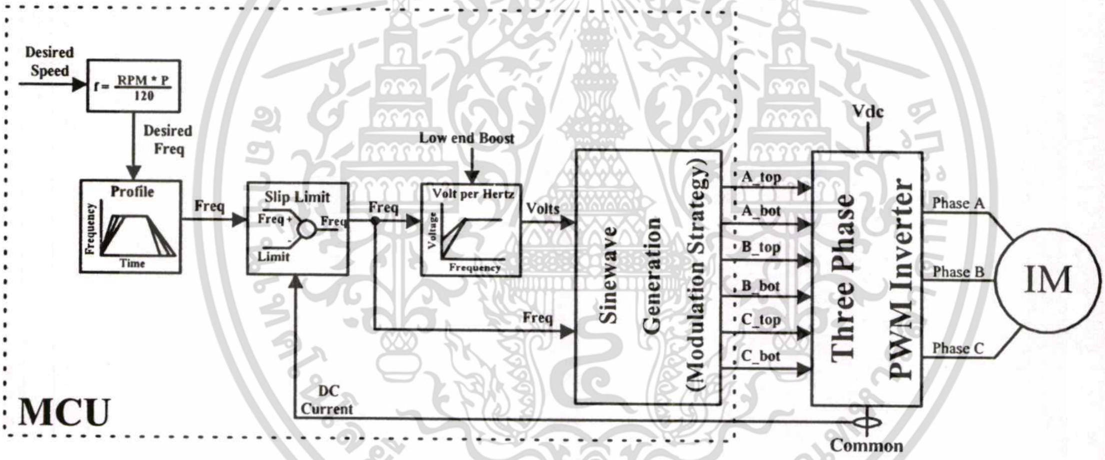
จากความสัมพันธ์ของแรงดันต่อความถี่ในข้างต้น การควบคุมการทำงานสามารถแสดงบล๊อกการทำงานได้ในภาพที่ 2.26 ขั้นตอนการทำงานจะอาศัยโปรไฟล์ (Profile) และบล๊อกความสัมพันธ์ของแรงดันต่อความถี่ในการควบคุมการทำงาน โดยที่โปรไฟล์นี้เป็นชุดข้อมูลที่ใช้เก็บค่าการเปลี่ยนแปลงค่าคำสั่งความถี่ที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ในสภาวะที่มีการเร่งความเร็วรอบและลดความเร็วรอบสั่งการอย่างรวดเร็ว ซึ่งโปรไฟล์นี้จะทำหน้าที่เสมือนหน่วงเวลาของความถี่ที่ได้รับจากอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(แป้นคำสั่ง) แล้วค่อยๆ เพิ่ม/ลดความถี่ที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์เพื่อป้องกันค่ากระแสไม่ให้มีค่าเกินพิกัดของมอเตอร์ ส่วนบล๊อกความสัมพันธ์ของแรงดันต่อความถี่จะมีหน้าที่ในการปรับค่าของการม็อดดูเลทให้มีค่าเหมาะสมกับค่าความถี่ที่เลือกในการใช้งานนั้นๆ โดยเฉพาะค่าของแรงดันบูตในช่วงที่มีการใช้งานที่ความถี่ต่ำ ดังในภาพที่ 2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์แรงดันต่อความถี่ หลังจากการเลือกค่าของการม็อดดูเลทแล้วจะได้ขนาดสัญญาณที่มีค่าเป็นสัดส่วนกับค่าความถี่สั่งการจากแป้นคำสั่ง โดยสัญญาณที่ได้นี้จะนำไปเปรียบเทียบกับคลื่นพาหะเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตซ์กำลังที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ต่อไป

2.5.2 การควบคุมแรงดันต่อความถี่ ชนิดตรวจจับกระแส

การทำงานจะเหมือนกับการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่ แต่จะมีการตรวจจับกระแสที่ดีซีบัสเพื่อมาเช็คการเพิ่มขึ้น/ลดลงของความถี่ในกรณีที่มีการเร่ง/ลดความเร็วมอเตอร์อย่างรวดเร็วดังภาพที่ 2.28 อีกทั้งยังช่วยในการดู (Monitor) และลิมิตค่าความถี่ที่เกิดขึ้นอีกด้วย

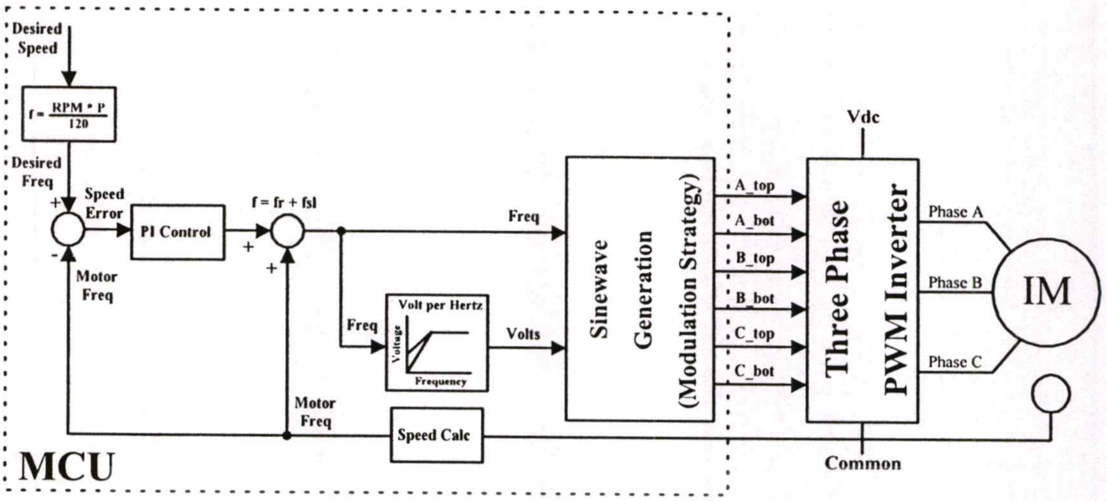


ภาพที่ 2.28 บล๊อกการควบคุมแรงดันต่อความถี่ชนิดตรวจจับกระแส

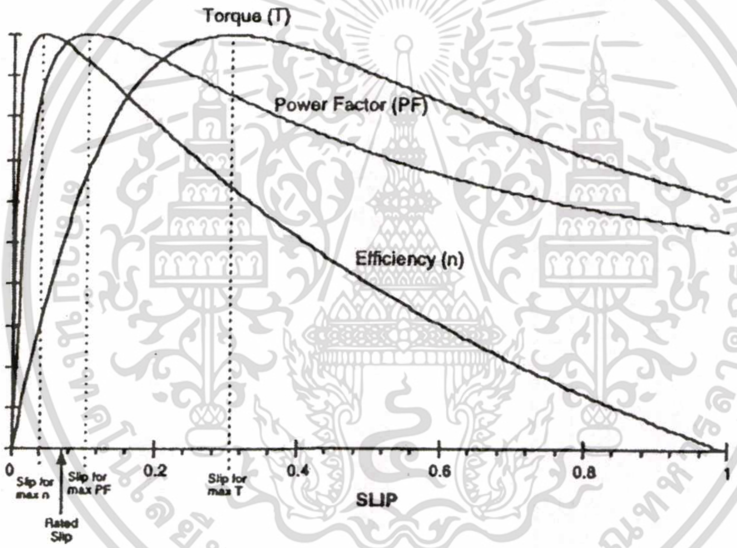
2.5.3 การควบคุมแรงดันต่อความถี่ ชนิดตรวจจับความเร็ว (Scalar Control)

การควบคุมแบบนี้จะมีการทำงานที่เหมือนกับการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่ แต่จะมีอุปกรณ์ตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์ (Encoder) ซึ่งติดตั้งที่มอเตอร์ในการตรวจสอบค่าความเร็วรอบและส่งไปยังตัวประมวลผลเพื่อทำการชดเชยค่าความเร็วรอบนั้นโดยการชดเชยค่าความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์เพื่อทำให้ค่าความเร็วรอบมีค่าเท่ากับค่าความเร็วรอบคำสั่ง ซึ่งวิธีการควบคุมแบบอาศัยอุปกรณ์ตรวจจับความเร็วรอบในการชดเชยค่าความถี่สั่งการนี้ ในวงการอุตสาหกรรมไดร์ฟจะเรียกว่า การควบคุมแบบสเกลาร์ (Scalar Control) ดังแสดงบล๊อกการควบคุมไว้ในภาพที่ 2.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.29 บล๊อกการควบคุมแรงดันต่อความถี่ ชนิดตรวจจับความเร็ว (Scalar Control)



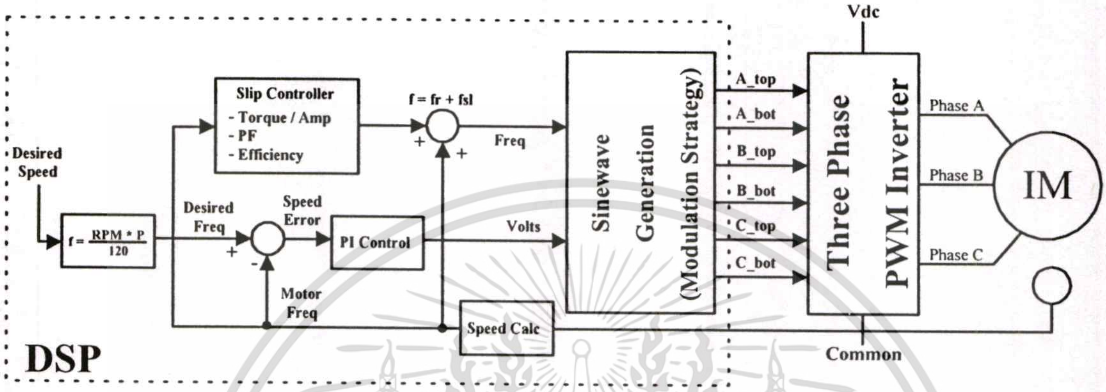
ภาพที่ 2.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิด, ประสิทธิภาพและ PF เทียบกับค่าสลิป

2.5.4 การควบคุมแบบสลิปออฟติไมต์เซชั่น (Slip Optimization)

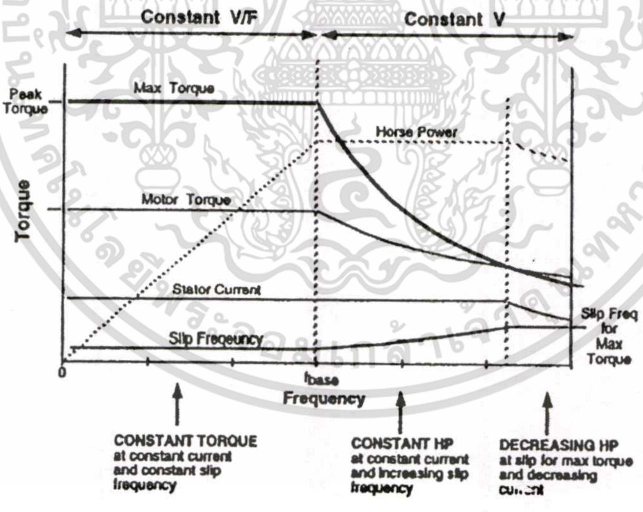
ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์โดยการลิมิตค่าสลิปด้วยการตรวจจับค่ากระแสที่ดีซีบัสมีความสำคัญอย่างยิ่งในการขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อป้องกันการสตอล (Stall) หรือป้องกันค่ากระแสสูง แต่การควบคุมที่ดีนั้นสามารถทำได้โดยการควบคุมค่าความถี่สลิปโดยตรง จากภาพที่ 2.30 จะเป็นการแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและสลิป ภายในกราฟจะแสดงถึงตำแหน่งค่าสลิปที่แรงบิดสูงสุด (Break down point) อีกทั้งยังแสดงถึงตำแหน่งค่าสลิปที่ทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงสุดและตำแหน่งค่าสลิปที่ทำให้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์มีค่าสูงสุด แต่โดยทั่วไปเราจะควบคุมการทำงานของมอเตอร์ให้อยู่ระหว่างเส้นประสิทธิภาพสูงสุดและเส้นเพาเวอร์แฟคเตอร์สูงสุดเพื่อควบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุมให้มอเตอร์ทำงานที่แรงบิดที่พิกัด ซึ่งการควบคุมความถี่สลิปโดยทั่วไปจะอาศัยตัวตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์ (Encoder) ในการวัดค่าความเร็วของโรเตอร์ และนำส่วนต่างค่าความเร็วที่วัดได้นี้ไปผ่านกระบวนการพีไอเพื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่ใช้ในการควบคุมประกอบกับนำค่าความเร็วที่วัดได้นี้เป็นตัวชี้วัดค่าความถี่สลิปชดเชยเพื่อนำค่าที่ได้นี้ไปร่วมกับค่าความถี่ที่วัดเพื่อใช้ในการกำหนดค่าความถี่ที่ให้กับชุดอินเวอร์เตอร์ต่อไป ดังแสดงบล๊อกการควบคุมไว้ในภาพที่ 2.31



ภาพที่ 2.31 บล๊อกการควบคุมแบบสลิปออฟติไมต์เซชั่น (Slip Optimization)



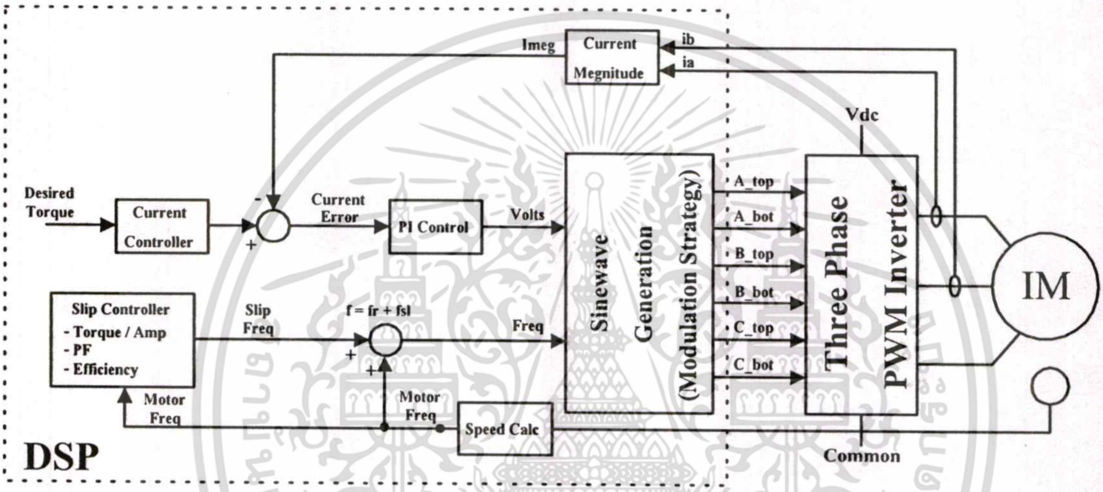
ภาพที่ 2.32 กราฟคุณสมบัติการควบคุมมอเตอร์

2.5.5 การควบคุมความถี่สลิป (Slip frequency control)

จากรูปแบบการควบคุมที่ผ่านมาทั้งหมดพยายามควบคุมการทำงานของมอเตอร์ให้เป็นไปตามกราฟคุณสมบัติการควบคุมมอเตอร์ดังภาพที่ 2.32 ในย่านที่ความเร็วมีค่าต่ำกว่าความเร็วพิกัดซึ่งเป็นย่านการควบคุมแบบแรงบิดคงที่ โดยที่ค่าของแรงบิดนี้จะอาศัยความสัมพันธ์ของกระแสและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่สลิปในการควบคุมค่าของแรงดัน โดยการควบคุมค่าของการม็อดดูเลท ดังภาพที่ 2.33 แสดงถึงบล๊อกการทำงานดังกล่าว ส่วนในย่านที่ความเร็วมีการทำงานสูงกว่าความเร็วที่พิกัด ค่าของความถี่สลิปจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าแรงบิดที่ได้มีค่าลดลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเลยย่านแรงดันคงที่ไปจะทำให้ค่าแรงบิดที่ได้มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว จากพฤติกรรมดังกล่าวค่าของแรงบิดจะถูกควบคุมโดยค่าความถี่สลิปและค่ากระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ในภาพที่ 2.33 ค่าของความถี่จะถูกชดเชยด้วยค่าของความถี่สลิปและค่าของแรงดันควบคุมที่ผ่านกระบวนการพีไอจะได้มาจากการตรวจจับค่ากระแสจำนวน 2 เฟส ซึ่งการควบคุมแบบนี้จะเป็นการควบคุมค่าความถี่สลิปโดยการปรับเปลี่ยนค่ากระแสที่ใช้ในการสร้างแรงบิดเพื่อให้เป็นไปตามความสัมพันธ์ของกราฟดังภาพที่ 2.32



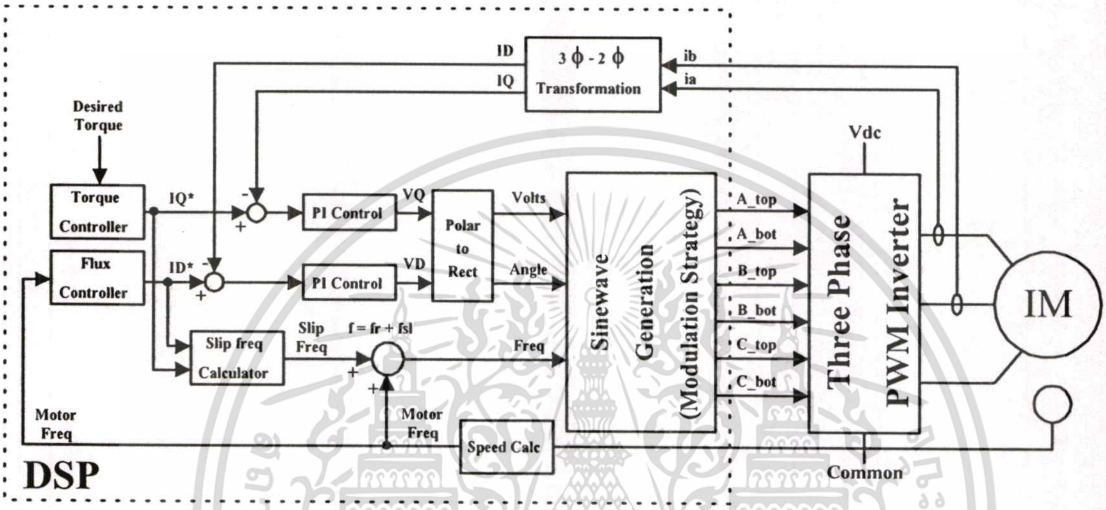
ภาพที่ 2.33 บล๊อกการควบคุมความถี่สลิป (Slip frequency control)

2.5.6 การควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control)

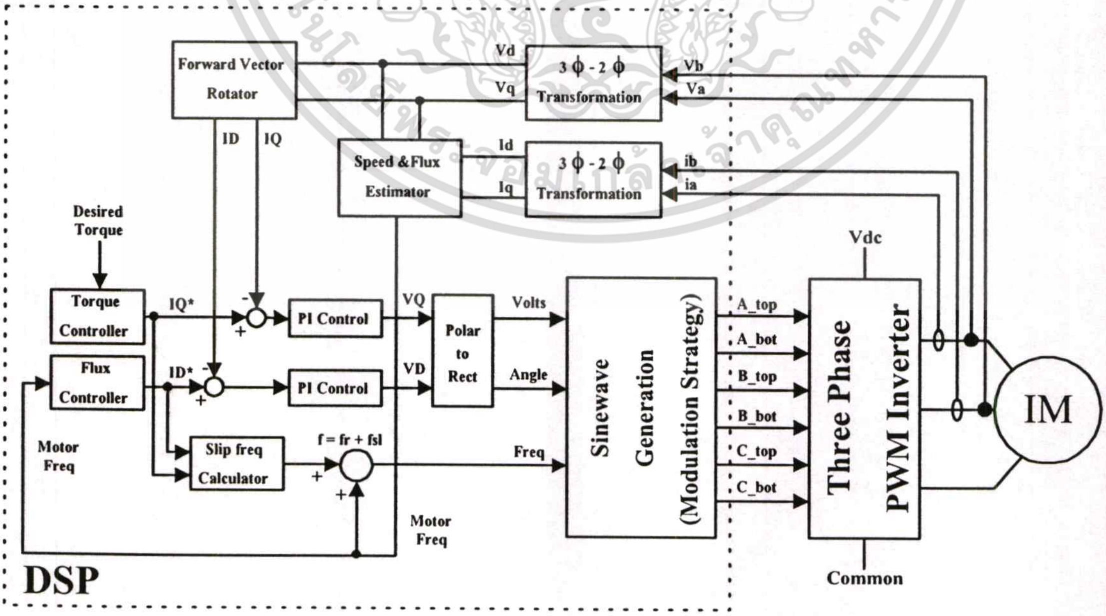
การควบคุมแบบเวกเตอร์เป็นการควบคุมที่เสนอมุมมองใหม่ของปริมาณไฟฟ้า 2 เฟส ไปเป็นเวกเตอร์ในระบบ 2 แกน ซึ่งมีพฤติกรรมทำเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก คือมีปริมาณไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดสนาม (Field winding) เพื่อใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กและมีปริมาณไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดอาเมเจอร์ที่ใช้ในการสร้างแรงบิด ซึ่งรูปแบบการควบคุมการทำงานจะต้องมีการแปลงแกนจาก 3 แกน (a,b,c) ไปเป็นเวกเตอร์แบบ 2 แกน (d,q) โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์ในการแปลงแกน โดยที่เวกเตอร์กระแสในแกน d จะมีทิศทางขนานกับสนามแม่เหล็ก ในขณะที่เวกเตอร์กระแสในแกน q จะมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กตลอดเวลา ซึ่งหัวใจของการควบคุมคือการควบคุมสนามแม่เหล็กให้คงที่ในระดับพอเหมาะเพื่อไม่เกิดปัญหาเรื่องการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก รวมทั้งสามารถลดปริมาณสนามแม่เหล็กเพื่อเร่งความเร็วรอบให้เกินค่าความเร็วพิกัดได้ในขณะเดียวกันก็สามารถควบคุมค่าแรงบิดได้โดยตรงและเป็นอิสระจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมสนามแม่เหล็กอีกด้วย จากภาพที่ 2.34 เป็นการแสดงบล๊อกไดอะแกรมการควบคุมแบบเวกเตอร์ ซึ่งการทำงานจะรับค่าคำสั่งสนามแม่เหล็กและคำสั่งแรงบิด ซึ่งผ่านมาทางปริมาณกระแสคำสั่ง I_d* และ I_q* แล้วจึงทำการประมวลผลเพื่อทำการควบคุมสนามแม่เหล็กและแรงบิดดังกล่าว โดยการทำงานจะต้องอาศัยการตรวจจับของกระแสจำนวน 3 เฟส ที่มีการแปลงให้อยู่ในรูป d,q และค่าความเร็วมาทำการคำนวณ ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณนี้จะขึ้นอยู่กับว่าจะอ้างอิงกับสนามโรเตอร์, สนามสเตเตอร์หรือสนามในช่องว่างอากาศ ซึ่งรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถหาได้ใน [6-8]



ภาพที่ 2.34 บล๊อกการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control)



ภาพที่ 2.35 บล๊อกการควบคุมแบบไร้ตัวตรวจจับความเร็ว (Sensorless Vector Control)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.7 การควบคุมแบบไร้ตัวตรวจจับความเร็ว (Sensorless Vector Control)

การควบคุมแบบนี้จะมีการทำงานที่คล้ายกับการควบคุมแบบเวกเตอร์แต่จะไม่มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับค่าความเร็วรอบ โดยการทำงานจะอาศัยการตรวจจับของกระแสและแรงดันแทนซึ่งค่าที่วัดได้นี้จะถูกนำไปคำนวณเป็นค่าความเร็วที่โรเตอร์แทน ดังที่แสดงบล๊อกการควบคุมในภาพที่ 2.35 ค่าของความเร็วและค่าฟลักซ์ที่โรเตอร์จะได้จากการประมาณโดยอาศัยโมเดลพื้นฐานของมอเตอร์ ค่าความถูกต้องจากการวัดจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการคำนวณเนื่องจากหากค่าที่ได้มีการวัดผิดพลาดเล็กน้อยจะส่งผลไปถึงการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานผิดพลาดไปด้วย ซึ่งรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถหาได้ใน [9-10]

2.6 สรุป

ในบทนี้เนื้อหาส่วนใหญ่จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ, พฤติกรรมของมอเตอร์ในสภาวะความเร็วต่างๆ และเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมแบบต่างๆ ในการสร้างสัญญาณการม็อดดูเลทที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์หรือตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลในการทำงานซึ่งเป็นหัวใจของการควบคุมการทำงานในระบบดิจิตอล อีกทั้งในตอนท้ายของบทได้กล่าวถึงรูปแบบต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งวัตถุประสงค์ในบทนี้เพื่อที่จะกล่าวถึงให้เห็นระบบที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งเป็นพื้นฐานที่จะนำไปสู่การตรวจสอบและวิเคราะห์การทำงานในบทต่อๆ ไป โดยที่หลักการพื้นฐานดังกล่าวผู้วิจัยจะนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในขั้นต่อไป

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีและการใช้งานตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

3.1 บทนำ

ในไมโครคอนโทรลเลอร์ 8 บิต และ 16 บิต ปัจจุบันเป็นที่นิยมกันอย่างมากในการออกแบบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ แต่การควบคุมดังกล่าวส่วนใหญ่จะเป็นการควบคุมแบบคงที่หรือมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานต่างๆ ไว้เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ดังนั้นตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ส่วนใหญ่จึงไม่นิยมนำมาใช้ในการประมวลผลในลักษณะของการคำนวณทางด้านตัวเลขที่มีการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาและเนื่องจากความสามารถในการคำนวณที่มีข้อจำกัดจึงไม่สามารถทำงานในกรณีที่การคำนวณนั้นๆ ต้องการความละเอียดสูงเพราะแอคคิวมูเลเตอร์ (ACC) ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อการประมวลผลทางด้านคณิตศาสตร์โดยตรงและจากโครงสร้างทางด้านสถาปัตยกรรมในการออกแบบดังกล่าวจึงทำให้ในบางกรณีตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เองไม่เหมาะกับงานที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณและประมวลพร้อมกับการควบคุมกระบวนการการทำงานไปพร้อมๆ กันได้ ในขณะเดียวกันการใช้คอมพิวเตอร์เพื่อการควบคุมการทำงานบางประเภทโดยตรงก็ไม่ได้หมายความว่าคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมนี้จะมีขีดความสามารถในการทำงานที่สูงกว่า อีกทั้งยังเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยรวมค่อนข้างสูง

ตารางที่ 3.1 ตารางการเปรียบเทียบความเร็ว (μs) ระหว่าง CPU กับ DSP

	80286 (12 MHz)	80486 (33 MHz)	PENTIUM (100 MHz)	DSP (40 MHz)
INTEGER				
A% = B%+C%	1.6	0.12	0.04	
A% = B%□C%	1.6	0.12	0.04	
A% = B%×C%	2.7	0.59	0.13	
A% = B%÷C%	64	9.2	1.5	
FLOATING POINT				
A = B+C	33	2.5	0.50	0.10
A = B□C	35	2.5	0.50	0.10
A = B×C	35	2.5	0.50	0.10
A = B÷C	49	4.5	0.87	0.80
A = SQR(B)	45	5.3	1.3	0.90
A = LOG(B)	186	19	3.4	1.7
A = EXP(B)	246	25	5.5	1.7
A = B^C	311	31	5.3	2.4
A = SIN(B)	262	30	6.6	1.1
A = ARCTAN(B)	168	21	4.4	2.2

จากตารางที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วในการประมวลผลระหว่างชิฟที่ใช้ในคอมพิวเตอร์กับชิฟตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล จากตารางจะเห็นได้ว่าความเร็วในการทำงานของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลจะมีความเร็วในการประมวลผลทางด้านคณิตศาสตร์ค่อนข้างจะรวดเร็วกว่าการใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผล ทั้งนี้เวลาการประมวลผลส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับประเภทของตัวประมวลผลและการออกแบบมาเพื่อการใช้งานในลักษณะใดๆ นั้นเอง [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากโครงงานวิจัยนี้การควบคุมส่วนใหญ่จากต้องอาศัยการคำนวณ, การเปรียบเทียบและการทำงานที่ค่อนข้างจะรวดเร็ว การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทั่วไปไม่สามารถกระทำได้ดีนัก จึงได้มีการนำตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล DSP (Digital Signal Processing) เข้ามาใช้ในด้านการคำนวณและการควบคุมการทำงานของระบบ ซึ่งตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลหรือ DSP นี้จะมีบทบาทอย่างยิ่งกับการประมวลผลและการทำงานในลักษณะของเวลาจริง (Real Time) ซึ่งทางผู้ผลิตชิฟดังกล่าวได้แก่ บริษัท Texas Instrument, Motorola, Analog Devices, Lucent Technology, Hitachi ฯลฯ ซึ่งชิฟดังกล่าวจะถูกออกแบบให้ใช้ในงานที่แตกต่างกันออกไป ในเรื่องของการควบคุมมอเตอร์หรือการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะได้รับความนิยมอยู่ 2 บริษัท ได้แก่ บริษัท เท็กซัสอินสตรูเมนต์ จำกัดและบริษัท โมโตโรลา จำกัด ซึ่งบริษัท เท็กซัสอินสตรูเมนต์ จำกัด จะเป็นผู้นำทางด้านการผลิตชิฟและตัวประมวลผล (DSP) มานานแล้ว ส่วนบริษัท โมโตโรลา จำกัด เพิ่งเริ่มเปิดตัวและตีตลาดเข้ามาในช่วงปลายปี 1999 โดยที่แต่ละบริษัทจะมีคุณสมบัติของชิฟที่ใกล้เคียงกันแต่จะแตกต่างกันในเรื่องของราคาและอุปกรณ์ที่ใช้ต่อร่วมภายนอก ซึ่งในโครงงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลรุ่น DSP56F805 ซึ่งอยู่ในตระกูลของ DSP56F8xx ของบริษัทโมโตโรลา จำกัด [12,13] เนื่องจากเป็นบอร์ดสำเร็จรูปที่เหมาะสำหรับงานวิจัย อีกทั้งยังมีคุณสมบัติต่างๆ โดยรวมที่ค่อนข้างจะดีกว่าชิฟในระดับเดียวกับของบริษัท เท็กซัสอินสตรูเมนต์ จำกัด [14] โดยรายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.2 การจำแนกตัวประมวลผลทางด้านสัญญาณดิจิตอลของบริษัท โมโตโรลา จำกัด

การจำแนกตัวประมวลผลทางด้านสัญญาณดิจิตอลของบริษัท โมโตโรลา จำกัด สามารถแบ่งออกได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดตระกูลของตัวประมวลสัญญาณดิจิตอล

รุ่น	รายละเอียด
DSP566xx	เหมาะสำหรับการประมวลผลทางระบบ Mobil Phone และระบบด้านการสื่อสาร GSM, Cellular, ระบบเครือข่ายโทรศัพท์ โดยใช้สถาปัตยกรรมแบบ RISC Micro controller (24 Bit)
DSP568xx	เหมาะสำหรับการประมวลผลและการควบคุมการทำงานต่างๆ โดยที่ตัวชิฟได้มีการผสมผสานกันระหว่างตัวอุปกรณ์ DSP กับ Micro controller เข้าไว้ด้วยกัน (16 Bit)
MSC81xx	เหมาะสำหรับการประยุกต์ทางด้านระบบเน็ตเวิร์ค (16 Bit)
DSP560xx	เหมาะสำหรับการประยุกต์ทางด้านระบบเสียงและภาพแบบดิจิตอล ตลอดจนระบบการสื่อสาร, การต่อเชื่อมและการฟิลเตอร์ทางดิจิตอล (24 Bit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

รุ่น	รายละเอียด
DSP563xx	เหมาะสำหรับการประยุกต์ทางด้าน Digital TV, DVD, IMAGE, ระบบเสียงแบบ Dolby System, Dolby Pro Logic, Digital Surround, THX และการประมวลผลทางด้านโมเด็มและการบีบอัดข้อมูล หรือใช้ในระบบงานที่ต้องการความเที่ยงตรงและความแม่นยำของสัญญาณสูง (24 Bit)
DSP960xx	เหมาะกับงาน Image Processing, 3D Graphics, Scientific Simulation หรืองานที่ต้องการความถูกต้องและความแม่นยำสูงมาก (32 Bit)

3.2.1 คุณสมบัติทั่วไปของตัวประมวลผลทางด้านสัญญาณดิจิตอล ในตระกูล DSP568XX

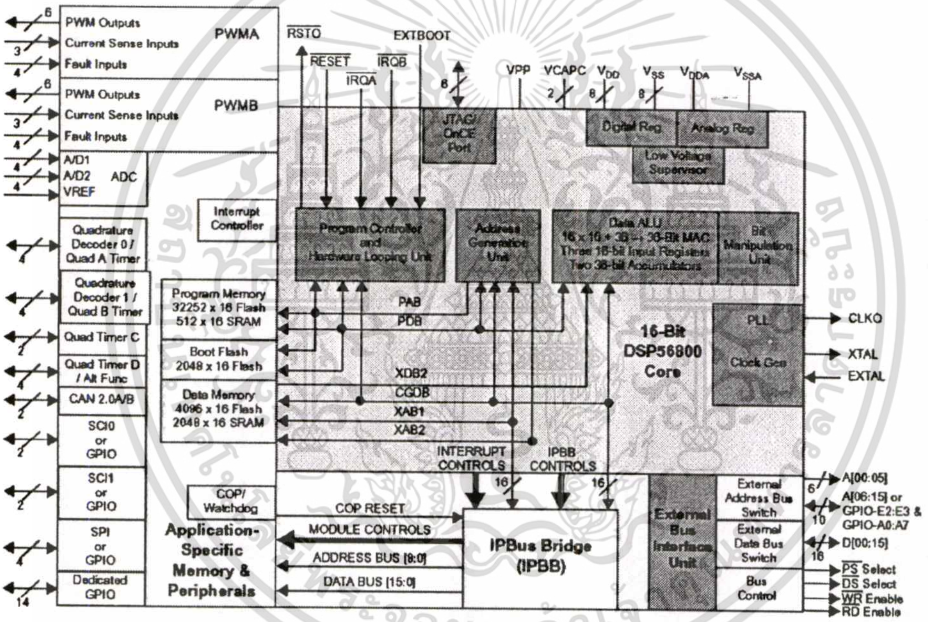
1. ความเร็วในการประมวลผล 20 – 200 MIPS (ล้านคำสั่งต่อวินาที) ขึ้นอยู่กับรุ่นที่ใช้งาน
2. สามารถทำการคูณเลขขนาด 16 บิตกับ 16 บิตได้ภายใน 1 แมชชีนไซเกิล
3. สามารถทำงาน 2 คำสั่งพร้อมกันได้ในขั้นตอนเดียวกัน เช่น ทำคำสั่งทางคณิตศาสตร์พร้อมกับเคลื่อนย้ายข้อมูลแบบบล็อก เป็นต้น
4. มี Accumulator ขนาด 36 บิต, Arithmetic Login Unit ขนาด 32 บิต
5. มี Pointer Registers ขนาด 16 บิต 5 ชุด และ Program Counter ขนาด 16 บิต
6. สามารถใช้คำสั่งเลื่อนบิต (Shift) ได้ตั้งแต่ 0 – 15 บิต ภายใน 1 คำสั่ง
7. สามารถทำการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ในรูปของทศนิยมและจำนวนเต็มได้
8. คำสั่งที่ใช้ในการทำงานมีความคล้ายกับคำสั่งในไมโครคอนโทรลเลอร์
9. มีคำสั่งการเคลื่อนย้ายข้อมูลระหว่างหน่วยความจำข้อมูลกับหน่วยความจำโปรแกรม
10. มี Hardware Stack และ Software Stack ขนาด 16 บิต

3.2.2 รายละเอียดของตัวประมวลผลทางด้านสัญญาณดิจิตอล DSP56F805EVM

1. เป็นตัวประมวลผลทางด้านสัญญาณดิจิตอลขนาด 16 บิต 3.3 โวลต์ ทำงานที่ 80 MHz.
2. ทำงานได้เร็วถึง 35 MIPS (ล้านคำสั่งต่อวินาที) ที่ความเร็ว 80 MHz.
3. ทำงานได้เร็ว 12 นาโนวินาที ต่อ 1 แมชชีนไซเกิล
4. หน่วยความจำโปรแกรมแบบ Flash 32 กิโลไบต์ x 16 บิต อยู่ในตัวประมวลผล
5. หน่วยความจำโปรแกรมแบบ RAM 512 ไบต์ x 16 บิต อยู่ในตัวประมวลผล
6. หน่วยความจำข้อมูลแบบ Flash 4 กิโลไบต์ x 16 บิต อยู่ในตัวประมวลผล
7. หน่วยความจำข้อมูลแบบ RAM 2 กิโลไบต์ x 16 บิต อยู่ในตัวประมวลผล
8. หน่วยความจำที่ใช้ในการเริ่มต้นทำงานแบบ Flash ขนาด 2 กิโลไบต์ x 16 บิต
9. ชุดสร้างสัญญาณ PWM จำนวน 6 ขา จำนวน 2 ชุด (PWM A, PWM B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. อุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิตอลขนาด 12 บิต จำนวน 8 ขา
11. พอร์ตสื่อสารความเร็วสูง Control Area Network (CAN) ที่ความเร็ว 1 MBPS.
12. พอร์ตอนุกรมจำนวน 2 พอร์ต (Serial A, Serial B)
13. พอร์ตขนานเพื่อใช้ในการติดต่อข้อมูลกับคอมพิวเตอร์ในการบันทึกโปรแกรม
14. ชุดกำหนดสัญญาณนาฬิกาจำนวน 4 โมดูลๆ ละ 4 ชุด (Timer A, B, C, D)
15. พอร์ต JTAG (Join Test Action Group) เพื่อใช้ในการตรวจหาดีบักที่เกิดขึ้นในวงจร
16. ขาอินพุต / เอาท์พุตอิสระ (GPIO) จำนวน 14 ขา เพื่อใช้ในการควบคุมต่างๆ
17. หน่วยความจำโปรแกรมและข้อมูลภายนอกขนาด 128 กิโลไบต์ x 16 บิต
18. อุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิตอลไปเป็นสัญญาณแอนะล็อกแบบอนุกรม ขนาด 10 บิต
19. อินเตอร์รัพต์เวกเตอร์มากถึง 64 ตำแหน่งสำหรับการทำงานที่เกิดจากอินเตอร์รัพต์

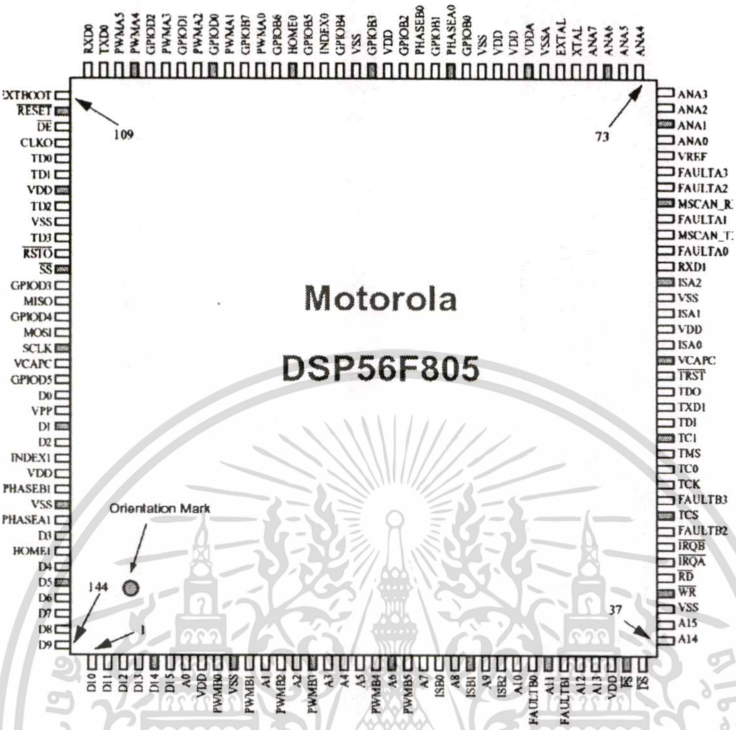


ภาพที่ 3.1 บล๊อกไดอะแกรมของตัวประมวลผลทางด้านสัญญาณดิจิตอล DSP56F805

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลรุ่น DSP56F805 เป็นหนึ่งในตระกูลของ DSP568xx ที่ถูกออกแบบเพื่อการทำงานในลักษณะของการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าและการประมวลผลในลักษณะของ Real Time แบบ Fixed Point เช่น มีการประมวลผลของสัญญาณขับนำหรือองศาของความเร็วรอบที่ได้จากการตรวจจับ เป็นต้น และเพื่อการประมวลผลแบบเวลาใช้งานจริง (Real Time) อุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับตัวประมวลผลทางด้านสัญญาณดิจิตอลจึงต้องมีความเร็วในการทำงานสูงได้แก่ หน่วยความจำซึ่งเป็นหน่วยความจำแบบ Fast Static RAM โดยการทำงานของหน่วยความจำดังกล่าวจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่มีการหยุดชะงักของข้อมูลระหว่างที่ส่งและรับข้อมูลกับตัว DSP (Wait Time = 0) จึงทำให้การทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวมีประสิทธิภาพเต็มที่



ภาพที่ 3.2 ตัวประมวลผลทางด้านสัญญาณดิจิตอล DSP56F805 (144 Pin LQFP)

3.3 หน้าที่และตำแหน่งขาของ DSP56F805

ตำแหน่งขาและชื่อขาของ DSP56F805 สังเกตได้ในภาพที่ 3.2 โดยหน้าที่การทำงานของแต่ละขาสามารถอธิบายได้ดังตารางที่ 3.3 ถึง 3.9

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงรายละเอียดการทำงานของขาแหล่งจ่ายไฟและขาสัญญาณนาฬิกา

จำนวนขา	ชื่อขา	สถานะ	สถานะช่วงรีเซต	รายละเอียดการทำงาน
7	V_{DD}	-	-	เป็นขาที่ใช้ในการรับไฟฟ้ากระแสตรง + 3.3 โวลต์ เพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับตัวประมวลผล (DSP)
2	V_{DDA}	-	-	เป็นขาที่ใช้ในการรับไฟฟ้ากระแสตรง + 3.3 โวลต์ ของวงจรแอนะล็อก
7	V_{SS}	-	-	เป็นขากราวด์ของวงจรสำหรับตัว DSP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

จำนวนขา	ชื่อขา	สถานะ	สถานะช่วงรีเซต	รายละเอียดการทำงาน
1	V_{SSA}	-	-	เป็นขากราวด์ของวงจรแอนะล็อก
2	V_{CAPC}	Supply	Supply	เป็นขารับไฟตรง + 3.3 โวลต์ ที่ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุลงกราวด์ เพื่อลดสัญญาณรบกวน (Noise)
1	EXTAL CLOCK IN	Input	Input	เป็นขาสัญญาณที่ต่อกับออสซิลเลตเตอร์เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณนาฬิกาให้กับตัว DSP โดยจะมีการทำงานรวมกับ PLL ในการสร้างสัญญาณนาฬิกาที่ความเร็ว 80 MHz.
1	XTAL	Output	Chip Driven	เป็นขาสัญญาณที่ใช้ต่อกับออสซิลเลตเตอร์ในการสร้างสัญญาณนาฬิกา
1	CLKO	Output	Chip Driven	เป็นขาสัญญาณนาฬิกาที่ผ่านการควบคุมจากริจิตเตอร์ PCR1 ในการกำหนดจังหวะของสัญญาณ

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงรายละเอียดการทำงานของขาสัญญาณบัสแอดเดรสและบัสข้อมูล

จำนวนขา	ชื่อขา	สถานะ	สถานะช่วงรีเซต	รายละเอียดการทำงาน
6	A0 – A5	Output	Tri state	เป็นขาสัญญาณที่ใช้ชี้แอดเดรสของหน่วยความจำโปรแกรม, หน่วยความจำข้อมูลหรือ I/O ภายนอก
2	A6 – A7 GPIO E2 - E3	Output I/O	Tri state Input	เป็นขาสัญญาณที่ใช้ชี้ตำแหน่งแอดเดรสของหน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูลและยังเป็นขาที่ใช้ในการควบคุมแบบอิสระสำหรับวงจรภายนอกโดยสามารถเป็นได้ทั้งขาอินพุตและเอาท์พุตขึ้นอยู่กับการเซตโปรแกรม * หลังจากรีเซต ค่าปกติจะเป็นขา Address Bus
8	A8 – A15 GPIO A0 - A7	Output I/O	Tri state Input	เป็นขาสัญญาณที่ใช้ชี้ตำแหน่งแอดเดรสของหน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูลและยังเป็นขาที่ใช้ในการควบคุมแบบอิสระสำหรับวงจรภายนอกโดยสามารถเป็นได้ทั้งขาอินพุตและเอาท์พุตขึ้นอยู่กับการเซตโปรแกรม * หลังจากรีเซต ค่าปกติจะเป็นขา Address Bus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 (ต่อ)

จำนวนขา	ชื่อขา	สถานะ	สถานะช่วงรีเซต	รายละเอียดการทำงาน
16	D0 – D15	I/O	Tri state	เป็นขาบัสข้อมูล ใช้ติดต่อระหว่างตัว DSP กับหน่วยความจำข้อมูลหรือหน่วยความจำโปรแกรม

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงรายละเอียดการทำงานของขาสัญญาณควบคุมบัส

จำนวนขา	ชื่อขา	สถานะ	สถานะช่วงรีเซต	รายละเอียดการทำงาน
1	PS	Output	Tri state	เป็นขาสัญญาณที่ใช้ติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก โดยจะทำงานที่สถานะต่ำ (Low)
1	DS	Output	Tri state	เป็นขาสัญญาณที่ใช้ติดต่อกับหน่วยความจำข้อมูลภายนอก โดยจะทำงานที่สถานะต่ำ (Low)
2	WR RD	Output	Tri state	เป็นขาสัญญาณควบคุมการอ่านและเขียนข้อมูลกับหน่วยความจำภายนอก โดยจะทำงานที่สถานะต่ำ (Low) และในการทำงานนั้นจะต้องทำงานไม่พร้อมกันเช่นหาก WR ทำงาน (Low) สัญญาณ RD จะต้องไม่ทำงาน (High)

ตารางที่ 3.6 ตารางแสดงรายละเอียดการทำงานของขาสัญญาณอินเตอร์รัพต์และขาควบคุม

จำนวนขา	ชื่อขา	สถานะ	สถานะช่วงรีเซต	รายละเอียดการทำงาน
2	IRQ A/B	Input	Input	เป็นขารับสัญญาณอินเตอร์รัพต์ภายนอก
1	RESET	Input	Input	เป็นขาที่ใช้ในการรีเซตระบบทั้งหมดของตัว DSP ให้พร้อมกลับมาเริ่มทำงานใหม่โดยสภาวะขาต่างๆ ระหว่างการรีเซตจะระบุอยู่ในตาราง
1	RSTO	Output	Output	เป็นขาที่นำสัญญาณรีเซตออกไปยังอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ภายนอก เพื่อรีเซตระบบพร้อมกับตัว DSP
8	GPIO B0 – B7	I/O	Input	เป็นขาที่ใช้ในการควบคุมแบบอิสระสำหรับวงจรภายนอกโดยสามารถเป็นได้ทั้งขาอินพุตและเอาท์พุตขึ้นอยู่กับการเซตของโปรแกรม * หลังจากรีเซตค่าปกติจะมีสถานะเป็นอินพุต
6	GPIO D0 - D5	I/O	Input	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 ตารางแสดงรายละเอียดการทำงานของขาสัญญาณ PWM

จำนวนขา	ชื่อขา	สถานะ	สถานะช่วงรีเซต	รายละเอียดการทำงาน
12	PWM A PWM B	Output	Output	เป็นขาสัญญาณเอาท์พุตที่สามารถให้กำเนิดสัญญาณพัลส์วิดม็อดดูเลชั่น (PWM)
6	ISA0-2 ISB0-2	Input	Input	เป็นขารับสัญญาณตรวจจับสภาวะทิศทางของกระแสเพื่อแก้ผลการประวิงเวลา (Dead Time)
8	Fault A0 - A3 B0 - B3	Input	Input	เป็นขารับสัญญาณอินพุตเพื่อใช้หยุดการทำงานของ PWM อย่างฉับพลัน ในกรณีที่มีการตรวจจับฟอล์ตได้ระหว่างการทำงาน

ตารางที่ 3.8 ตารางแสดงรายละเอียดการทำงานของขาสัญญาณอินเตอร์เฟส

จำนวนขา	ชื่อขา	สถานะ	สถานะช่วงรีเซต	รายละเอียดการทำงาน
1	MISO GPIOE6	I/O I/O	Input Input	เป็นขาสัญญาณที่ใช้ในการรับข้อมูลแบบอนุกรมความเร็วสูง เช่นใช้ในการส่งข้อมูลไป D/A หรือใช้ในการติดต่อระหว่าง DSP ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 เป็นขาที่ใช้ในการควบคุมแบบอิสระสำหรับวงจรภายนอก โดยสามารถเป็นได้ทั้งขาอินพุตและเอาท์พุตขึ้นอยู่กับการเซตของโปรแกรม * หลังจากรีเซตค่าปกติจะเป็นขา MISO
1	MOSI GPIOE5	I/O I/O	Input Input	เป็นขาสัญญาณที่ใช้ในการส่งข้อมูลแบบอนุกรมความเร็วสูง เป็นขาที่ใช้ในการควบคุมแบบอิสระสำหรับวงจรภายนอก * หลังจากรีเซตค่าปกติจะเป็นขา MOSI
1	SCLK GPIOE4	I/O I/O	Input Input	เป็นขาสัญญาณนาฬิกาอ้างอิงในการส่งข้อมูลแบบอนุกรมความเร็วสูง เป็นขาที่ใช้ในการควบคุมแบบอิสระสำหรับวงจรภายนอก * หลังจากรีเซตค่าปกติจะเป็นขา SCLK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.8 (ต่อ)

จำนวนขา	ชื่อขา	สถานะ	สถานะช่วงรีเซต	รายละเอียดการทำงาน
1	SS GPIOE7	Input I/O	Input Input	เป็นขาสัญญาณที่ใช้ในการบอกสถานะว่าเป็น Master หรือ Slave เป็นขาที่ใช้ในการควบคุมแบบอิสระสำหรับวงจรภายนอก * หลังจากรีเซตค่าปกติจะเป็นขา SS
2	TX D0 – D1 GPIOE0 GPIOD6	Output I/O	Input Input	เป็นขาที่ใช้ในการส่งข้อมูลของพอร์ตอนุกรม เป็นขาที่ใช้ในการควบคุมแบบอิสระสำหรับวงจรภายนอก * หลังจากรีเซตค่าปกติจะเป็นขา TXD0 และ TXD1
2	RX D0 - D1 GPIOE1 GPIOD7	Input I/O	Input Input	เป็นขาที่ใช้ในการรับข้อมูลของพอร์ตอนุกรม เป็นขาที่ใช้ในการควบคุมแบบอิสระสำหรับวงจรภายนอก * หลังจากรีเซตค่าปกติจะเป็นขา RXD0 และ RXD1
1	MSCAN_R	Input	Input	เป็นขาที่ใช้ในการรับข้อมูลแบบเฟรมซึ่งคล้ายกับเฟรมการรับส่งโปรโตคอลในระบบเครือข่ายโดยสามารถรับข้อส่งมูลด้วยความเร็ว 1 เมกะบิตต่อวินาที
1	MSCAN_T	Output	Output	เป็นขาที่ใช้ในการส่งข้อมูลแบบเฟรมด้วยความเร็ว 1 เมกะบิตต่อวินาที

ตารางที่ 3.9 ตารางแสดงรายละเอียดการทำงานของขาสัญญาณ A/D, ไทม์เมอร์ และดีบัส

จำนวนขา	ชื่อขา	สถานะ	สถานะช่วงรีเซต	รายละเอียดการทำงาน
8	AN A0 - A7	Input	Input	เป็นขารับสัญญาณแอนะล็อกเพื่อทำการแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอลให้แก่ตัว DSP
14	TA0 –3 TB0 – 3 TC0 – 1 TD0 – 3	I/O	Input	เป็นขาวงจรที่ใช้ในการนับสัญญาณที่มาจากภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

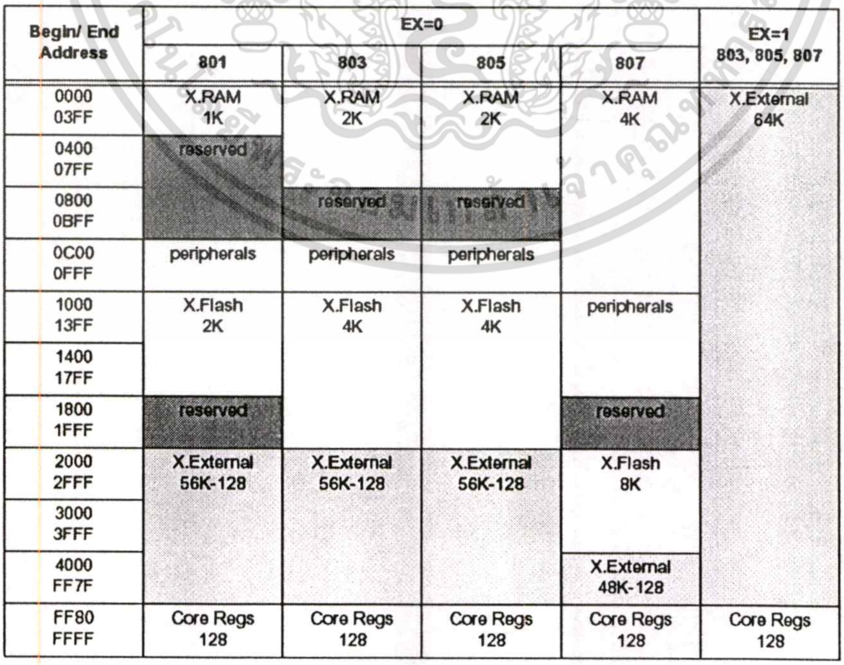
ตารางที่ 3.9 (ต่อ)

จำนวนขา	ชื่อขา	สถานะ	สถานะช่วงรีเซต	รายละเอียดการทำงาน
1	VRH	Input	Input	เป็นขารับแรงดันอ้างอิงของขา ANA0- A7
1	TCK	Input	Input	เป็นขาที่ใช้ในการตรวจสอบสัญญาณนาฬิกา
1	TMS	Input	Input	เป็นขาที่ใช้ในการตรวจสอบคาบแมชชีนไซเกิล
1	TDI	Input	Input	เป็นขาที่ใช้ในการตรวจสอบข้อมูลทางด้านอินพุต
1	TDO	Output	Tri state	เป็นขาที่ใช้ในการตรวจสอบข้อมูลทางด้านเอาท์พุต
1	TRST	Input	Input	เป็นขาที่ใช้ในการตรวจสอบสภาวะการรีเซต
1	DE	Output	Output	เป็นขาที่ใช้ในการแสดงดีบัสที่เกิดจากการตรวจสอบ

3.4 การจัดการหน่วยความจำ

หัวข้อนี้จะเป็นการอธิบายการใช้หน่วยความจำของชิฟและโหมดการทำงานของตัวประมวลสัญญาณดิจิตอลตระกูล DSP56F80X ซึ่งหน่วยความจำสามารถแบ่งได้ดังนี้

- หน่วยความจำข้อมูล
- หน่วยความจำโปรแกรม



ภาพที่ 3.3 ตำแหน่งต่างๆ ของหน่วยความจำข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 รายละเอียดหน่วยความจำข้อมูล

จากภาพที่ 3.3 หน่วยความจำข้อมูลตำแหน่งบนสุดของของหน่วยความจำตั้งแต่ $FF80 - $FFFF ทั้งหมด 128 แอดแดรส เป็นตำแหน่งสงวน (Reserved) สำหรับรีจิตเตอร์ของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล ตำแหน่งตั้งแต่ $0800 - $0BFF เป็นตำแหน่งที่ไม่สามารถใช้งานได้ในหน่วยความจำข้อมูลหรืออาจเรียกได้ว่าเป็นแอดแดรสสงวนและตำแหน่งตั้งแต่ $0C00 - $0FFF เป็นตำแหน่งรีจิตเตอร์ที่ใช้ระบุสถานะต่างๆ ของรีจิตเตอร์เช่น รีจิตเตอร์ของ PWM, A/D, พอร์ตอนุกรมและ TIMER เป็นต้น ส่วนที่ตำแหน่ง $1000 - $1FFF จะเป็นตำแหน่งที่ใช้เก็บข้อมูลแบบ Flash และในการใช้งานหน่วยความจำข้อมูลภายในจะต้องรีเซตบิต External X Memory (EX) ในรีจิตเตอร์โอเปอร์เรดโหมด (OMR) ให้มีค่าเท่ากับ 0 แต่ถ้าหากบิต EX มีค่าเท่ากับ 1 จะเป็นการใช้งานหน่วยความจำข้อมูลภายนอกตัวชิฟและในการเข้าถึงข้อมูลของหน่วยความจำต่างๆ นั้นการทำงานจะถูกควบคุมโดยบิตภายในรีจิตเตอร์บัสคอนโทรล (Bus Control Register) ซึ่งจะใช้ในการกำหนดค่าการรอคอย (Wait time) โดยอยู่ในตำแหน่งสงวนที่ $FFF9 ของหน่วยความจำ ดังแสดงในภาพที่ 3.4

BCR—X:$FFF9	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Read	0	0	0	0	0	0	DRV	0	Wait State Field for External X-Memory				Wait State Field for External P-Memory			
Write																
Reset=$00FF	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0

ภาพที่ 3.4 รีจิตเตอร์บัสคอนโทรล (Bus Control Register) ในตำแหน่งสงวนที่ $FFF9

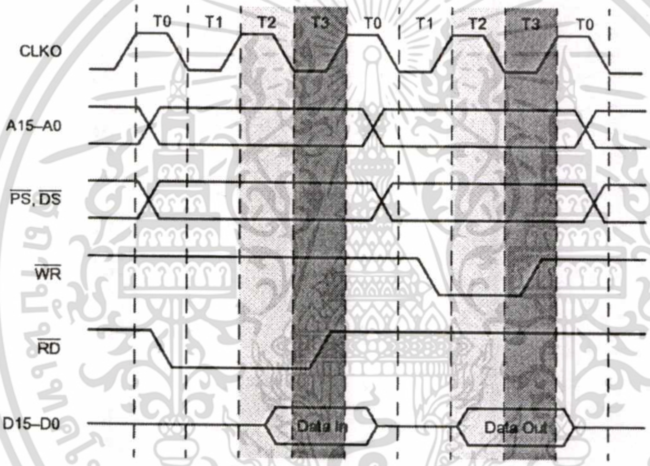
ตารางที่ 3.10 ตารางแสดงรายละเอียดบิตใช้งานของรีจิตเตอร์บัสคอนโทรล (Bus Control Register)

บิตที่	รายละเอียด
8, 10-15	เป็นบิตสงวน ไม่ได้ใช้งานและจะมีค่าเท่ากับศูนย์ในช่วงการทำงาน
9	เป็นบิตไดร์ฟ (DRV) เป็นบิตเซตและรีเซตสถานะของขาที่ติดต่อกับหน่วยความจำโดยสามารถเซตให้ทำงาน (Drive) หรือให้อยู่ในสภาวะ Tri-state ได้ในกรณีที่ไม่ได้มีการติดต่อกับหน่วยความจำภายนอก บิตนี้สามารถรีเซตได้โดยทางฮาร์ดแวร์
4-7	เป็นบิตที่ใช้ในการโปรแกรมช่วงเวลาการรอข้อมูลจากหน่วยความจำข้อมูลภายนอก (Wait State Data Memory) โดยบิตที่ 4 และ 5 จะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่วนบิตที่ 6 และ 7 จะเป็นบิตใช้งาน บิต 6 เท่ากับ 0 บิต 7 เท่ากับ 0 ช่วงเวลาการรอคอยเท่ากับ 0 บิต 6 เท่ากับ 0 บิต 7 เท่ากับ 1 ช่วงเวลาการรอคอยเท่ากับ 4 บิต 6 เท่ากับ 1 บิต 7 เท่ากับ 0 ช่วงเวลาการรอคอยเท่ากับ 8 บิต 6 เท่ากับ 1 บิต 7 เท่ากับ 1 ช่วงเวลาการรอคอยเท่ากับ 12 นอกเหนือจากการเซตค่าดังกล่าวแล้วหากเซตเป็นค่าอื่นๆ ชิฟจะไม่ทำงาน (error)

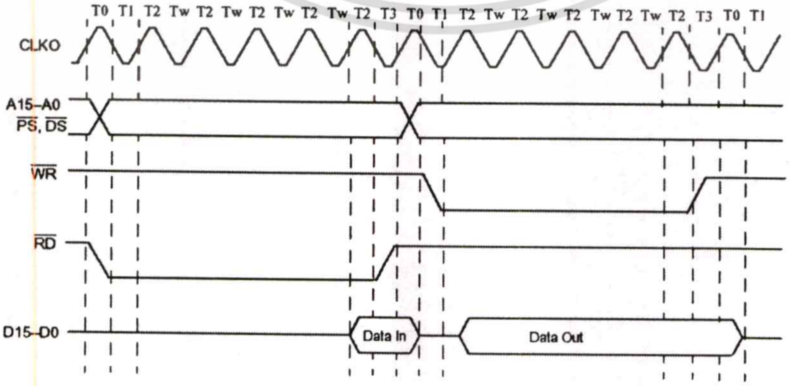
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.10 (ต่อ)

บิตที่	รายละเอียด
0-3	เป็นบิตที่ใช้ในการโปรแกรมช่วงเวลาการรอข้อมูลจากหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก (Wait State Program Memory) โดยบิตที่ 0 และ 1 จะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่วนบิตที่ 2 และ 3 จะเป็นบิตใช้งาน บิต 2 เท่ากับ 0 บิต 3 เท่ากับ 0 ช่วงเวลาการรอคอยเท่ากับ 0 บิต 2 เท่ากับ 0 บิต 3 เท่ากับ 1 ช่วงเวลาการรอคอยเท่ากับ 4 บิต 2 เท่ากับ 1 บิต 3 เท่ากับ 0 ช่วงเวลาการรอคอยเท่ากับ 8 บิต 2 เท่ากับ 1 บิต 3 เท่ากับ 1 ช่วงเวลาการรอคอยเท่ากับ 12 นอกเหนือจากการเซตค่าดังกล่าวแล้วหากเซตเป็นค่าอื่นๆ ชิฟจะไม่ทำงาน (Error)



ภาพที่ 3.5 สภาวะการทำงานของบัสอ่าน / เขียน ที่ช่วงเวลาการรอคอยเท่ากับ 0



ภาพที่ 3.6 สภาวะการทำงานของบัสอ่าน / เขียน ที่ช่วงเวลาการรอคอยเท่ากับ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 3.5 และภาพที่ 3.6 เป็นการแสดงการทำงานของบัสอ่าน / เขียน ที่ช่วงเวลาการรอคอยเท่ากับ 0 และ 4 โดยจะสังเกตได้ว่ามีช่วงเวลา Tw เท่ากับค่าที่เซตในบิตของรีจิสเตอร์บัสคอนโทรล ข้อดีของการเซตช่วงเวลาการรอคอยก็คือ ในกรณีที่มีการต่อตัวประมวลสัญญาณดิจิตอลร่วมกับอุปกรณ์ภายนอก ถ้าอุปกรณ์ภายนอกมีการทำงานที่ช้ากว่าตัวประมวลสัญญาณดิจิตอล ตัวประมวลผลเองสามารถหน่วงเวลาการรับและเขียนข้อมูลเพื่อที่จะรอการทำงานจากอุปกรณ์ภายนอก

3.4.2 รายละเอียดหน่วยความจำโปรแกรม

จากภาพที่ 3.7 แสดงถึงหน่วยความจำโปรแกรม ซึ่งโหมดการทำงานจะถูกควบคุมโดยบิต MA (Operating Mode A) และ MB ในรีจิตเตอร์โอเปอร์เรดติ้งโหมด (Operating Mode Register) ดังที่ได้อธิบายในข้างต้น โดยจะทำงานควบคู่กับบิต BOOTMAP_B ในรีจิตเตอร์ซีสเต็มคอนโทรล (SYS_CNTL Register) ซึ่งจะเป็นตัวที่ควบคุมการทำงานของหน่วยความจำโปรแกรมและเป็นการเลือกใช้ตำแหน่งเวกเตอร์แอดแดรสที่ต้องการ ซึ่งภายในตัวประมวลสัญญาณดิจิตอลรุ่น DSP56F803, 805 และ 807 สามารถต่อหน่วยความจำภายนอกเพิ่มเติมได้ถึง 64 กิโลเวิร์ด [13]

Begin/ End Address	Mode 0A				Mode 0B				Mode 3
	801	803	805	807	801	803	805	807	803, 805, 807
0000 0003	B.Flash 4	B.Flash 4	B.Flash 4	B.Flash 4	Not Supported	B.Flash 4	B. Flash 4	B.Flash 4	P.External 64K
0004 1FFF	P.Flash 8K-4	P.Flash 31.5K-4	P.Flash 31.5K-4	P.Flash 32K-4		P.Flash 31.5K-4	P.Flash 31.5K-4	P.Flash 28K-4	
2000 6FFF	reserved								
7000 73FF								P.RAM 2K	
7400 77FF									
7800 7BFF								B.Flash 2K	
7C00 7DFF	P.RAM 1K								
7E00 7FFF		P.RAM 512	P.RAM 512			P.RAM 512	P.RAM 512		
8000 87FF	B.Flash 2K	B.Flash 2K	B.Flash 2K	P.Flash2 28K		P.External 32K	P.External 32K	P.External 32K	
8800 EFFF	reserved	reserved	reserved						
F000 F3FF				P.RAM 2K					
F400 F7FF									
F800 FFFF				B.Flash 2K					

ภาพที่ 3.7 ตำแหน่งต่างๆ ของหน่วยความจำโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bits	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Read	NL	0	0	0	0	0	0	CC	0	SD	R	SA	EX	0	MB	MA
Write	NL							CC		SD	R	SA	EX		MB	MA
Reset	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ภาพที่ 3.8 รีจิตเตอร์โอปเปอร์เรดติ้งโหมด (Operating Mode Register)

ตารางที่ 3.11 ตารางแสดงรายละเอียดบิตใช้งานของรีจิตเตอร์โอปเปอร์เรดติ้งโหมด

บิตที่	รายละเอียด
15	บิต Nested Looping (NL) ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 จะไม่อนุญาตให้มีการซ้อนลูปการทำงาน แต่ถ้ามีค่าเท่ากับ 1 จะอนุญาตให้มีการซ้อนลูปการทำงาน
2, 7, 9-14	เป็นบิตสงวน ไม่ใช้งานได้และจะมีค่าเท่ากับศูนย์ในช่วงการทำงาน
8	บิต Code Condition (CC) ถ้ามีค่าเป็น 1 จะเป็นการเซตให้รีจิตเตอร์เงื่อนไข (CCR) ทำงาน แต่ถ้าเป็น 0 รีจิตเตอร์ดังกล่าวจะไม่ทำงาน
6	บิต Stop Delay (SD) เป็นที่ใช้หน่วงเวลาในการออกจากโหมดหยุดการทำงาน หากมีค่าเป็น 1 ตัวประมวลผลจากออกจากโหมดหยุดการทำงานอย่างรวดเร็ว หากมีค่าเป็น 0 ตัวประมวลผลจากออกจากโหมดหยุดการทำงานแบบปกติ บิตนี้สามารถเคลียร์ได้โดยการรีเซต
5	บิต Rounding เป็นบิตที่ใช้เซต (1) และรีเซต (0) การหมุนของลูปที่เป็นวงโคจร
4	บิต Saturation เป็นบิตที่มีการเซตอัตโนมัติของผลลัพธ์แอคคิวมูเลเตอร์ 32 บิตที่เกิดจากการกระทำทางด้านคณิตศาสตร์ หากบิตนี้มีค่าเท่ากับ 1 จะมีการพิจารณาผลลัพธ์ที่อยู่ในระหว่างค่าบวกสูงสุดและลบสูงสุด เช่น \$0 7FFF FFFF และ \$F 8000 0000 ซึ่งปกติในการกระทำทางด้านคณิตศาสตร์มักจะรีเซตไว้เพื่อความสะดวก
3	บิต External X Memory (EX) เป็นบิตที่ใช้อนุญาตติดต่อกับหน่วยความจำภายนอก หากมีค่าเป็น 0 จะไม่อนุญาตให้มีการติดต่อกับหน่วยความจำภายนอก
0-1	บิต Operating Mode (MA,MB) เป็นบิตที่ใช้ควบคุมการทำงานในส่วนของหน่วยความจำโปรแกรมโดยสามารถเลือกการทำงานได้ 2 โหมดคือ MA = 0 และ MB = 0 จะเป็นการทำงานโดยใช้หน่วยความจำโปรแกรมภายใน MA = 1 และ MB = 1 จะเป็นการทำงานโดยใช้หน่วยความจำโปรแกรมภายนอก

การทำงานของหน่วยความจำโปรแกรมแบบใช้หน่วยความจำในตัวชิพ (โหมด 0) สามารถแบ่งย่อยออกได้เป็นโหมด 0A และโหมด 0B โดยการทำงานของโหมด 0A คือเป็นการจัดหน่วยความจำโปรแกรมทั้งหมดในตัวชิพให้สามารถใช้งานได้ตามคุณสมบัติที่ตัวชิพมี ส่วนโหมด 0B จะเป็นการจัดหน่วยความจำโปรแกรมในตัวชิพให้มีขนาด 32 กิโลเวิร์ดและจัดหน่วยความจำโปรแกรมภาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกตัวชิฟให้มีขนาดขนาด 32 กิโลเวิร์ด (หน่วยจำภายนอกสามารถเพิ่มได้ถึง 64 กิโลเวิร์ด) ส่วนโหมดการทำงานแบบโหมด 3 จะเป็นการอ้างถึงการใช้งานหน่วยความจำภายนอกทั้งหมดเพียงอย่างเดียว ในกรณีถ้าขา EXT_BOOT มีสถานะต่ำในช่วงระหว่างการรีเซต การใช้งานจะเป็นโหมด 0 ทุกครั้งที่ออกจากการรีเซต

3.5 อินเตอร์รัพต์

อินเตอร์รัพต์ภายในของตัวประมวลสัญญาณดิจิตอลรุ่น DSP56F805 จะมีอินเตอร์รัพต์ทั้งหมด 64 ตำแหน่ง โดยแต่ละตำแหน่งสามารถเซตระดับความสำคัญในการทำงานได้ถึง 7 ระดับ (000-111) โดยเซตในรีจิตเตอร์ระดับสิทธิ์ (Priority Level Register : PLR) และภายในทุกๆ 4 ค่าของ PLR จะแบ่งย่อยได้อีก 4 กรุ๊ปโดยจะอยู่ในรีจิตเตอร์ระดับกรุ๊ป (Group Priority Register : GPR) ดังแสดงในภาพที่ 3.9 ซึ่งค่าของรีจิตเตอร์ระดับกรุ๊ปนี้สามารถอ่านและเขียนได้ ตามปกติระดับความสัมพันธ์ของอินเตอร์รัพต์จะถูกเซตมาอยู่แล้ว (default) แต่ค่าต่างๆ เหล่านี้สามารถเซตใหม่ได้เพื่อความเหมาะสมกับการใช้งาน

ITCN_BASE+$3	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Read Write			PLR15				PLR14				PLR13				PLR12	
Reset	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ภาพที่ 3.9 รีจิตเตอร์ระดับสิทธิ (PLR) ที่อยู่ภายในรีจิตเตอร์ระดับกรุ๊ป (GPR)

จากภาพที่ 3.9 เป็นการแสดงถึงรีจิตเตอร์ระดับกรุ๊ป (GPR) เพียง 1 แอดแครสจาก 16 แอดแครส เนื่องจากมีรีจิตเตอร์ระดับสิทธิ (PLR) อยู่ 64 ค่า จึงมีรีจิตเตอร์ระดับกรุ๊ป (GPR) อยู่ถึง 16 ตำแหน่ง ในการใช้งานอินเตอร์รัพต์ก็มีเวกเตอร์อินเตอร์รัพต์อยู่ถึง 64 เวกเตอร์อินเตอร์รัพต์ โดยใช้ตำแหน่งแอดแครสตั้งแต่ $0000 - $007E และแต่ละเวกเตอร์อินเตอร์รัพต์จะห่างกันอยู่ 2 ตำแหน่ง ในการใช้งานหากมีการเกิดอินเตอร์รัพต์ควรมีการใช้คำสั่งกระโดดการทำงานไปทำงานต่อในยังแอดแครสอื่น เพื่อทำงานในส่วนของอินเตอร์รัพต์ที่เกิดขึ้นโดยไม่ไปทับกับเวกเตอร์อินเตอร์รัพต์อื่นๆ ที่อยู่ในแอดแครสถัดไป ซึ่งรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถศึกษาได้ใน [2]

3.6 โมดูลต่างๆ ในตัวประมวลผล DSP

ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงรายละเอียดของขาสัญญาณภายในตัว DSP ซึ่งการทำงานของขาต่างๆ นี้จะมีการทำงานที่สัมพันธ์กับการทำงานภายในตัว DSP หรือมีการทำงานเป็นชุดๆ ซึ่งชุดการทำงานนี้เราเรียกว่า "โมดูล" (Module) โดยในตัว DSP จะประกอบไปด้วยโมดูลต่างๆ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้

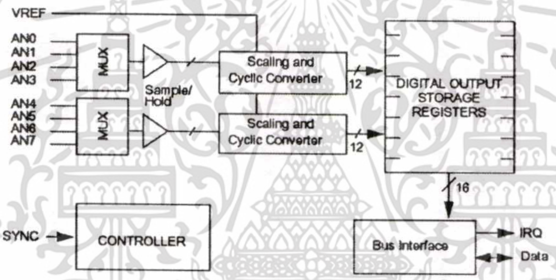
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะกล่าวถึงรายละเอียดและวิธีการกำหนดค่าต่างๆ ในโมดูล โดยจะเน้นในโมดูลที่เกี่ยวข้องกับโครงงานวิจัยนี้เป็นพิเศษ ซึ่งรายละเอียดของแต่ละโมดูลมีดังต่อไปนี้

3.6.1 แอนะล็อก / ดิจิตอล

ในส่วนของชุดแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกไปเป็นดิจิตอลในรุ่น DSP56F805 จะมีอยู่ด้วยกัน 2 ชุดๆ ละ 4 อินพุต รวมทั้งหมดจะมี 8 อินพุต ซึ่งคุณสมบัติของชุดแปลงสัญญาณจากแอนะล็อก/ดิจิตอลที่อยู่ในตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลมีดังนี้

- มีความละเอียดขนาด 12 บิต
- มีอัตราการแซมปิ้งที่มากถึง 1.66 ล้านครั้งต่อวินาที
- ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาใช้งานสูงสุด 5 เมกะเฮิรตซ์
- ใช้ช่วงเวลาในการแปลงสัญญาณ 1 แชนเนล ประมาณ 1.7 ไมโครวินาที
- ใช้ช่วงเวลาในการแปลงสัญญาณ 8 แชนเนล ประมาณ 5.3 ไมโครวินาที



ภาพที่ 3.10 บล๊อกไดอะแกรมของกระบวนการแปลงแอนะล็อก/ดิจิตอล

จากภาพที่ 3.10 แสดงถึงส่วนประกอบของบล๊อกไดอะแกรมของกระบวนการแปลงแอนะล็อก/ดิจิตอล ที่มีขาอินพุตถึง 8 ขาและทำงานร่วมกับวงจร Sample และ Hold ผลลัพธ์ขนาด 12 บิต ที่ได้จากการแปลงจะถูกเก็บไว้ในบัฟเฟอร์เพื่อใช้ในกระบวนการทำงานต่อไป ขาทางด้านอินพุตสามารถแบ่งได้ 2 ชุด ใน 1 ชุดจะประกอบด้วยสัญญาณอินพุต 4 ขาโดยอาศัยการทำงานแบบมัลติเพ็กซ์ ส่วนขาสัญญาณอ้างอิงจะมีค่าของระดับแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) เท่ากับ 3.3 โวลต์ ซึ่งในส่วนของกระบวนการแปลงค่านั้นจะถูกควบคุมโดยรีจิตเตอร์คอนโทรล (ADCR1) และรีจิตเตอร์คอนโทรล (ADCR2) ดังภาพที่ 3.11 และ 3.12 โดยมีตารางที่ 3.12 และ 3.13 แสดงรายละเอียดของบิตที่ใช้งาน

ADC_BASE+$0	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Reset	0	STOP	0	SYNC	EOSIE	ZCIE	LLMTIE	HLMTIE	CHNCFG[3:0]				0	SMODE[2:0]		
Write		STOP	START	SYNC	EOSIE	ZCIE	LLMTIE	HLMTIE	CHNCFG[3:0]					SMODE[2:0]		
Reset	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1

ภาพที่ 3.11 รีจิตเตอร์ควบคุม (ADCR1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

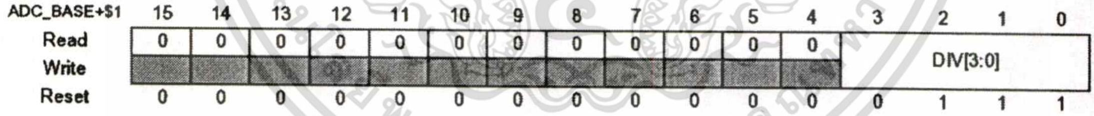
ตารางที่ 3.12 ตารางแสดงรายละเอียดบิตใช้งานของรีจิตเตอร์ควบคุม (ADCR1)

บิตที่	รายละเอียด
3, 15	เป็นบิตสงวน ไม่ได้ใช้งานและจะมีค่าเท่ากับศูนย์ในช่วงการทำงาน
14	บิตหยุด (Stop) การทำงานของกระบวนการแปลงแอนะล็อก / ดิจิตอล หลังจากที่อยู่ในโหมดหยุดการทำงานของกระบวนการแปลง ค่าของผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในกระบวนการทำงานสามารถส่งต่อไปยังกระบวนการประมวลผล ถ้าบิตนี้มีค่าเท่ากับ 1 จะเป็นการหยุดการทำงานของการแปลงแอนะล็อก / ดิจิตอล
13	บิตเริ่ม (Start) การทำงานของกระบวนการแปลงแอนะล็อก / ดิจิตอล ถ้าบิตนี้มีค่าเท่ากับ 1 จะเป็นการสั่งให้เริ่มทำการสแกนค่าแอนะล็อก / ดิจิตอล แต่ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 จะไม่มีการสแกนค่า ทั้งนี้จะต้องเทียบกับบิตที่ 14 (บิตหยุดการทำงาน) หากบิตหยุดการทำงานเป็น 1 จะทำให้คำสั่งนี้ไม่สามารถสั่งการได้
12	บิต SYNC (Synchronized status) เป็นบิตที่สั่งให้เริ่มการสแกนเหมือนกับบิตที่ 13 (Start) โดยอาศัยการสั่งงานจากตัวจับเวลา (Timer) หรือการสั่งงานจากระบบสื่อสาร (CAN Module) ในกรณีที่ต้องการให้มีการทำงานซิงโครไนซ์กัน ถ้าบิตนี้มีค่าเท่ากับ 1 จะเป็นการสั่งเริ่มการทำงาน
11	บิต EOSIE เป็นบิตที่ใช้ในการเซตการเกิดอินเตอร์รัพต์เมื่อมีการสิ้นสุดกระบวนการ ถ้าเป็น 1 จะเป็นการเซตอินเตอร์รัพต์ให้ทำงาน ถ้าเป็น 0 จะไม่มีการทำงานของอินเตอร์รัพต์เกิดขึ้นเมื่อสิ้นสุดกระบวนการแปลงค่าแอนะล็อก / ดิจิตอล (จะไม่สามารถใช้งานได้ในกรณีการแปลงนั้นทำงานเป็นวงรอบตลอดเวลา (Loop)
10	บิต ZCIE เป็นบิตที่ใช้ในการเซตการเกิดอินเตอร์รัพต์เมื่อมีค่าการแปลงนั้นมีค่าวิ่งผ่านค่าศูนย์ (Zero crossing) ถ้าบิตนี้เป็น 1 จะเป็นการเซตอินเตอร์รัพต์ให้ทำงาน ถ้าเป็น 0 จะไม่มีการทำงานของอินเตอร์รัพต์เกิดขึ้นเมื่อค่าการแปลงนั้นมีค่าวิ่งผ่านค่าศูนย์
9	บิต HLMTIE เป็นบิตที่ใช้ในการเซตการเกิดอินเตอร์รัพต์เมื่อค่าการแปลงมีค่ามากกว่าค่าที่ตั้งไว้ในรีจิตเตอร์ HLMT ถ้าบิตนี้เป็น 1 จะเป็นการเซตอินเตอร์รัพต์ให้ทำงาน ถ้าเป็น 0 จะไม่มีการทำงานของอินเตอร์รัพต์เกิดขึ้นเมื่อค่าการแปลงมีค่ามากกว่าค่าที่ตั้งไว้
8	บิต LLMTIE เป็นบิตที่ใช้ในการเซตการเกิดอินเตอร์รัพต์เมื่อค่าการแปลงมีค่าน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้ในรีจิตเตอร์ LLMT ถ้าบิตนี้เป็น 1 จะเป็นการเซตอินเตอร์รัพต์ให้ทำงาน ถ้าเป็น 0 จะไม่มีการทำงานของอินเตอร์รัพต์เกิดขึ้นเมื่อค่าการแปลงมีค่าน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.12 (ต่อ)

บิตที่	รายละเอียด
4-7	เป็นบิตที่ใช้ในการระบุสถานะค่าที่ได้จากการแปลง โดยสามารถระบุเป็นแบบ Differential หรือแบบ Single ended - xxx1 หมายถึง AN0 และ AN1 จะทำงานแบบ Differential - xxx0 หมายถึง AN0 และ AN1 จะทำงานแบบ Single ended - xx1x หมายถึง AN2 และ AN3 จะทำงานแบบ Differential - xx0x หมายถึง AN2 และ AN3 จะทำงานแบบ Single ended - x1xx หมายถึง AN4 และ AN5 จะทำงานแบบ Differential - x0xx หมายถึง AN4 และ AN5 จะทำงานแบบ Single ended - 1xxx หมายถึง AN6 และ AN7 จะทำงานแบบ Differential - 0xxx หมายถึง AN6 และ AN7 จะทำงานแบบ Single ended
0-2	บิต Scan Mode เป็นบิตที่ใช้ในการควบคุมการสแกนสัญญาณ A/D โดยสามารถเซตการทำงานเป็นแบบสแกนครั้งเดียว (Once Sequential, Once Simultaneous) หลังจากที่ได้รับคำสั่งจากบิตที่ 12 หรือบิตที่ 13 หรืออาจเซตการทำงานเป็นแบบลูป (Loop Sequential, Loop Simultaneous) โดยให้มีการวนสแกนค่าแบบไม่รู้จบหรืออาจเซตการทำงานเป็นแบบทริกซ์ (Triggered Sequential, Triggered Simultaneous) เพื่อต้องการรับค่า A/D เป็นจังหวะๆ ที่ต้องการ เป็นต้น



ภาพที่ 3.12 รีจิตเตอร์ควบคุม (ADCR2)

ตารางที่ 3.13 ตารางแสดงรายละเอียดบิตใช้งานของรีจิตเตอร์ควบคุม (ADCR2)

บิตที่	รายละเอียด
4-15	เป็นบิตสงวน ไม่ได้ใช้งานและจะมีค่าเท่ากับศูนย์ในช่วงการทำงาน
0-3	เป็นบิตที่ใช้ในการเซตค่าตัวหารของสัญญาณนาฬิกาของชิฟ DSP เพื่อใช้ในการอ้างอิงให้กับระบบ A/D ซึ่งค่าที่ตั้งนี้สามารถตั้งได้สูงสุดคือ 5 เมกะเฮิรตซ์

การทำงานของกระบวนการแปลงแอนะล็อก / ดิจิตอล นี้ยังมีรายละเอียดย่อยของรีจิตเตอร์อื่นๆ ที่จะต้องใช้ในการทำงานซึ่งจะประกอบไปด้วยรีจิเตอร์ดังนี้

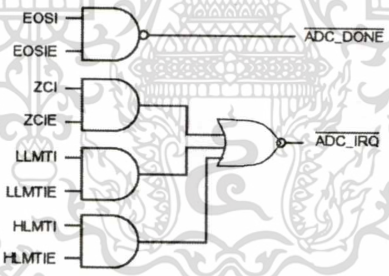
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รีจิตเตอร์ ADC Zero Crossing Control (ADZCC) เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของค่าที่วิ่งผ่านค่าศูนย์ ซึ่งในการเซตรูปแบบดังกล่าวสามารถระบุได้ถึงการเปลี่ยนแปลงจากค่าที่เป็นบวกไปสู่ค่าลบหรือจากค่าที่เป็นลบไปสู่ค่าบวกหรือทั้งสองอย่าง หากรีจิเตอร์ควบคุม (ADCR1) มีการเซตค่าบิต ZCIE (บิตที่ 11) ไว้ กระบวนการเกิดอินเตอร์รัพต์จะเกิดการทำงานขึ้น ทั้งนี้การทำงานของอินเตอร์รัพต์ก็จะขึ้นอยู่กับค่าที่เซตในรีจิตเตอร์ ADZCC นี้ด้วย

- รีจิตเตอร์ ADC Channel List (ADLST1 & ADLST1) เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการตั้งลำดับการสแกนของ A/D เช่น ต้องการให้สแกนที่ขา ADC0 และ ADC4 ก่อนจึงจะไปขา ADC2 และ ADC6 เป็นต้น

- รีจิตเตอร์ ADC Sample Disable (ADSDIS) เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการเซตและรีเซตตำแหน่งขา A/D ในกรณีที่ไม่ได้มีการใช้งานทุกขา เพื่อให้ตัวประมวลผลรู้และจะได้ไม่ต้องสแกนขาสัญญาณนั้นๆ

- รีจิตเตอร์ ADC Status (ADSTAT) เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบสถานะการทำงานของอินเตอร์รัพต์และการแปลงค่า ในกรณีที่มีการเซตค่าระดับอ้างอิงสูงสุดและต่ำสุดไว้ หากรีจิเตอร์ควบคุม (ADCR1) ได้มีการเซตค่าบิตที่ 8, 9 ไว้ การทำงานของอินเตอร์รัพต์จะเกิดขึ้นหากค่าที่ได้จากการแปลงมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่าระดับอ้างอิงสูงสุดและต่ำสุด



ภาพที่ 3.13 โครงสร้างทางลอจิกของอินเตอร์รัพต์ที่เกิดจากรีจิตเตอร์ต่างๆ ใน A/D

- รีจิตเตอร์ ADC Limit Status (ADLSTAT) เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการหาตำแหน่งที่เกิดอินเตอร์รัพต์ของค่าระดับอ้างอิงสูงสุดและต่ำสุด เมื่ออินเตอร์รัพต์เกิดขึ้นจะต้องทำการตรวจสอบว่าขาสัญญาณใด (AN0 ถึง AN7) มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่าระดับอ้างอิงสูงสุดและต่ำสุด

- รีจิตเตอร์ ADC Zero Crossing Status (ADZCSTAT) เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการบอกตำแหน่งขาสัญญาณที่ก่อให้เกิดการอินเตอร์รัพต์ขึ้น เมื่ออินเตอร์รัพต์เกิดขึ้นจะต้องทำการตรวจสอบว่าขาสัญญาณใด (AN0 ถึง AN7) มีการวิ่งผ่านศูนย์ (Zero Crossing) จะใช้ในกรณีที่มีการเซตบิตที่ 10 ของรีจิตเตอร์ควบคุม (ADCR1)

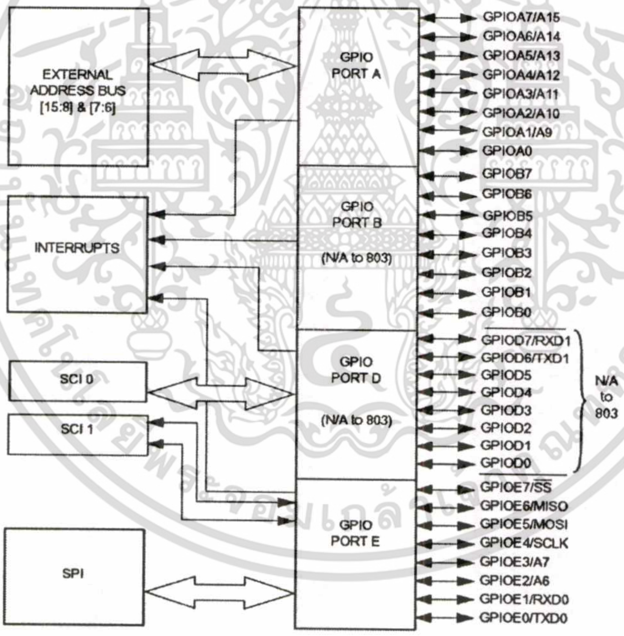
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รีจิตเตอร์ ADC Result (ADRSLT) เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการเก็บผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการแปลงสัญญาณ A/D โดยจะมีรีจิตเตอร์ดังกล่าวนี้ทั้งหมด 8 ตำแหน่ง ซึ่งก็หมายถึงมีค่าสัญญาณอินพุต 8 ขานั้นเอง (AN0 ถึง AN7)

- รีจิตเตอร์ ADC Low & High Limit (ADLLMT) เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการเก็บค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบค่าอ้างอิงต่ำสุดและค่าอ้างอิงสูงสุด โดยรีจิตเตอร์ดังกล่าวนี้จะมีตำแหน่งที่ใช้ในการเก็บข้อมูลอย่างละ 8 ตำแหน่งคือ รีจิตเตอร์ ADHLMT ที่เก็บค่าสูงสุด 8 ตำแหน่งและรีจิตเตอร์ ADLLMT ที่เก็บค่าต่ำสุดอีก 8 ตำแหน่ง

3.6.2 พอร์ตอินพุต / เอาท์พุตอิสระ (GPIO)

พอร์ตอินพุต / เอาท์พุตอิสระหรือ General Purpose Input / Output (GPIO) เป็นขาสัญญาณอิสระที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ที่ต่อร่วมกับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลโดยสามารถแสดงบล๊อกการเชื่อมต่อภายในโมดูลของ GPIO ได้ดังภาพที่ 3.14

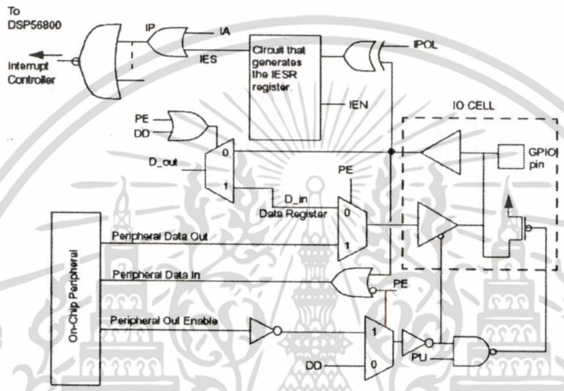


ภาพที่ 3.14 บล๊อกไดอะแกรมแสดงการเชื่อมต่อภายในโมดูลของ GPIO (DSP56F805)

ในภาพที่ 3.14 จะแสดงถึงขา GPIO ตั้งแต่พอร์ต A ถึงพอร์ต E การใช้ขา GPIO นี้จะต้องมีการกำหนดขาการใช้งานเฉพาะให้กับขานั้นๆ เนื่องจากในสภาวะการใช้งานปกติ ขาดังกล่าวจะมีหน้าที่เฉพาะอยู่แล้ว เช่น GPIOA1 - GPIOA7 ก็คือขาแอดแดรส A9 – A15 ในสภาวะการใช้งานปกติ หากต้องการใช้งานให้ GPIOA1 – GPIOA7 เป็นขาอินพุตเพื่อใช้ในการติดต่อข้อมูลกับอุปกรณ์ภายนอกจะต้องมีการเซตค่าการทำงานให้กับขาดังกล่าวและเมื่อมีการใช้งานเสร็จจะต้องมีการรีเซตค่าดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวอีกครั้งเพื่อให้กลับมาอยู่ในสภาวะปกติ โดยปกติการใช้งานจะเลือกใช้ขาสัญญาณอินพุต/เอาท์พุตอิสระโดยมีการกำหนดค่าสภาวะตายตัวให้แก่ขานั้นๆ เนื่องจากการใช้งานจริงขาสัญญาณบางขาของชิฟไม่ได้ถูกใช้งานทั้งหมด วิธีการเซตค่าสภาวะตายตัวให้แก่ขานั้นๆ จะทำให้ทำงานเป็นไปอย่างสะดวกและไม่สับสนในเรื่องของขาสัญญาณที่ใช้ในการทำงาน สภาวะการทำงานของขา GPIO นี้จะมีอยู่ 3 สภาวะได้แก่ เป็นขาอินพุต, เป็นขาอินเตอร์รัพต์ หรือเป็นขาเอาท์พุตก็ได้ขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าในรีจิตเตอร์ GPIO pull-up Enable (PUR), รีจิตเตอร์ Data Direction (DDR) และรีจิตเตอร์ Peripheral Enable (PER) โดยโครงสร้างทางลอจิกสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.15 และในตารางที่ 3.14 จะเป็นการแสดงถึงการเซตขา GPIO ให้อยู่ในสถานะต่างๆ



ภาพที่ 3.15 โครงสร้างทางลอจิกของขาสัญญาณ GPIO

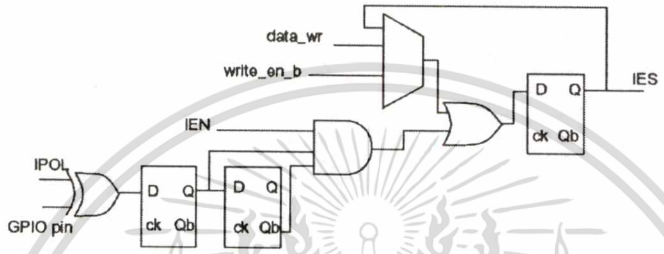
ตารางที่ 3.14 ตารางแสดงการเซตค่ารีจิตเตอร์เพื่อกำหนดสถานะของ GPIO

Peripheral Out Disable	PER	PUR	DDR	GPIO Pin State	GPIO Pin Pull-Up
x	0	0	0	Input	Disabled
x	0	0	1	Output	Disabled
x	0	1	0	Input	Enabled
x	0	1	1	Output	Disabled
0	1	x	x	Output	Disabled
1	1	0	x	Input	Disabled
1	1	1	x	Input	Enabled

ในการเซตขา GPIO ให้เป็นขาอินเตอร์รัพต์นั้น ขา GPIO สามารถแบ่งการทำงานของอินเตอร์รัพต์ออกได้ 2 แบบคือ อินเตอร์รัพต์ที่เกิดจากซอฟต์แวร์ โดยเกิดขึ้นจากการทดสอบและอินเตอร์รัพต์ที่เกิดจากทางด้านฮาร์ดแวร์จากการติดต่อกันของขาสัญญาณ GPIO ด้วยกัน อินเตอร์รัพต์ที่เกิดจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางด้านซอฟต์แวร์จะเกิดจากการทดสอบโดยการเขียนค่าๆ หนึ่งในรีจิตเตอร์ Interrupt Assert (IAR) และจะมีรีจิตเตอร์ Interrupt Pending (IPR) เป็นตัวบันทึกค่าของรีจิตเตอร์ IAR ไว้ ค่าของรีจิตเตอร์ IPR นี้สามารถเคลียร์ได้โดยการเขียนค่าศูนย์ลงในรีจิตเตอร์ IAR ในระหว่างการทดสอบค่าในรีจิตเตอร์ IAR เมื่อขา GPIO ถูกเซตเป็นขาสัญญาณอินเตอร์รัพต์ ค่าภายในรีจิตเตอร์ IAR จะต้องเซตค่าเท่ากับศูนย์และในรีจิตเตอร์ Interrupt Enable (IENR) และรีจิตเตอร์ Interrupt Polarity (IPOLR) จะต้องเซตค่าเท่ากับหนึ่ง สำหรับการทำงานของอินเตอร์รัพต์จะทำงานที่สถานะต่ำ (Low) โดยในภาพที่ 3.16 จะเป็นการแสดงถึงวงจรการทำงานตรวจจับการทำงาน



ภาพที่ 3.16 โครงสร้างทางลอจิกสำหรับวงจรตรวจจับการทำงานของขา GPIO

การเซตและรีเซตค่าในรีจิตเตอร์ที่ใช้กับขาสัญญาณ GPIO นี้ จะกระทำเฉพาะในส่วนของ 8 บิตล่างเท่านั้น โดย 8 บิตบนจะเป็นบิตสงวน ซึ่งการทำงานจะมีรีจิตเตอร์ใช้งานเกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- รีจิตเตอร์ GPIO_Pull-Up Enable เป็นรีจิตเตอร์สำหรับการเซตและรีเซตการทำงานของชุด - พูล-อัพ (Pull-Up) โดยจะมีการทำงานร่วมกับรีจิตเตอร์ Data Direction (DDR)
- รีจิตเตอร์ Data เป็นรีจิตเตอร์เก็บค่าสถานะลอจิกที่ได้จากขาสัญญาณ GPIO
- รีจิตเตอร์ Data Direction เป็นรีจิตเตอร์สำหรับการเซตการทำงานของขาสัญญาณ GPIO ถ้ารีจิตเตอร์มีค่าเท่ากับ 1 จะเป็นการสั่งให้ขา GPIO ทำงานเป็นขาเอาท์พุต
- รีจิตเตอร์ Peripheral Enable เป็นรีจิตเตอร์สำหรับการเซตการทำงานของขาสัญญาณ GPIO หากมีค่าเป็น 0 การทำงานจะต้องมีการร่วมกับรีจิตเตอร์ Data Direction และรีจิตเตอร์ GPIO_Pull-Up Enable ในการกำหนดสถานะของขา แต่ถ้าเป็น 1 การทำงานจะไม่ขึ้นอยู่กับรีจิตเตอร์ดังที่กล่าวมา แต่จะขึ้นอยู่กับ I/O ของข้อมูลที่ได้จากขาสัญญาณ GPIO
- รีจิตเตอร์ Interrupt Assert เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการอ่านและเขียนสำหรับกระบวนการทดสอบ
- รีจิตเตอร์ Interrupt Enable เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดค่าสภาวะของการเกิดอินเตอร์รัพต์จากขาสัญญาณ GPIO ถ้าเป็น 1 จะยอมให้มีการเกิดอินเตอร์รัพต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

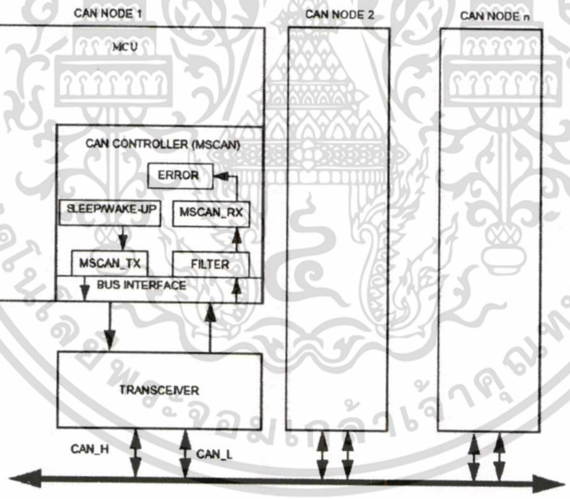
- รีจิตเตอร์ Interrupt Polarity เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดสภาวะการอินเตอร์รัพต์ โดยสามารถเซตการทำงานของอินเตอร์รัพต์ว่าต้องการให้ทำงานในสภาวะต่ำหรือสูง

- รีจิตเตอร์ Interrupt Pending เป็นรีจิตเตอร์ที่สามารถอ่านได้เพียงอย่างเดียว ซึ่งข้อมูลที่ได้มานี้จะมาจากขาสัญญาณที่เกิดการอินเตอร์รัพต์เข้ามา รีจิตเตอร์นี้สามารถเคลียร์ได้โดยการเขียนค่า 0 ในรีจิตเตอร์ IAR

- รีจิตเตอร์ Interrupt Edge Sensitive เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการตรวจจับการทำงานของวงจรตรวจสอบในภาพที่ 3.16 หากรีจิตเตอร์ IENR มีการเซตค่าเท่ากับ 1 รีจิตเตอร์นี้จะมีการตรวจจับและบันทึกค่าการอินเตอร์รัพต์ด้วย โดยรีจิตเตอร์นี้สามารถอ่านและเขียนได้โดยตรงเมื่อมีการเซตการทำงาน

3.6.3 ชุด Controller Area Network (CAN)

ชุดสัญญาณ Controller Area Network หรือ CAN เป็นขาสัญญาณที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลที่เป็นแบบโพรโตคอลซึ่งคล้ายกับเฟรมในระบบเครือข่าย แต่สัญญาณที่ใช้ดังกล่าวนี้จะใช้โพรโตคอลแบบ CAN 2.0 A/B โดยจะมีรูปแบบการส่งสัญญาณดังนี้



ภาพที่ 3.17 ระบบ Controller Area Network (CAN) แบบ N โหนด

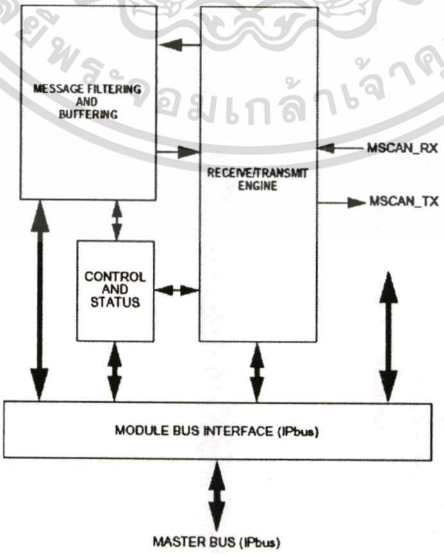
เมื่อสัญญาณในการส่งพร้อม ตัวเครือข่ายอื่นจะต้องมีการคอยรับ (ทางอุดมคติ) โดยตัวเครือข่ายอื่นจะส่งเฟรมสัญญาณที่มีค่า 1 ออกมาและมีการอ่านค่าที่ส่งออกไปกลับเข้ามา หากมีค่าเท่ากับ 0 ตัวเครือข่ายนั้นจะหยุดการส่งสัญญาณ และบอกกับตัวเองว่านั้นไม่ใช้เฟรมที่ตัวเองจะต้องรับ แต่หากมีการอ่านค่าได้เท่ากับ 1 จะเป็นการบอกให้ตัวที่จะส่งสัญญาณนั้นทำการส่งสัญญาณออกมาได้ทันที ซึ่งสัญญาณที่ใช้ในการส่งนี้จะมีขนาดบิตอยู่ 2 ขนาดได้แก่ โพรโตคอลแบบ CAN 2.0 A ใช้ 11 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการรับส่งเฟรมและโพรโตคอลแบบ CAN 2.0 B ใช้ 29 บิตในการรับส่งเฟรม โดยคุณสมบัติของการรับส่งแบบ CAN 2.0 A/B มีดังนี้

- มีการทำงานเป็นลักษณะโมดูล
- ความเร็วในการรับส่งข้อมูล 1 เมกะไบต์ต่อวินาที
- มีความยืดหยุ่นในการทำงานสูงโดยสามารถรองรับการฟิลเตอร์ที่ 32, 16 และ 8 บิตได้
- มีการแยกสัญญาณการส่งสำหรับช่วงเวลาผิดพลาดที่เกิดจากการส่งและการรับสัญญาณ
- ทำงานได้ 3 โหมด คือ Sleep, Soft Reset และ Power Down
- เฟรมที่ใช้ในการส่งข้อมูลจะเป็นแบบมาตราฐานหรือเป็นแบบ Extend ก็ได้
- รองรับการทำงานแบบเฟรมรีโมต
- มีบัฟเฟอร์ 2 ชุดในการรับข้อมูลและ 3 ชุดในการส่งข้อมูล

จากภาพที่ 3.17 เป็นระบบ Controller Area Network โดยมีการทำงานร่วมกับระบบ CAN ในชุดอื่นๆ ซึ่งการทำงานจะอาศัยบัสข้อมูลและตัวทรานซีพเวอร์ในการรับส่งข้อมูล โดยทางด้านอินพุตก่อนที่จะมีการรับค่ามาเก็บไว้ในรีจิตเตอร์จะต้องมีการนำเฟรมที่รับมานี้มาทำการฟิลเตอร์ โดยค่าที่รับมานี้จะอยู่ในบัฟเฟอร์ขนาด 13 บิต ซึ่งจะมีลักษณะการทำงานแบบเข้าก่อนออกก่อน (FIFO) จากนั้นระบบ CAN จะทำการตรวจสอบข้อมูลและทำการส่งข้อมูลเข้าไปยังตัวประมวล หากข้อมูลที่รับมีการผิดพลาด ระบบ CAN ก็จะมีการบันทึกไว้เช่นกันดังแสดงในภาพที่ 3.18 ส่วนในกรณีของการส่งข้อมูลก็เช่นกันจะมีการนำข้อมูลมาเก็บไว้ที่บัฟเฟอร์ถึง 3 ตัวแล้วทำการมัลติเพ็กซ์ข้อมูลต่างๆ นั้นออกไปในเฟรมเดียวกัน ซึ่งในรายละเอียดปลีกย่อยของ CAN นี้สามารถหาได้จากเอกสารของบริษัท โมโตโรลา จำกัดที่ได้อ้างอิงไว้ในหน้าเอกสารอ้างอิง [2]



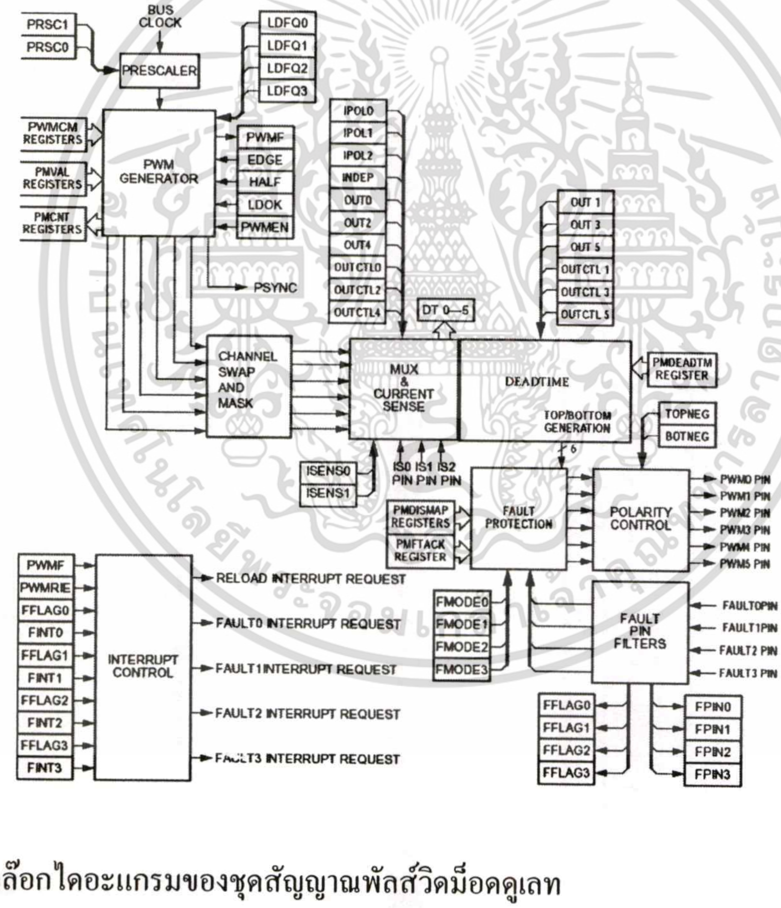
ภาพที่ 3.18 บล๊อกไดอะแกรมการทำงานของระบบ Controller Area Network

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.4 พัลส์วิดม็อดดูเลชั่น (PWM)

ชุดสร้างสัญญาณนี้เป็นชุดที่มีมาพร้อมกับตัวประมวลสัญญาณดิจิตอล DSP56F80x โดยสัญญาณพัลส์ที่ได้นี้จะเกิดจากชุดของคำสั่งที่ใช้สร้างอีกทีหนึ่ง ซึ่งชุดขาสัญญาณพัลส์วิดม็อดดูเลทมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- สัญญาณพัลส์วิดม็อดดูเลทสามารถเซตให้มีการทำงานแบบขอบขาคู่หรือขอบขาเดียว
- มีค่าความละเอียดในการทำงานถึง 15 บิต
- ควบคุมการทำงานโดยผ่านทางซอฟต์แวร์ได้ในกรณีที่ต้องการควบคุมพัลส์โดยตรง
- สามารถควบคุมขั้ว (Polarity) ให้เป็นแบบมีพัลส์บวกที่สถานะบิต 0 หรือ 1 ได้
- รองรับกระแสใช้งานได้ถึงขาละ 20 มิลลิแอมแปร์
- สามารถควบคุมช่วงการประวิงเวลา (Dead Time) ได้ โดยกำหนดผ่านทางซอฟต์แวร์

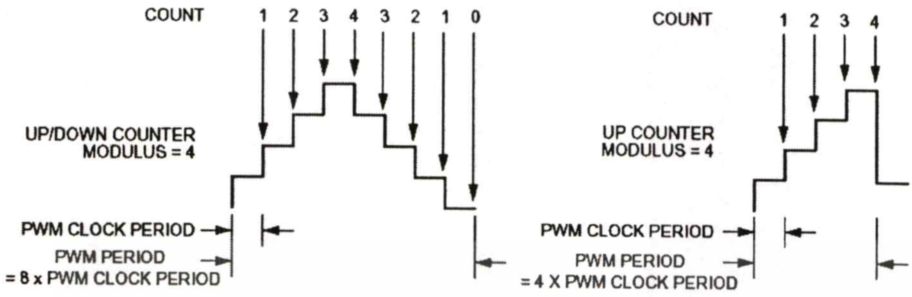


ภาพที่ 3.19 บล๊อกไดอะแกรมของชุดสัญญาณพัลส์วิดม็อดดูเลท

ในตัวประมวลสัญญาณดิจิตอลรุ่น DSP56F805 จะมีชุดสร้างสัญญาณพัลส์วิดม็อดดูเลทนี้อยู่ถึง 12 ขา (PWMA0 – PWMA5, PWMB0 – PWMB5), ชุดการทำงานในการตรวจจับทิศทางกระแส (ต้องใช้วงจรภายนอกรวม) และชุดตรวจจับการลัดวงจรอีก 12 ขา โดยแยกเป็น 6 ขาสำหรับชุดตรวจจับทิศทางกระแสเพื่อชดเชยค่าการประวิงเวลา (ISA0 – ISA2, ISB0 – ISB2) และส่วนที่เหลืออีก 6 ขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(FaultA0-A3 และ FaultB0-B3) นั้นจะเป็นชุดในการตรวจจับการลัดวงจรโดยจะทำหน้าที่รับสัญญาณลอจิกในกรณีที่มีการลัดวงจรหรือโอเวอร์โหลดเกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้มีการหยุดสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการขับนำสวิตซ์อย่างเฉียบพลัน เพื่อทำให้อุปกรณ์กำลังต่างๆ รอดพ้นจากความเสียหาย



(ก) คาบเวลาเป็นแบบ Center Aligned (ข) คาบเวลาเป็นแบบ Edge Aligned

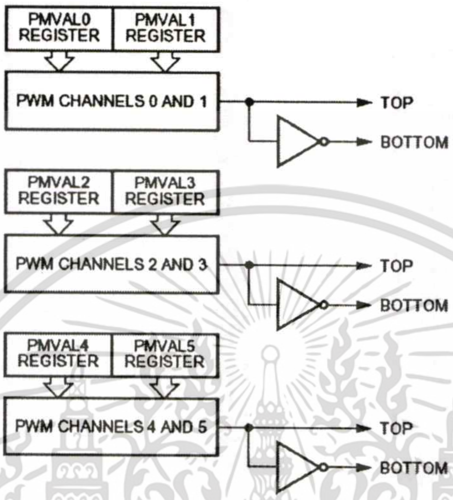
ภาพที่ 3.20 สัญญาณพาหะ(สามเหลี่ยม)ที่ใช้ในการกำหนดคาบเวลาของสวิตชิ่ง

ในเรื่องของการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้ DSP จำเป็นที่จะต้องรู้จักพื้นฐานการสร้างแพทเทอร์นการทำงานซึ่งได้แก่ การกำหนดคาบของคลื่นพาหะ (carries) ซึ่งใน DSP นี้สามารถกำหนดรูปแบบของสามเหลี่ยมที่ใช้ในการสร้างคลื่นพาหะอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบ คือ แบบ Edge Aligned จะเป็นการนับค่าจากศูนย์จนถึงค่าที่กำหนดไว้แล้วเริ่มนับใหม่หรือสัญญาณแรม (Ramp) และอีกแบบคือแบบ Center Aligned จะเป็นการนับค่าจากศูนย์จนถึงค่าที่กำหนดแล้วทำการลดค่าลงจนสู่ศูนย์แล้วเริ่มนับใหมอีกครั้งหรือสัญญาณสามเหลี่ยมดังที่แสดงในภาพที่ 3.20 คาบสัญญาณพาหะที่ได้มานี้จะมาจากการกำหนดค่าในรีจิตเตอร์เคาเตอร์ (PWMCM) โดยการควบคุมแบบ Edge Aligned คาบสัญญาณคลื่นพาหะที่ได้จะมีค่าเท่ากับค่าที่เขียนในรีจิตเตอร์เคาเตอร์ ส่วนสัญญาณแบบ Center Aligned จะมีคาบสัญญาณคลื่นพาหะเป็นสองเท่าของค่าที่เขียนในรีจิตเตอร์เคาเตอร์ เช่น กำหนด PWMCM = 0x0FA0 H และมีความเร็วในการทำงานที่ 40 เมกะเฮิรตซ์ (25 นาโนวินาที) หากใช้การควบคุมแบบ Edge Aligned จะได้สัญญาณแรมที่มีคาบเวลาเท่ากับ 100 ไมโครวินาที แต่ถ้าใช้การควบคุมแบบ Center Aligned จะได้สัญญาณสามเหลี่ยมที่มีคาบเวลาเท่ากับ 200 ไมโครวินาที หรือมีความถี่สัญญาณคลื่นพาหะเท่ากับ 5 กิโลเฮิรตซ์ นั้นเอง

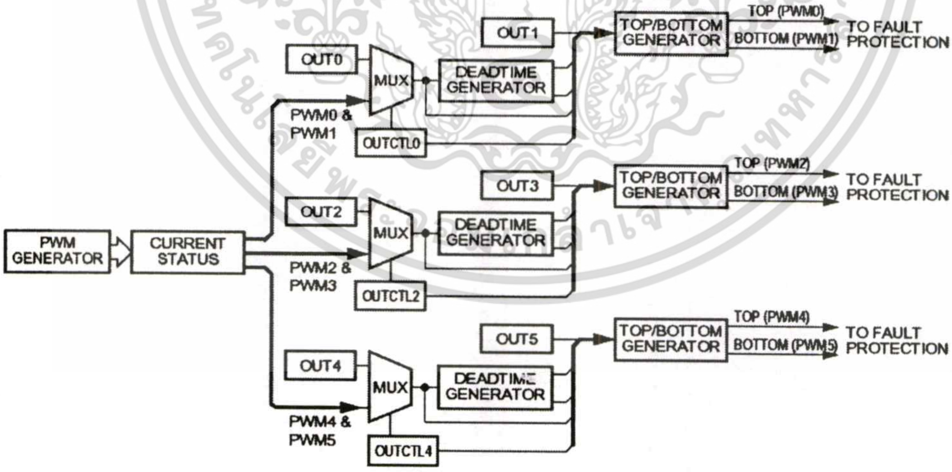
การสร้างสัญญาณพีดับบิวเอ็มจะได้มากจากการเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอ้างอิง ($V_{control}$) หรือสัญญาณควบคุมกับสัญญาณคลื่นพาหะสามเหลี่ยม ซึ่งใน DSP ค่าของสัญญาณอ้างอิงสามารถกำหนดค่าได้ในริจิตเตอร์ PWMVAL0-5 โดยค่าตัวเลข 1, 3 และ 5 จะเป็นคู่กลับของสัญญาณ (Top and Bottom) ดังภาพที่ 3.21 การจะสร้างพัลส์พีดับบิวเอ็มจะต้องมีการกำหนดความถี่ของสัญญาณคลื่นพาหะที่ใช้ จากนั้นจะต้องมีการกำหนดค่าในรีจิตเตอร์ PWMVAL ซึ่งค่าในรีจิตเตอร์นี้จะต้องมีการอัพเดตอยู่เสมอ เช่น ความถี่สัญญาณคลื่นพาหะเท่ากับ 5 กิโลเฮิรตซ์ และมีอัตราการสุ่มเพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัพเดตสัญญาณไซน์อ้างอิงทุกๆ 200 ไมโครวินาที จะทำให้ได้สัญญาณพีดับบิวเอ็มที่ได้ในการขับนำสวิตซ์กำลังออกมา และในภาพที่ 3.22 จะเป็นการแสดงถึงบล๊อกเดดไทม์ของชุดสัญญาณพีดับบิวเอ็มโดยอาศัยรีจิตเตอร์เดดไทม์ (PWMDEADTM) ในการสร้างช่วงเวลาเผื่อเพื่อให้สวิตซ์ในกิ่งเดียวกันทำงานล้าหลังกันเป็นช่วงเวลาหนึ่งก่อนที่จะมีการส่งสัญญาณพีดับบิวเอ็มให้กับสวิตซ์ที่อยู่ในกิ่งเดียวกันทำงานต่อไป



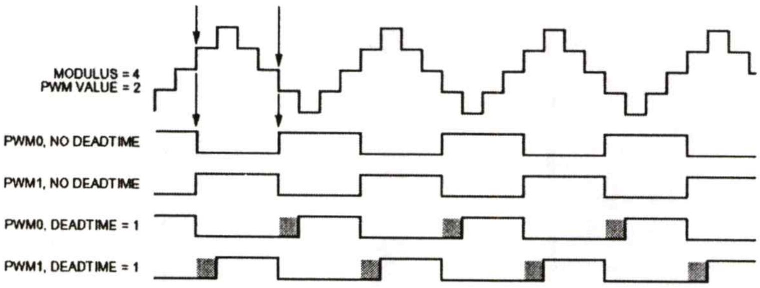
ภาพที่ 3.21 บล๊อกสัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากรีจิตเตอร์ PWMVAL



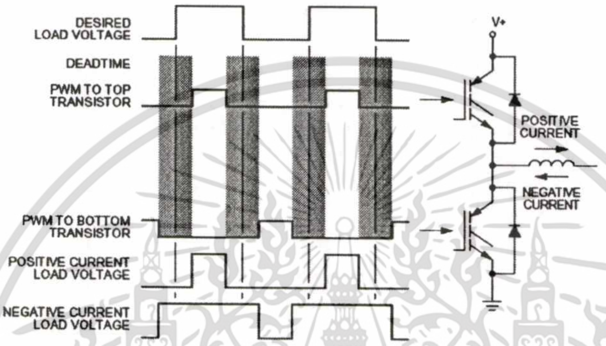
ภาพที่ 3.22 บล๊อกการกำเนิดสัญญาณเดดไทม์

ในภาพที่ 3.23 จะแสดงถึงสัญญาณพีดับบิวเอ็มที่มีการเพิ่มช่วงประวิงเวลาให้กับชุดสัญญาณโดยมีการเว้นช่วงสัญญาณนาฬิกาเท่ากับ 1 ซึ่งสามารถสังเกตได้จากส่วนที่แรเงาของรูป ส่วนภาพที่ 3.24 แสดงสภาวะการทำงานของวงจรเดดไทม์กับสวิตซ์ที่ใช้ในการทำงานของชุดอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.23 สัญญาณพาหะ (สามเหลี่ยม) และพัลส์พีดับบิวเอ็มที่มีการเพิ่มช่วงเวลาเดดไทม์



ภาพที่ 3.24 สภาวะการประวิงเวลาที่ใช้ในการขับนำสวิตซ์ในชุดอินเวอร์เตอร์

การเซตค่าต่างๆ เพื่อที่จะใช้ในการควบคุมการสร้างสัญญาณพีดับบิวเอ็มจะต้องอาศัยรีจิตเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสัญญาณจำนวนมาก ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวนี้จะกล่าวเฉพาะรีจิตเตอร์ที่สำคัญเท่านั้นซึ่งได้แก่

- รีจิตเตอร์ PWM Control (PMCTL) เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมสถานะการทำงานของชุดสัญญาณพีดับบิวเอ็มดังภาพที่ 3.25 และรายละเอียดของบิตจะแสดงในตารางที่ 3.15

PWM_BASE+$0	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Read / Write	LDFQ[3:0]				HALF	IPOL0	IPOL1	IPOL2	PRSC[1:0]		PWM-RIE	PWMF	ISENS[1:0]		LDOK	PWM-EN
Reset	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ภาพที่ 3.25 รีจิตเตอร์ควบคุมการทำงานของชุดสัญญาณพีดับบิวเอ็ม (PWM Control Register)

ตารางที่ 3.15 ตารางแสดงรายละเอียดการใช้งานบิตต่างๆ ของรีจิตเตอร์ PWM Control

บิตที่	รายละเอียด
12-15	บิต Load Frequency เป็นบิตที่สามารถอ่าน/เขียนจำนวนครั้งของคาบสัญญาณพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.15 (ต่อ)

บิตที่	รายละเอียด
	ที่ต้องการให้ DSP มีการอัพเดตค่าใหม่โดยผ่านกระบวนการเกิดอินเตอร์รัพต์ เช่น เกิดอินเตอร์รัพต์ทุกๆ 4 ครั้งของคาบสัญญาณพาหะ เป็นต้น
11	บิต Haft Cycle Reload เป็นบิตที่สามารถอ่าน/เขียน ใช้ในการบอก DSP ในกรณีที่ต้องการให้มีการอัพเดตค่าใหม่ในช่วงครึ่งไซเกิลของสัญญาณพาหะ
8 - 10	บิต Current Polarity เป็นบิตที่เซตสถานะของแหล่งข้อมูลที่ใช้ในการทำงาน ถ้าเซตเป็น 1 จะเป็นการบอกให้รู้ว่าให้ส่งค่าในรีจิตเตอร์ PWM ชุดที่ 1, 3 และ 5 ออกไปในคาบต่อไป แต่ถ้าเซตเป็น 0 จะเป็นการบอกให้รู้ว่าให้ส่งค่าในรีจิตเตอร์ PWM ชุดที่ 2, 4 และ 6 ออกไปในคาบต่อไป
6-7	เป็นบิตที่ใช้ในการเซตความถี่ของสัญญาณนาฬิกาที่ป้อนให้กับชุดสร้างสัญญาณพีดับบิวเอ็มโดยสามารถเซตการทำงานได้ดังนี้ 00 หมายถึงสัญญาณนาฬิกาอ้างอิงของสัญญาณ PWM มีค่าเท่ากับความถี่ที่บัส หรือเท่ากับ 40 MHz. ให้กรณีที่ใช้ออตซิสเลเตอร์เท่ากับ 8 MHz. ให้กับ DSP 01 หมายถึงสัญญาณนาฬิกาอ้างอิงของสัญญาณ PWM มีค่าเท่ากับความถี่บัส / 2 10 หมายถึงสัญญาณนาฬิกาอ้างอิงของสัญญาณ PWM มีค่าเท่ากับความถี่บัส / 4 11 หมายถึงสัญญาณนาฬิกาอ้างอิงของสัญญาณ PWM มีค่าเท่ากับความถี่บัส / 8
5	เป็นบิตที่ใช้ในการเซตการทำงานของอินเตอร์รัพต์ในการอัพเดตค่าใหม่โดยจะมีการทำงานที่สัมพันธ์กับการเซตค่าในบิตที่ 12 ถึง 15
4	เป็นบิตบอกสถานะแฟลก (Flag) การเกิดอินเตอร์รัพต์ในการอัพเดตค่าใหม่และเป็นบิตที่ใช้ในการเคลียร์ค่าแฟลกเพื่อให้สามารถเกิดอินเตอร์รัพต์ในครั้งต่อไปได้
2-3	เป็นบิตที่ใช้ในเซตการตรวจจับค่าความถูกต้องของทิศทางกระแส 0x หมายถึง จะไม่สนใจการตรวจจับ 10 หมายถึง จะทำการสุ่มตรวจจับทิศทางของกระแสในช่วงการประวิงเวลา 11 หมายถึง จะทำการสุ่มตรวจจับทิศทางของกระแสในช่วงครึ่งไซเกิลของ - สัญญาณแบบ Center Aligned หรือในช่วงท้ายของสัญญาณ Edge Aligned
1	เป็นบิตที่ใช้ในการบอกสถานะกับ DSP ว่าข้อมูลได้มีการโหลดเข้าไปใหม่แล้ว และให้ DSP ทำการใช้ข้อมูลใหม่ทันที
0	เป็นบิตที่ใช้ในเซตเริ่มการทำงานและหยุดการทำงานของชุดสัญญาณพีดับบิวเอ็ม

- รีจิตเตอร์ PWM Fault Control เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการเกิดและเคลียร์ค่าแฟลกของอินเตอร์รัพต์ในกรณีที่มีสถานะ High เกิดขึ้นที่ขา FaultA0-A3 ของ DSP56F805 ซึ่งในรีจิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ในทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตอร์นี้เองสามารถหยุดการทำงานของชุดสัญญาณ PWM ได้ และสามารถเซตการทำงานสถานะของฟอล์ตได้ เช่นหากสัญญาณฟอล์ตหายไปก็จะยอมให้ชุดสัญญาณ PWM ทำงานต่อไปได้ (Automatic fault clearing) หรือต้องการให้หยุดชุดสัญญาณ PWM ก่อนแล้วค่อยเคลียร์ฟอล์ตโดย Manual เป็นต้น

- รีจิตเตอร์ PWM Fault Status & Acknowledge เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการแสดงสถานะการเกิดลัดวงจร โดยจะทำงานร่วมกับรีจิตเตอร์ PWM Fault Control เพราะเมื่อขา FaultA0-A3 ของ DSP56F805 มีสภาวะเป็น High จะทำให้มีการสั่งกระโดดไปยังลูปอินเตอร์รัพต์ ซึ่งการเคลียร์ฟอล์ตโดย Manual นั้น จำเป็นจะต้องเซตบิตที่เกิดฟอล์ตให้มีสถานะเป็น High ในรีจิตเตอร์นี้ จึงจะถือว่าเป็นการเคลียร์ฟอล์ต แต่ถ้าสถานะของ FaultA0-A3 ยังคงอยู่ การเคลียร์ฟอล์ตนี้จะไม่เป็นผล

- รีจิตเตอร์ PWM Output Control เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของชุดสัญญาณทางด้านเอาท์พุต โดยผ่านกระบวนการทางด้านซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมโดยตรง เช่นสามารถควบคุมการทำงานของสัญญาณขาใดขาหนึ่งของขาสัญญาณ PWM ได้โดยตรง โดยผ่านการควบคุมจากบิตที่ใช้ระบุสถานะการทำงานของขาสัญญาณนั้นๆ

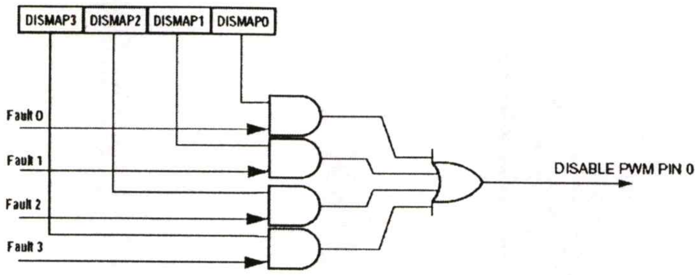
- รีจิตเตอร์ PWM Counter Modulo เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดคาบสัญญาณพาหะที่ใช้ในการกำหนดความถี่สวิตชิ่งของสัญญาณ PWM โดยสามารถกำหนดได้ตั้งแต่ (1 ถึง 7FFF ฐาน16)

- รีจิตเตอร์ PWM Value เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้กำหนดค่าสัญญาณควบคุม รีจิตเตอร์นี้จะมีจำนวนตำแหน่งที่ใช้ในการเก็บค่าเท่ากับขาสัญญาณทางด้านเอาท์พุต (PWMVAL0 – PWMVAL5) ซึ่งการทำงานจะอาศัยคาบสัญญาณพาหะที่ได้จากการสร้างของรีจิตเตอร์ PWM Counter Modulo ในการทำงานเพื่อสร้างพัลส์ต่างๆ เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของชุดอินเวอร์เตอร์

- รีจิตเตอร์ PWM Dead Time เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการสร้างคาบเวลาเดดไทม์ การเขียนค่าในรีจิตเตอร์นี้จะใช้เฉพาะ 8 บิตล่างเท่านั้น โดยสามารถกำหนดค่าได้ตั้งแต่ (0 ถึง FF ฐาน16) ซึ่งคาบการประวิงเวลานี้ จะมีการทำงานที่สัมพันธ์กันกับคาบสัญญาณพาหะที่ได้จากการกำหนดในรีจิตเตอร์ PWM Counter Modulo

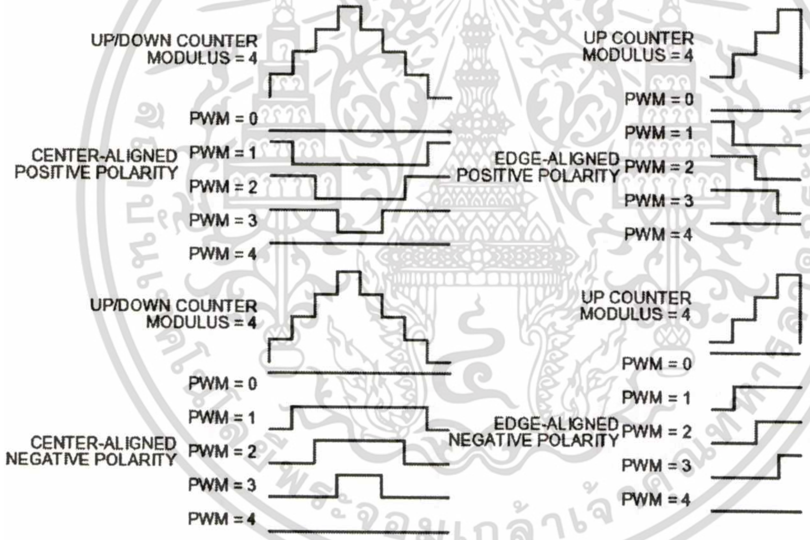
- รีจิตเตอร์ PWM Disable Mapping เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดสถานะการหยุดการทำงานของขาสัญญาณ PWM โดยจะมีการทำงานที่สัมพันธ์กับขา FaultA0-A3 ของ DSP56F805 เช่นหากมีการเซตบิตที่ 2 ของ PWM0 ที่ใช้ในการทำงานควบคู่กับ FaultA2 เมื่อขาสัญญาณ FaultA2 มีสถานะเป็น High จะทำให้ขาสัญญาณ PWM ที่กำหนดหยุดการทำงาน แต่ถ้าไม่ได้กำหนดให้มีการทำงานควบคู่กับขาสัญญาณ FaultA0 ในกรณีที่ FaultA0 มีสถานะเป็น High ขาสัญญาณ PWM0 ก็ยังคงทำงานอยู่โดยไม่สนใจฟอล์ตที่เกิดขึ้น แต่รีจิตเตอร์ PWM Fault Control และรีจิตเตอร์ PWM Fault Status & Acknowledge จะรับรู้ได้และจะทำงานในกระบวนการอินเตอร์รัพต์ต่อไป ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้สามารถกำหนดการทำงานของขาสัญญาณได้อิสระต่อกันได้ ดังภาพที่ 3.26 เป็นการแสดงลอจิกการทำงานของขาสัญญาณ PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.26 ลอจิกการทำงานของขาสัญญาณฟอล์ตที่ส่งผลในการหยุดสัญญาณ PWM

- รีจิตเตอร์ PWM Config เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้กำหนดขั้ว (Polarity) ของสัญญาณ PWM และใช้ในการกำหนดความสัมพันธ์การทำงานของขาสัญญาณว่าต้องการให้ขาสัญญาณทำงานแบบคู่กลับ (Complementary PWM Pair) หรือทำงานแบบอิสระ (Independent PWM) อีกทั้งยังใช้ในการกำหนดรูปแบบขั้วสัญญาณที่ออกด้วยดังแสดงในภาพที่ 3.27



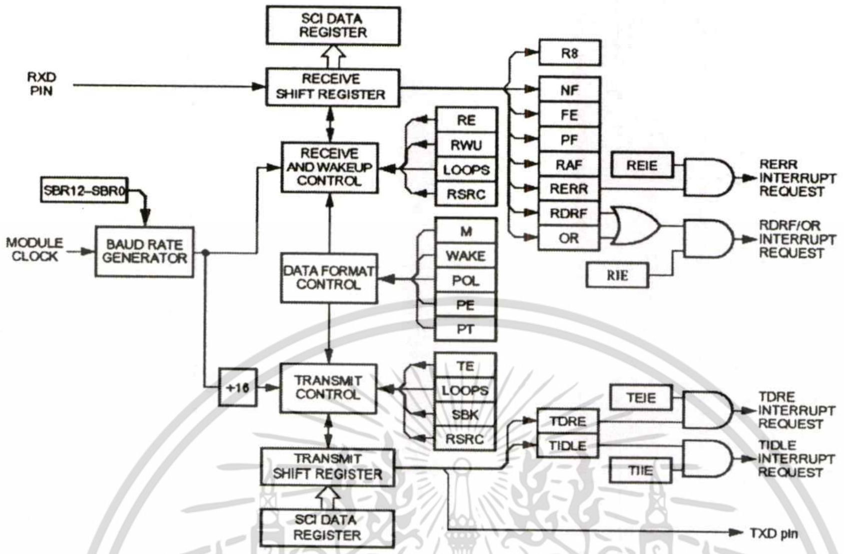
ภาพที่ 3.27 รูปคลื่นสัญญาณพาหะและสัญญาณเอาท์พุต (พีดับบิวเอ็ม) แบบกำหนดขั้ว (Polarity)

3.6.5 การรับส่งแบบอนุกรม (Serial Communications Interface)

ชุดการรับส่งแบบอนุกรมหรือ Serial Communications Interface (SCI) มีหน้าที่ในการแปลงข้อมูลที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารแบบอนุกรมกับอุปกรณ์อื่นๆ โดยการรับส่งข้อมูลนี้จะเป็นการรับส่งแบบอนุกรมระหว่างตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลกับอุปกรณ์ภายนอก การควบคุมการทำงานจะใช้ซอฟต์แวร์ในการควบคุมโดยผ่านรีจิตเตอร์ควบคุมดังภาพที่ 3.28 และในการทำงานนั้นจะทำงานร่วมกับการทำงานของอินเตอร์รัพต์ โดยมีคุณสมบัติในการทำงานต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

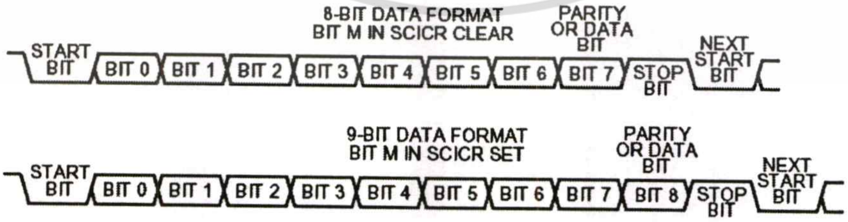
- สามารถทำงานแบบไป-กลับพร้อมกันได้ (Full Duplex)
- ความยาวข้อมูลที่ใช้ในการส่งมีตั้งแต่ 2 – 16 บิต
- มีการทำงานร่วมกับอินเตอร์รัพต์ในกรณีที่ข้อมูลที่ใช้ในการรับ-ส่งเกิดมีปัญหา



ภาพที่ 3.28 บล๊อกไดอะแกรมการทำงานภายในของการรับส่งแบบอนุกรม (SCI)

การควบคุมการทำงานของการรับส่งแบบอนุกรมนี้จะควบคุมการทำงานผ่านรีจิตเตอร์ 4 ตัวได้แก่

- SCI Baud Rate Register (SCIBR)
- SCI Control Register (SCICR)
- SCI Status Register (SCISR)
- SCI Data Register (SCIDR)



ภาพที่ 3.29 รูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการรับส่งแบบอนุกรม

การทำงานของข้อมูลที่ใช้ในการรับส่งนี้จะมีขนาดของข้อมูล 8 หรือ 9 บิต โดยประกอบด้วยบิตเริ่มต้นจำนวน 1 บิตและตามมาด้วยชุดของข้อมูลและปิดท้ายด้วยบิตหยุดการทำงาน ซึ่งการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเสริมบิตที่ใช้เช็คข้อมูล (Parity Bit) เข้าไปร่วมใช้งานได้ด้วยดังแสดงในภาพที่ 3.29 ซึ่งการรับส่งข้อมูลนี้จะเหมือนกับการรับส่งข้อมูลที่ใช้ในระบบคอมพิวเตอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ทั่วๆ ไป

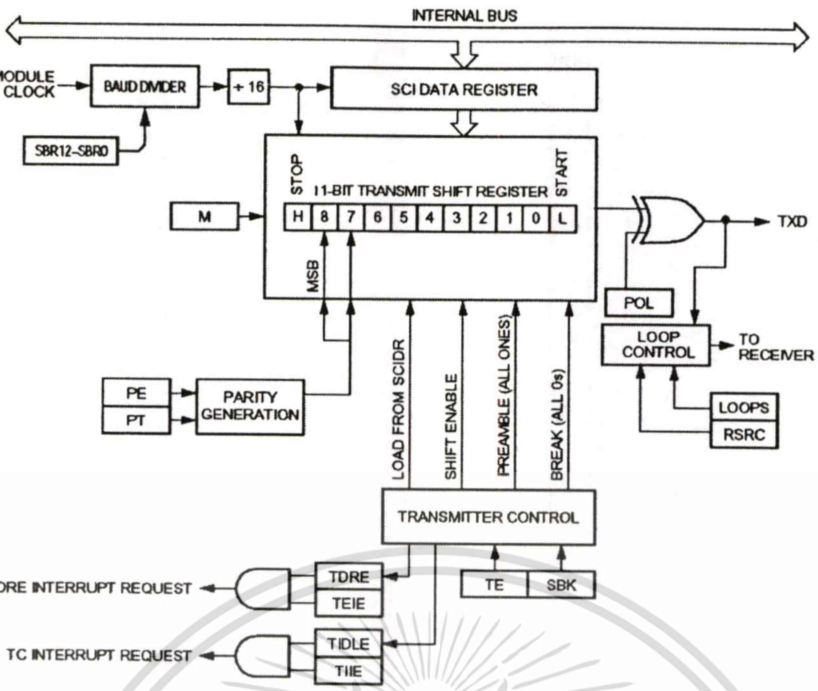
การกำหนดอัตราการรับส่งข้อมูลแบบอนุกรมสามารถกำหนดได้โดยการกำหนดค่าให้กับรีจิสเตอร์ SCIBR โดยอาศัยการพิจารณาข้อมูลการรับส่งร่วมกับสัญญาณนาฬิกาภายนอก ซึ่งค่าของอัตรารับส่งนี้สามารถกำหนดได้ในบิตของรีจิสเตอร์ SCIBR ตั้งแต่ค่า 0 จนถึง 8191 ทั้งนี้อาจจะใช้การหารสัญญาณนาฬิกาภายนอกกับตัวเลขใดๆ ก็ได้แต่ต้องมีการพิจารณาการทำงานร่วมกับอุปกรณ์ภายนอกด้วย โดยในตารางที่ 3.16 จะเป็นการแสดงค่าอัตราการรับส่งข้อมูลเมื่อมีสัญญาณนาฬิกาภายนอกเท่ากับ 40 เมกะเฮิรตซ์ โดยอาศัยการเซตค่าในรีจิสเตอร์ SCIBR

ตารางที่ 3.16 อัตราการรับส่งข้อมูลเมื่อสมมุติสัญญาณนาฬิกาภายนอกเท่ากับ 40 เมกะเฮิรตซ์

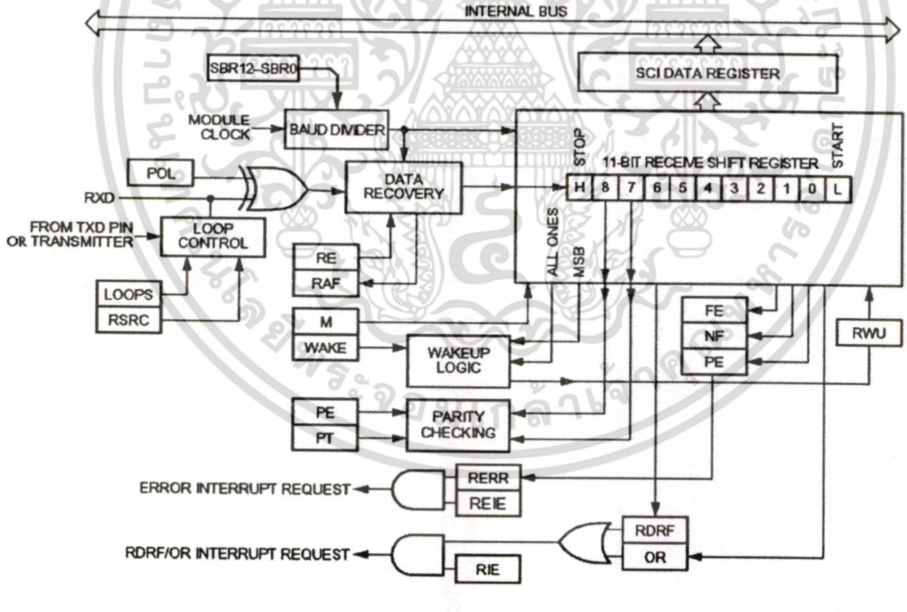
SBR Bits	Receiver Clock (Hz)	Transmitter Clock (Hz)	Target Baud Rate	Error (%)
65	615384.6	38461.5	38,400	0.16
130	307692.3	19230.8	19,200	0.16
260	153846.1	9615.4	9600	0.16
521	76775.4	4798.5	4800	0.03
1042	38387.7	2399.2	2400	0.03
2083	19203.1	1200.2	1200	0.02
4167	9599.2	600.0	600	0.01

การทำงานในการส่งข้อมูลข้อมูลนั้นจะอาศัยการเลื่อนของข้อมูลที่อยู่ในรีจิสเตอร์ SCIDR ในการส่งข้อมูลออกไปยังขาทางด้านเอาท์พุต โดยจะต้องทำการเซตค่าบิต TE ในรีจิสเตอร์ SCICR ให้มีค่าเท่ากับ 1 และเคลียร์ค่าแฟลก TDRE ในรีจิสเตอร์ SCISR จากนั้นให้ทำการเขียนข้อมูลลงในรีจิสเตอร์ SCIDR ข้อมูลดังกล่าวก็จะถูกส่งออกไป ในการส่งข้อมูลชุดถัดไปจะต้องทำการเคลียร์ค่าแฟลก TDRE ในรีจิสเตอร์ SCISR ใหม่และเขียนข้อมูลลงไปใหม่ โดยจะทำอย่างนี้ทุกครั้งในการส่งข้อมูล ในการส่งข้อมูลนี้หากข้อมูลที่ใช้ในการส่งนั้นมีการส่งเสร็จเรียบร้อยหรือข้อมูลในรีจิสเตอร์ SCIDR ว่าง บิต TEIE ในรีจิสเตอร์ SCISR จะมีค่าเป็น 1 นั้นหมายถึงเราสามารถเซตการทำงานให้เกิดอินเตอร์รัพต์ขึ้นได้ในกรณีที่มีการส่งข้อมูลเสร็จ ในการส่งข้อมูลนี้เราสามารถทำการหยุดการส่งข้อมูลชั่วคราวได้โดยการเซตบิต SBK ในรีจิสเตอร์ SCICR ให้มีค่าเท่ากับ 1 ข้อมูลที่ใช้ในการส่งชุดนั้นจะทำการส่งให้เสร็จก่อนแล้วจะหยุดทำการส่งข้อมูลชุดถัดไปและหากต้องการส่งข้อมูลต่อสามารถทำได้โดยการรีเซตบิต SBK ในรีจิสเตอร์ SCICR เช่นกันโดยการทำงานดังกล่าวแสดงได้ในภาพที่ 3.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.30 บล๊อกไดอะแกรมในการส่งข้อมูลแบบอนุกรม



ภาพที่ 3.31 บล๊อกไดอะแกรมในการรับข้อมูลแบบอนุกรม

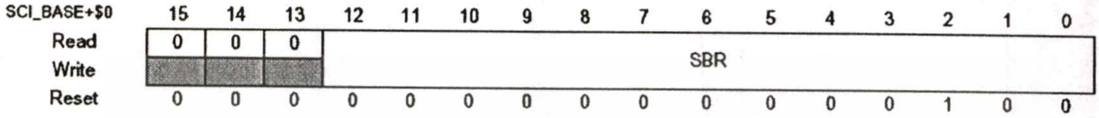
ส่วนทางด้านของการรับข้อมูลนั้นก็จะอาศัยหลักการเดียวกับการส่งแต่มีการทำงานสลับกัน โดยการทำงานจะมีการรับข้อมูลเข้ามาในรีจิตเตอร์ SCIDR แล้วทำการเลื่อนข้อมูลไปทางทางด้านบิตต่ำ จากนั้นก็รับข้อมูลบิตต่อไปเข้ามาโดยจะทำเช่นนี้จนกว่าข้อมูลจะครบ เมื่อมีการรับข้อมูลครบ บิต RDRF ในรีจิตเตอร์ SCICR จะมีค่าเท่ากับเป็น 1 นั้นหมายถึงหากเรามีการเซตบิต RIE ไว้ การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานของอินเตอร์รัพต์ก็จะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีการรับข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยในภาพที่ 3.31 จะแสดงถึงบล๊อกไดอะแกรมการรับข้อมูลแบบอนุกรมดังกล่าว

ดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นเกี่ยวกับการควบคุมการทำงานของชุด SCI นั้นจะต้องทำการควบคุมผ่านรีจิตเตอร์ซึ่งการเซตค่าต่างๆ ในรีจิตเตอร์จะมีดังนี้

- รีจิตเตอร์ SCI Baud Rate (SCIBR) เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการควมคุมอัตราการรับส่งข้อมูลแบบอนุกรมดังแสดงในภาพที่ 3.32 และรายละเอียดการทำงานของบิตในตารางที่ 3.17

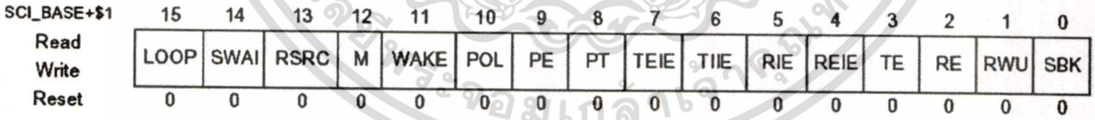


ภาพที่ 3.32 รีจิตเตอร์การควบคุมอัตราการรับส่งข้อมูล (SCIBR)

ตารางที่ 3.17 ตารางแสดงรายละเอียดการใช้งานในแต่ละบิตของรีจิตเตอร์ SCIBR

บิตที่	รายละเอียด
13-15	เป็นบิตสงวน ไม่ได้ใช้งานและจะมีค่าเท่ากับศูนย์ในช่วงการทำงาน
0-12	เป็นบิตที่ใช้ในการเซตค่าอัตราการรับส่งข้อมูลซึ่งสามารถเซตค่าได้ตั้งแต่ 1 - 8191

- รีจิตเตอร์ SCI Control (SCICR) เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานต่างๆ ของการรับส่งแบบอนุกรมซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังภาพที่ 3.33 และตารางที่ 3.18



ภาพที่ 3.33 รีจิตเตอร์การควบคุมการทำงานการรับส่งแบบอนุกรม (SCICR)

ตารางที่ 3.18 ตารางแสดงรายละเอียดการใช้งานในแต่ละบิตของรีจิตเตอร์ SCICR

บิตที่	รายละเอียด
15	บิต Loop เป็นบิตที่ใช้ในการเซตการรับส่งข้อมูลในชุด SCI เพื่อเป็นการตรวจสอบข้อมูลที่ใช้ในการส่งก่อนที่จะมีการส่งออกไป
14	บิต SWAI เป็นบิตที่ใช้เซตหรือรีเซตการหยุดทำงานในสภาวะโหมดรอคอย หากเซตเป็น 1 หมายถึงจะไม่หยุดการรับส่งข้อมูลในโหมดรอคอย แต่ถ้าเซตเป็น 0 จะเป็นการสั่งในหยุดการรับส่งข้อมูลในโหมดรอคอย

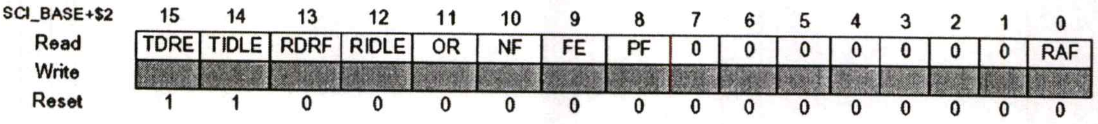
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.18 (ต่อ)

บิตที่	รายละเอียด
13	บิต RSRC เป็นบิตที่ใช้ร่วมกับบิตที่ 15 ในการแท็ปข้อมูลก่อนที่จะมีการส่ง
12	บิต M เป็นบิตที่ใช้ในการเซตลักษณะของข้อมูลที่ใช้ในการรับส่ง ถ้ามีค่าเท่ากับ 1 หมายถึง บิตเริ่มต้น 1บิต, บิตข้อมูล 9 บิต, บิตหยุดการทำงาน 1 บิต ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 หมายถึง บิตเริ่มต้น 1บิต, บิตข้อมูล 8 บิต, บิตหยุดการทำงาน 1 บิต
11	บิต WARK เป็นบิตที่ใช้ในการตรวจสอบเงื่อนไขการรับข้อมูลจากขา RXD
10	บิต POL เป็นบิตที่ใช้ในการกลับสภาวะของข้อมูลจาก L เป็น H และ H เป็น L
9	บิต PE เป็นบิตที่ใช้ในการเช็คข้อมูลในการรับส่ง (Parity)
8	บิต PT เป็นบิตที่ใช้ร่วมกับบิต PE ในการเช็คข้อมูลในการรับส่ง (Odd & Even)
7	บิตกำหนดการทำงานของอินเตอร์รัพต์เมื่อข้อมูลที่ใช้ในการส่งมีค่าว่าง
6	บิตกำหนดการทำงานของอินเตอร์รัพต์เมื่อข้อมูลที่ใช้ในการส่งมีการส่งเสร็จเรียบร้อย
5	บิต RIE เป็นบิตกำหนดการทำงานของอินเตอร์รัพต์เมื่อมีการรับข้อมูลมาครบ
4	บิต REIE เป็นบิตกำหนดการทำงานของอินเตอร์รัพต์เมื่อข้อมูลที่รับมามีการผิดพลาด
3	บิต TE เป็นบิตกำหนดการทำงานของอินเตอร์รัพต์ในการส่งข้อมูล
2	บิต RE เป็นบิตกำหนดการทำงานของอินเตอร์รัพต์ในการรับข้อมูล
1	บิต RWU เป็นบิตที่ใช้ในการเซตและรีเซตการทำงานของการตรวจสอบการรับข้อมูลจากขา RXD โดยสามารถเซตให้ทำงานตลอดเวลาหรือไม่ทำงานก็ได้
0	บิต SBK เป็นบิตที่ใช้ในการหยุดการส่งข้อมูลชั่วคราว

- รีจิตเตอร์ SCI Data (SCIDR) เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการบันทึกค่าที่ใช้ในการส่งและการรับข้อมูลแบบอนุกรมโดยจะใช้เฉพาะ 8 บิตทางด้านต่ำเท่านั้น

- รีจิตเตอร์ SCI Status (SCISR) เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการแสดงสถานะการทำงานต่างๆ ของการรับส่งแบบอนุกรมซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังภาพที่ 3.34 และตารางที่ 3.19



ภาพที่ 3.34 รีจิตเตอร์แสดงสถานะการทำงานการรับส่งแบบอนุกรม (SCISR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.19 ตารางแสดงรายละเอียดการใช้งานในแต่ละบิตของรีจิตเตอร์ SCISR

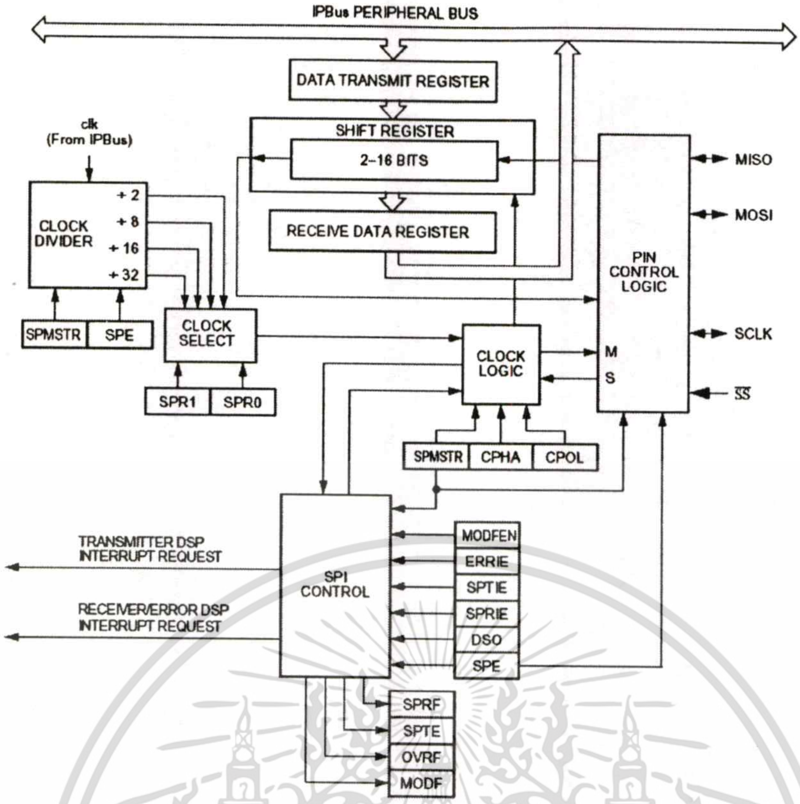
บิตที่	รายละเอียด
15	บิต TDRE บิตนี้จะมีการเซตเมื่อข้อมูลมีการส่งจากรีจิตเตอร์ SCIDR ออกไปยังขาทางด้านเอาท์พุตเสร็จเรียบร้อย
14	บิต TIDLE เป็นบิตที่แสดงสภาวะการส่งข้อมูล
13	บิต RDRF บิตนี้จะมีการเซตเมื่อข้อมูลมีการรับและบันทึกลงในรีจิตเตอร์ SCIDR
12	บิต RIDLE เป็นบิตที่แสดงสภาวะการรับข้อมูล
11	บิต OR เป็นบิตที่ใช้แสดงสถานะการเกิด Overrun ขึ้นในการรับข้อมูล
10	บิต NF เป็นบิตที่ใช้แสดงสถานะการเกิดการรบกวนขึ้นในการรับข้อมูล
9	บิต FE เป็นบิตที่ใช้แสดงสถานะการผิดพลาดของเฟรมที่ใช้ในการรับส่ง
8	บิต PF เป็นบิตที่ใช้แสดงสถานะของการนับบิตในการรับส่ง (Parity)
1-7	เป็นบิตสงวนไม่สามารถใช้งานได้
0	บิต RAF เป็นบิตที่ใช้แสดงสถานะของการเริ่มต้นรับ (Start) ว่ามีการใช้บิตเริ่มต้นในการส่งลอจิก 0 หรือ 1 มาก่อน

3.6.6 Serial Peripheral Interface (SPI)

การรับส่งแบบ Serial Peripheral Interface (SPI) มีหน้าที่ในการแปลงข้อมูลที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารแบบอนุกรมเช่นเดียวกับการรับรับส่งข้อมูลแบบ Serial Communications Interface (SCI) ดังที่แสดงในภาพที่ 3.35 แต่การรับส่งข้อมูลดังกล่าวจะมีการรับส่งสัญญาณนาฬิกาเพิ่มเข้าไปเพื่อให้การทำงานดังกล่าวมีการซิงโครไนส์กัน จากภาพที่ 3.35 จะเห็นได้ว่าขาทางด้านเอาท์พุตนั้นจะมีด้วยกัน 4 ขา ซึ่งสามารถแบ่งหน้าที่การทำงานได้ดังนี้

- ขา Master In / Slave Out (MISO) เป็นขาสัญญาณที่ใช้ในการส่งข้อมูลแบบอนุกรมแบบ full duplex หากเซตขาดังกล่าวเป็น Master การทำงานเป็นการรับข้อมูลเพียงอย่างเดียวแต่หากเซตเป็น Slave จะมีการทำงานเป็นขาเอาท์พุต
- ขา Master Out / Slave In (MOSI) เป็นที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลเช่นเดียวกับขา MISO
- ขาสัญญาณนาฬิกา (Serial Clock) เป็นขาสัญญาณที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณนาฬิการะหว่างอุปกรณ์ Master และ Slave
- ขากำหนดหน้าที่ (Slave Select) เป็นขาที่ใช้ในการกำหนดสถานะของอุปกรณ์ ซึ่งในการทำงานตัวอุปกรณ์สามารถรับรู้ได้ว่าเมื่อใดที่ต้องทำตัวเองเป็น Master และเมื่อใดที่ต้องทำตัวเป็น Slave โดยจะพิจารณาจากสัญญาณที่ใช้ว่าอยู่ในสถานะสูงหรือต่ำ

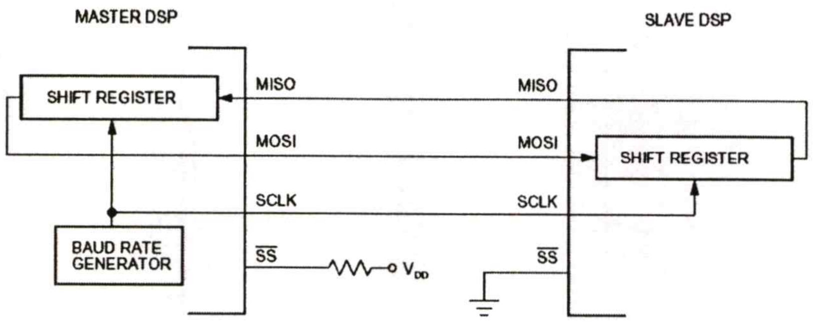
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.35 บล๊อกไดอะแกรมการรับส่งข้อมูลแบบ Serial Peripheral Interface (SPI)

การทำงานในโหมด Master นั้นจะต้องมีการเซตบิต SPMSTR ในริจิตเตอร์ควบคุมสถานะ (SPSCR) ให้มีค่าเท่ากับ 1 โดยจะต้องเซตให้ตัว Master มีการทำงานก่อนที่จะทำการเซตตัว Slave และในการหยุดการทำงานจะต้องมีการรีเซตตัว Slave ก่อนตัว Master ไม่เช่นนั้นการทำงานจะเกิดข้อผิดพลาดได้ หลังจากที่เซตตัวอุปกรณ์ให้เป็นตัว Master แล้ว หากต้องการส่งข้อมูลออกไปยังขาเอาท์พุตสามารถทำได้โดยการส่งข้อมูลไปยังรีจิตเตอร์ที่ทำการเก็บข้อมูล จากนั้นทำการเซตค่าบิตที่ใช้ในการส่งในบิต SPTE ในรีจิเตอร์ควบคุมการทำงานของ SPI หรือรีจิตเตอร์ SPSCR ข้อมูลที่ส่งออกไปนี้จะอยู่ภายในการทำงานร่วมกับสัญญาณนาฬิกาที่ถูกส่งออกไปด้วย โดยจะส่งออกไปยังขา MOSI และเมื่อตัว Slave มีการรับข้อมูลครบ บิต SPRF ในรีจิตเตอร์ SPSCR ของตัว Slave จะถูกเซต ตัว Slave ก็จะนำอินพุตที่ได้ส่งไปยังรีจิตเตอร์ที่ทำการเก็บข้อมูลพร้อมกับเคลียร์บิต SPRF ในรีจิตเตอร์ SPSCR ด้วย ในช่วงเวลาเดียวกันที่ตัว Master เมื่อมีการส่งข้อมูลครบก็จะทำการเคลียร์บิต SPTE เพื่อบอกให้ตัวประมวลผลรับรู้ว่าข้อมูลถูกส่งออกไปเรียบร้อยแล้วและข้อมูลที่อยู่ภายในนี้เป็นข้อมูลว่าง ดังแสดงการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ไว้ในภาพที่ 3.36 ส่วนการทำงานในการส่งข้อมูลกลับ (จาก Slave ไปยัง Master) ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกับที่กล่าวมาข้างต้นเพียงแต่มีการเซตการทำงานสลับกันเท่านั้นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.36 การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ Master และ Slave แบบ Full duplex

การควบคุมการทำงานของโมดูล SPI นั้นจะต้องทำการควบคุมผ่านรีจิตเตอร์ซึ่งการเซตค่าต่างๆ ในรีจิตเตอร์มีดังนี้

- **รีจิตเตอร์** SPI Status and Control (SPSCR) เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมและแสดงค่าการรับส่งข้อมูลแบบ SPI ดังแสดงในภาพที่ 3.37 และรายละเอียดของบิตในตารางที่ 3.20 ส่วนในภาพที่ 3.38 จะแสดงถึงโครงสร้างทางลอจิกของบิตต่างๆ ที่มีผลกับการทำงานของอินเตอร์รัพต์

SPI_BASE+$0	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Read		DSO	SPRF	ERRIE	OVRF	MODF	SPTE	MODFEN	SPR1	SPR0	SPRIE	SPMSTR	CPOL	CPHA	SPE	SPTIE
Write																
Reset	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ภาพที่ 3.37 รีจิตเตอร์การควบคุมและแสดงค่าการรับส่งข้อมูล (SPSCR)

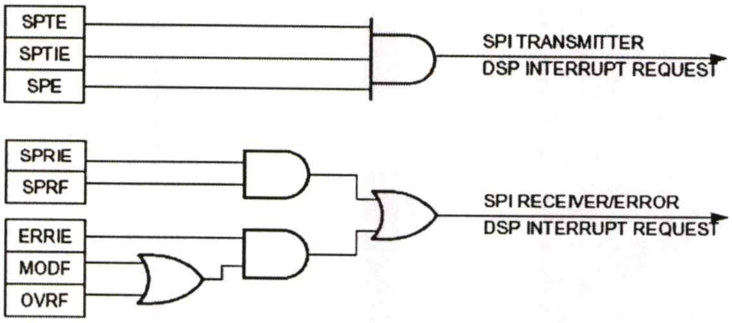
ตารางที่ 3.20 ตารางแสดงรายละเอียดการใช้งานในแต่ละบิตของรีจิตเตอร์ SPSCR

บิตที่	รายละเอียด
15	เป็นบิตสงวนไม่สามารถใช้งานได้
14	บิต DSO เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดข้อมูลเริ่มต้นในการส่งว่าต้องการส่งข้อมูลทางด้านไบต์สูงออกไปก่อนหรือให้ส่งข้อมูลทางด้านไบต์ต่ำออกไปก่อน
13	บิต SPRF เป็นบิตที่ใช้ในการบอกสถานะของข้อมูลที่รับเข้ามา หากมีค่าเป็น 1 หมายถึงในรีจิตเตอร์ข้อมูลมีการรับข้อมูลครบแล้ว แต่หากเป็น 0 หมายถึงในรีจิตเตอร์ข้อมูลไม่มีข้อมูลใดๆ อยู่ในรีจิตเตอร์ดังกล่าว
12	บิต ERRIE เป็นบิตที่ใช้ในการเซตการเกิดอินเตอร์รัพต์เมื่อการรับส่งข้อมูลดังกล่าวเกิดข้อผิดพลาดขึ้น หากเป็น 1 หมายถึงให้มีการทำงานของอินเตอร์รัพต์
11	บิต OVRF เป็นบิตที่ใช้ในการตรวจสอบข้อมูลในการรับว่าเกิด Overflow ของข้อมูลหรือไม่ หากเป็น 1 แสดงว่าข้อมูลนั้นเกิด Overflow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.20 (ต่อ)

บิตที่	รายละเอียด
10	บิต MODF เป็นบิตที่ใช้ในการเช็คข้อผิดพลาดในกรณีที่เป็นตัว Slave โดยจะมีการตรวจสอบข้อมูลกับตัว Master หากเมื่อใดที่ตัว Master มีการเปลี่ยนแปลงสถานะจาก Master เป็น Slave บิตนี้จะมีการเซต
9	บิต SPTF เป็นบิตที่ใช้ในการบอกสถานะของข้อมูลที่ส่งออกไป หากมีค่าเป็น 1 หมายถึงในรีจิตเตอร์ข้อมูลไม่มีข้อมูลเหลืออยู่เนื่องจากส่งออกไปเรียบร้อยแล้ว แต่หากเป็น 0 หมายถึงในรีจิตเตอร์มีข้อมูลใดๆ อยู่
8	บิต MODFEN เป็นบิตที่ใช้ในการเช็คสถานะตัวเองร่วมกับบิตที่ 10
6-7	เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดอัตราการส่งข้อมูลร่วมกับสัญญาณนาฬิกา 00 หมายถึง ความเร็วในการส่งมีค่าเท่ากับสัญญาณนาฬิกา / 2 01 หมายถึง ความเร็วในการส่งมีค่าเท่ากับสัญญาณนาฬิกา / 8 10 หมายถึง ความเร็วในการส่งมีค่าเท่ากับสัญญาณนาฬิกา / 16 11 หมายถึง ความเร็วในการส่งมีค่าเท่ากับสัญญาณนาฬิกา / 32
5	บิต SPRIE เป็นบิตที่ใช้ในการเซตการเกิดอินเตอร์รัพต์เมื่อมีการรับข้อมูลเต็ม
4	บิต SPMSTR เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดสถานะของตัวอุปกรณ์ ถ้ามีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าอยู่ในสถานะ Master แต่ถ้าเป็น 0 จะอยู่ในสถานะ Slave
3	บิต CPOL เป็นบิตที่ใช้ในการเซตการตรวจจับสัญญาณนาฬิกาโดยสามารถเซตการตรวจจับให้เริ่มนับที่สัญญาณนาฬิกาขาขึ้นหรือขาลง
2	บิต CPHA เป็นบิตที่ใช้ในการควบคุมสัญญาณนาฬิกากับข้อมูลที่ใช้ในการรับส่ง
1	บิต SPE เป็นบิตเซตการทำงานของโมดูล SPI หากมีค่าเป็น 1 แสดงว่าให้มีการทำงาน (Enable)
0	บิต SPTIE เป็นบิตที่ใช้ในการเซตการเกิดอินเตอร์รัพต์เมื่อมีการส่งข้อมูลออกครบ



ภาพที่ 3.38 โครงสร้างทางลอจิกของบิตต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดอินเตอร์รัพต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รีจิตเตอร์ SPI Data Receive (SPDRR) เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการรับข้อมูลซึ่งมีขนาด 16 บิต
- รีจิตเตอร์ SPI Data Transmit (SPDT) เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการส่งข้อมูลซึ่งมีขนาด 16 บิต
- รีจิตเตอร์ SPI Data Size (SPDSR) เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้กำหนดขนาดจำนวนบิตของข้อมูลที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลแบบ SPI ดังแสดงในภาพที่ 3.39 โดยสามารถเซตขนาดของบิตได้ในบิตที่ 0 – 3 เช่น 1000 มีค่าเท่ากับขนาดของบิตที่ใช้ในการส่งมีค่าเท่ากับ 9 บิต เป็นต้น ซึ่งการแปลงจะเหมือนกับรหัส BCD แต่ต้องบวก 1 เพิ่มเนื่องจากในการรับส่งไม่สามารถเซตค่า 0000 ได้ [2]

SPI_BASE+$1	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Read Write													DS3	DS2	DS1	DS0
Reset	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ภาพที่ 3.39 รีจิตเตอร์ที่ใช้กำหนดขนาดจำนวนบิตของข้อมูล (SPDSR)

3.6.7 ชุดตรวจจับพัลส์ความเร็ว (Quad Decoder)

เป็นโมดูลที่ใช้ในการตรวจจับพัลส์ความเร็วรอบหรือรับสัญญาณจากภายนอกเพื่อมากระทำการประมวลผล ซึ่งใน DSP56F805 นี้จะมีโมดูลที่ใช้ในการตรวจจับพัลส์ความเร็วรอบอยู่ 2 ชุดคือ Quadrature Decoder module #0 และ Quadrature Decoder module #1 โดยในแต่ละชุดจะประกอบไปด้วยขาสัญญาณ A, B, Index และ Home ซึ่งการทำงานของโมดูลที่ใช้ในการตรวจจับพัลส์นี้จะมีวงจรที่เรียกว่า "เมตริกสวิตซ์" มีไว้เพื่อการใช้ร่วมกันระหว่างโมดูลของวงจรนับและจับพัลส์จากภายนอกในกรณีใช้ Timer เป็นวงจรนับ ซึ่งสวิตซ์เมตริกนี้จะมีการทำงานอยู่ 3 โหมดคือ

- โหมด 0 มีไว้สำหรับนำสัญญาณที่จับได้จากขาสัญญาณเพื่อส่งต่อไปยังกระบวนการของโม - ดูลวงจรนับและจับเวลา
- โหมด 1 มีไว้สำหรับนำสัญญาณที่จับได้จากขาสัญญาณผ่านเข้ากระบวนการกรองทางดิจิตอล (Digital Filter) ต่อจากนั้นจะนำสัญญาณที่ได้ส่งต่อไปยังกระบวนการของโมดูลวงจรนับและจับเวลา
- โหมด 2 มีไว้สำหรับนำสัญญาณที่ได้จากขาสัญญาณ A มาเข้ากระบวนการกรองทางดิจิตอลและส่งต่อไปยังกระบวนการของโมดูลวงจรนับและจับเวลา (Time Channel #0 และ #1) และนำสัญญาณที่ได้จากขาสัญญาณ B มาเข้ากระบวนการกรองทางดิจิตอลและส่งต่อไปยังกระบวนการของโมดูลวงจรนับและจับเวลา (Time Channel #2 และ #3) การทำงานในโหมด 2 นี้มักจะถูกใช้กับการตรวจจับพัลส์ความเร็วรอบของมอเตอร์ เนื่องจากในโหมดการทำงานนี้สามารถใช้ในงานที่ต้องการความละเอียดของสัญญาณในช่วงที่มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ

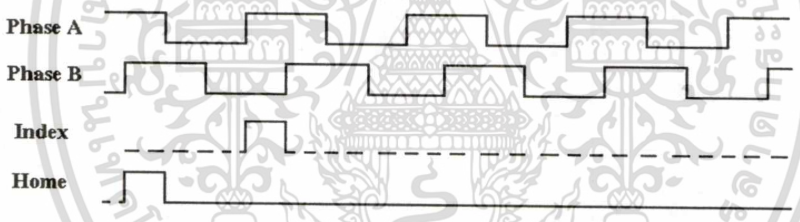
คุณสมบัติของชุดตรวจจับพัลส์ความเร็วที่มีอยู่ใน DSP56F805 มีดังนี้

- มีกระบวนการกรองทางดิจิตอลสำหรับทางด้านอินพุต

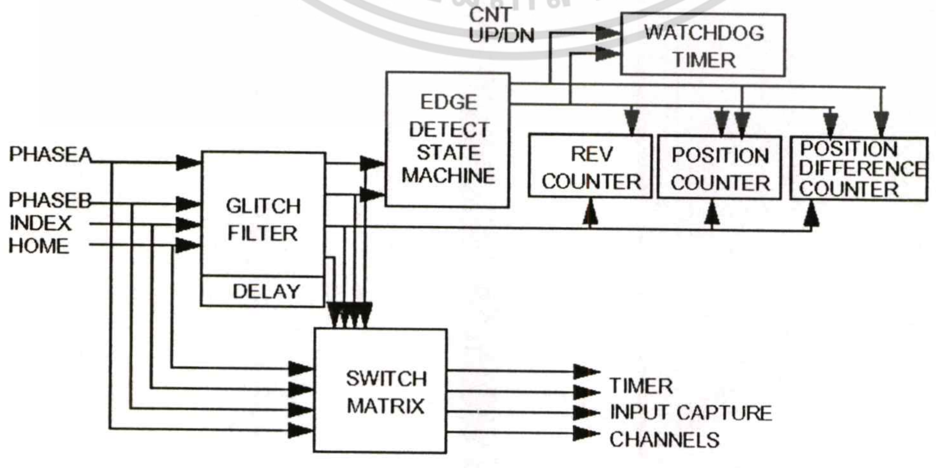
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การนับจำนวนพัลส์สามารถนับได้ถึง 32 บิต
- สามารถนับจำนวนพัลส์การแตกต่างระหว่างสถานะครั้งแรกกับครั้งที่สองได้ถึง 16 บิต
- ความถี่สูงสุดที่สามารถนับได้มีค่าเท่ากับสัญญาณนาฬิกาของระบบ
- ค่าการนับสามารถเริ่มการทำงานได้โดยใช้ซอฟต์แวร์หรือเหตุการณ์ภายนอกมากระทำ
- มีวงจรนับการเร่งขนาด 16 บิต (Velocity)
- ขาสัญญาณทุกขามีการเชื่อมโยงกับวงจรนับและจับเวลา (Timer)

สัญญาณพัลส์โดยส่วนใหญ่จากตัวเอ็นโค๊ดเดอร์จะมีด้วยกันอยู่ 4 รูปแบบ คือสัญญาณ A, B, Index และ Home โดยที่สัญญาณของเฟส A มีเฟสที่แตกต่างกับสัญญาณ B อยู่ 90 องศา ซึ่งสัญญาณของ A และ B นี้จะเป็นสัญญาณที่ได้จากการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ในกรณีเอ็นโค๊ดเดอร์มีความละเอียด 500 พัลส์ต่อรอบ นั้นหมายถึงขาสัญญาณ A และ B สามารถสร้างพัลส์จำนวน 500 พัลส์ต่อ 1 รอบการหมุนทางกลของโรเตอร์ ส่วนสัญญาณ Home จะเป็นสัญญาณที่ใช้ในการบอกจุดทำงานในกรณีที่มีการทำงานของตัวตรวจจับ 2 ตัว (แกน X และแกน Y) และสัญญาณ Index เป็นสัญญาณที่ใช้บอกถึงจุดครบรอบการทำงานของการหมุน 1 รอบ โดยทุกๆครั้งที่มีการหมุนครบ 1 รอบจะเกิดสัญญาณนี้ขึ้น 1 พัลส์ ดังแสดงในภาพที่ 3.40 และ 3.41



ภาพที่ 3.40 สัญญาณที่เกิดการอุปกรณ์เอ็นโค๊ดเดอร์



ภาพที่ 3.41 บล๊อกไดอะแกรมการทำงานของ Quadrature Decoder module

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 3.41 จะเป็นการแสดงถึงบล๊อกไดอะแกรมการทำงานของ Quadrature Decoder module ซึ่งจะประกอบไปด้วย Glitch Filter และ Switch Matrix ซึ่งการทำงานของเมตริกสวิตซ์ได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้น ส่วน Glitch Filter จะมีหน้าที่ในการนำสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการตรวจจับมาผ่านเข้าสู่กระบวนการกรองทางดิจิตอล (Digital Filter) โดยที่การกรองนี้จะมีการแซมปิ้งสัญญาณเป็นระยะเวลาหนึ่งเพื่อใช้ในการทดสอบค่าตำแหน่งของสัญญาณตามจำนวนที่ตั้งค่าไว้เพื่อความแม่นยำของสัญญาณที่จะส่งต่อไปใช้งานในกระบวนการต่อไป

การใช้โมดูล Quadrature Decoder นี้การทำงานส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการนับค่า ซึ่งค่าของตัวเลขที่ได้จากการนับจะมีขนาดถึง 32 บิต การเริ่มต้นให้ DSP เริ่มทำงานนับสามารถทำได้โดยใช้สัญญาณทริกซ์ที่เกิดจากซอฟต์แวร์, สัญญาณ Index หรือสัญญาณ Home ซึ่งการทำงานของขาสัญญาณ Index และ Home นี้ สามารถโปรแกรมให้เกิดการอินเตอร์รัพต์ขึ้นได้ เพื่อใช้ในงานด้านการคำนวณหาค่าความเร็วหรือประมวลผลการควบคุมต่างๆ ค่าจากการนับที่ได้จากการตรวจจับส่วนใหญ่จะอาศัยผลต่างของการนับขนาด 16 บิต (Difference Value) ทุกๆ การตรวจจับจะต้องมีการอ่านค่าในรีจิตเตอร์ POSD ซึ่งผลของการอ่านจะทำให้ค่าในรีจิตเตอร์ POSD มีการเคลียร์ค่าและทำการคัดลอกข้อมูลลงในรีจิตเตอร์ค้างสถานะ (POSDH) ซึ่งเวลาใช้งานจะใช้รีจิตเตอร์ POSDH ในการคำนวณตำแหน่งต่างๆ ในการทำงานของ Quadrature Decoder module จะต้องมีการกำหนดค่าและสถานะการทำงานในรีจิตเตอร์ควบคุมการทำงาน (DECCR) ดังภาพที่ 3.42 และรายละเอียดการใช้งานของบิตในตารางที่ 3.21

DEC_BASE+$0	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Read Write	HIRQ	HIE	HIP	HNE	SWIP	REV	PH1	XIRQ	XIE	XIP	XNE	DIRQ	DIE	WDE	MODE[1:0]	
Reset	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ภาพที่ 3.42 รีจิตเตอร์ควบคุมการทำงาน (DECCR) ของ Quadrature Decoder module

ตารางที่ 3.21 ตารางแสดงรายละเอียดการใช้งานบิตต่างๆ ของรีจิตเตอร์ DECCR

บิตที่	รายละเอียด
15	บิต HIRQ เป็นบิตที่ใช้ในการแสดงสถานะของการเกิดอินเตอร์รัพต์ของสัญญาณ Home จากเอ็นโค๊ดเดอร์ เมื่อมีการตั้งค่าใช้งานไว้ในบิตที่ 14 ซึ่งบิตนี้เป็นบิตที่สามารถอ่าน / เขียนได้ สามารถเคลียร์บิตนี้ได้โดยเขียนค่า 1 ลงในบิต
14	เป็นบิตที่ใช้ในการ Enable และ Disable การทำงานของอินเตอร์รัพต์ของสัญญาณ Home จากเอ็นโค๊ดเดอร์
13	เป็นบิตใช้ในการเซตค่าว่าจะให้สัญญาณ Home เป็นตัวสั่งให้มีการเริ่มนับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.21 (ต่อ)

บิตที่	รายละเอียด
12	เป็นบิตที่ระบุสถานะขอบขาขึ้นหรือขอบขาลง โดยมีไว้เพื่อสั่งให้โปรแกรมมีการเริ่มนับการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งพัลส์ (จะมีผลต่อเมื่อบิตที่ 14 มีการเซต)
11	เป็นบิตใช้ในการเซตค่าว่าจะให้ซอฟต์แวร์เป็นตัวสั่งให้มีการเริ่มนับการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งพัลส์
10	เป็นบิตที่ใช้ระบุวิธีการนับการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งพัลส์ว่าจะให้มีการนับแบบปกติหรือนับแบบลดค่า
9	เป็นบิตที่ระบุจำนวนสัญญาณที่จะนำมาใช้งานเช่น กำหนดเป็น "1" แสดงว่านับเฉพาะสัญญาณ A ไม่สนใจสัญญาณ B หากเป็น "0" หมายถึงนับสัญญาณทั้งคู่
8	บิต XIRQ เป็นบิตที่ใช้ในการแสดงสถานะของการเกิดอินเตอร์รัพต์ของสัญญาณ Index จากเอ็นโค๊ดเดอร์ เมื่อมีการตั้งค่าใช้งานไว้ในบิตที่ 7 ในกรณีที่ต้องการเคลียร์บิตนี้ทำได้โดยเขียนค่า 1 ลงในบิต
7	เป็นบิตที่ใช้ในการ Enable และ Disable การทำงานของอินเตอร์รัพต์ของสัญญาณ Index จากเอ็นโค๊ดเดอร์
6	เป็นบิตใช้ในการเซตค่าว่าจะให้สัญญาณ Index จากเอ็นโค๊ดเดอร์ เป็นตัวสั่งให้มีการเริ่มนับการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งพัลส์
5	เป็นบิตที่ระบุสถานะขอบขาขึ้นหรือขอบขาลงของสัญญาณ Index ในการสั่งให้มีการเริ่มนับการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งพัลส์ (จะมีผลต่อเมื่อบิตที่ 7 มีการเซต)
4	เป็นบิตใช้ในการเซตการทำงานของ Watchdog ของชุด Quadrature Decoder module ในกรณีที่ไม่มีการหมุนของมอเตอร์เป็นระยะเวลาที่ตั้งไว้
3	เป็นบิตที่ใช้ในการ Enable และ Disable การทำงานของอินเตอร์รัพต์ของสัญญาณ Watchdog ของชุด Quadrature Decoder module
2	เป็นบิตที่ใช้ในการ Enable และ Disable การทำงานวงจรจับเวลา (Watchdog) ในกรณีที่ไม่มีการหมุน
1- 0	เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดโหมดการทำงานของโมดูล Quadrature Decoder ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น

การควบคุมการทำงานของโมดูล Quadrature Decoder ส่วนใหญ่จะกำหนดค่าการทำงานในรีจิตเตอร์ DECCR ส่วนรีจิตเตอร์อื่นๆ นั้นจะเป็นรีจิตเตอร์ที่เก็บค่าที่ได้จากการนับและเก็บค่านับของการเริ่มต้นไว้ซึ่งรายละเอียดของรีจิตเตอร์ต่างๆ นี้สามารถหาได้ใน [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.8 ชุดการตรวจจับเวลา (Timer)

ใน DSP56F805 จะมีวงจรนับและจับเวลา (Time) ขนาด 16 บิต จำนวน 4 ชุด (Timer A, Timer B, Timer C, Timer D) ซึ่งในโมดูลของชุดวงจรนับและจับเวลานี้จะประกอบไปด้วยชุดวงจรนับและจับเวลาจำนวน 4 กลุ่ม (Timer A0, A1, A2, A3, B1,...,D3, D4) โดยวงจรนับและจับเวลานี้จะประกอบไปด้วย

- รีจิตเตอร์ Prescaler มีไว้สำหรับการสร้างฐานของช่วงเวลาที่แตกต่างกันออกไปของวงจรนับและจับเวลา เนื่องจากความเร็วของตัวประมวลผลมีความเร็วสูง ดังนั้นในการใช้งานที่ต้องการใช้ในการนับช่วงเวลาที่ยาวนาน จะต้องใช้ตัวหารสัญญาณนาฬิกามาช่วยในการปรับฐานเวลา

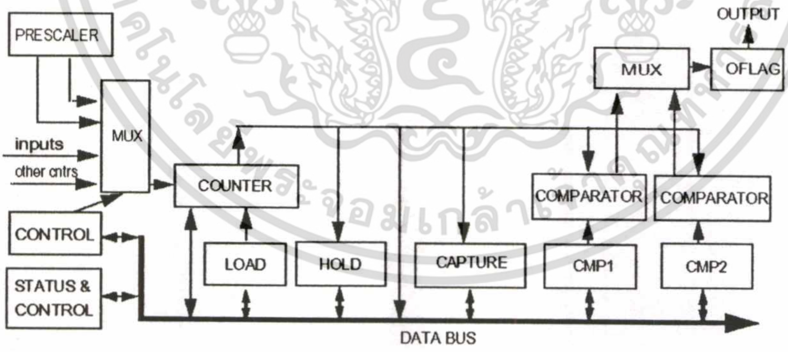
- รีจิตเตอร์ Load มีไว้สำหรับการเก็บค่าเริ่มต้นในการนับ เช่น 0x0000 ฐาน 16 เป็นต้น

- รีจิตเตอร์ Hold มีหน้าที่เก็บค่าที่นับได้เมื่อวงจรนับมีการอ่านค่าออกไปใช้งานโดยค่านี้จะยัง - คงอยู่จนกว่าจะมีการอ่านค่าใหม่อีกครั้ง จึงจะทำให้ค่าต่างๆ มีการอัพเดต นอกจากนี้ยังสามารถใช้รีจิตเตอร์นี้ในการตั้งการนับเวลาแบบ Cascade ได้อีกด้วย

- รีจิตเตอร์ Capture มีหน้าที่เก็บค่าจำนวนที่นับได้

- รีจิตเตอร์ Compare มีหน้าที่เก็บค่าขนาด 16 บิตที่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ เช่นถ้าค่าที่นับได้มีค่าเท่ากับค่าในรีจิตเตอร์ Compare หากมีการเซตการทำงานของอินเตอร์รัพต์ไว้ ก็จะทำให้เกิดการอินเตอร์รัพต์ขึ้นได้

จากรีจิตเตอร์ที่กล่าวมานี้ยกเว้นรีจิตเตอร์ Prescaler จะเป็นรีจิตเตอร์แบบอ่านและเขียนได้



ภาพที่ 3.43 บล๊อกไดอะแกรมของวงจรนับและจับเวลา (Timer)

คุณสมบัติของวงจรนับและจับเวลา

- เป็นวงจรนับและจับเวลาขนาด 16 บิต โดยสามารถนับขึ้นหรือนับลงได้
- สามารถตั้งเวลาการนับให้มีรูปแบบการนับแบบต่อเนื่องตามลำดับได้ (Cascade)
- อัตราความเร็วในการนับมีค่าเท่ากับความถี่ของสัญญาณนาฬิกาภายนอกหาร 2 หรือประมาณเท่ากับ 20 เมกะเฮิรตซ์ ในกรณีที่นับจากสัญญาณภายนอกตัว DSP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อัตราความเร็วในการนับมีค่าเท่ากับความถี่ของสัญญาณนาฬิกาภายใน หรือประมาณเท่ากับ 80 เมกะเฮิรตซ์ ในกรณีที่ใช้สัญญาณอ้างอิงภายในจากตัว DSP
- สามารถกำหนดการนับโดยให้นับแบบครั้งเดียวหรือนับแบบวนซ้ำได้
- ทุกๆ โมดูลของวงจรนับและจับเวลาจะสามารถกำหนดฐานของช่วงเวลาที่ใช้ในการทำงานได้อิสระจากกัน

วงจรนับและจับเวลาในอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์หรือตัวประมวลสัญญาณดิจิตอลจะมีพื้นฐานการทำงานอยู่ 2 โหมด คือการนับสัญญาณที่มาจากภายนอกและภายในกับการจับเวลาที่เกิดจากสัญญาณนาฬิกาภายในของ DSP โดยสามารถแยกรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

1. การนับ การนับดังกล่าวสามารถกำหนดให้ชุดของวงจรนับหรือจับเวลาทำการนับสัญญาณขาขึ้น, ขาลงหรือทั้งขาขึ้นและขาลงได้ อีกทั้งการนับสัญญาณจากภายนอกนี้สามารถกำหนดรูปแบบของการนับขึ้นหรือนับลงได้ เพื่อใช้ในการกำหนดรูปแบบของทิศทาง เช่นการหมุนของมอเตอร์ในกรณีที่มีการกลับทางหมุน การนับหรือการจับเวลาสามารถควบคุมจำนวนครั้งของการทำงานได้โดยสามารถให้นับหรือจับการทำงานเพียงครั้งเดียวหรือกระทำแบบวนซ้ำ

2. สัญญาณขาเข้าจากภายนอก สัญญาณขาเข้าจากภายนอกที่ไปยังชุดวงจรนับและจับเวลาจะมีการใช้ขาสัญญาณทำงานร่วมกัน สัญญาณภายนอกนี้สามารถใช้เป็นตัวบอกให้เริ่มในการนับหรือจับเวลาได้, สามารถเป็นสัญญาณทริกซ์ในการล็อกค่าที่ได้จากการนับได้, สามารถสร้างสัญญาณอินเตอร์รัพต์ได้ และยังสามารถกำหนดรูปแบบของสัญญาณที่จะให้ทำการนับว่าจะให้นับเฉพาะสัญญาณที่มีระดับสูงหรือระดับต่ำ

3. สัญญาณเอาท์พุต OFLAG สัญญาณเอาท์พุตของชุดวงจรนับและจับเวลาจะเป็นสัญญาณเอาท์พุต OFLAG มันสามารถส่งสัญญาณที่มีระดับสูงหรือระดับต่ำหรือสัญญาณกระพริบออกมาทางเอาท์พุตได้เมื่อมีการเก็บข้อมูลที่ได้จากการนับ ซึ่งสัญญาณเอาท์พุตนี้สามารถกำหนดรูปแบบของสัญญาณที่จะส่งออกว่าจะให้ลักษณะของสัญญาณที่มีระดับสูงหรือระดับต่ำก็ได้

การเลือกใช้รูปแบบการนับที่ใช้ในการนับสัญญาณที่มาจากภายนอกจะต้องมีการกำหนดฐานของช่วงเวลาที่ใช้ในนับ, ทิศทางที่ใช้ในการนับซึ่งอัตราการนับสูงสุดมีค่าเท่ากับความถี่ของสัญญาณนาฬิกาภายนอกส่วนสอง (20 เมกะเฮิรตซ์) แต่ถ้าเป็นการนับสัญญาณที่มาจากภายในจะมีค่าถึง 80 เมกะเฮิรตซ์ โดยรูปแบบของการกำหนดค่าต่างๆ มีดังนี้

1. โหมดหยุดการทำงาน ถ้าโหมดในการนับมีค่าเท่ากับ "000" วงจรนับจะไม่นับ แต่สามารถส่งสัญญาณอินเตอร์รัพต์ได้ในกรณีที่มีการกำหนดสถานะสัญญาณอินพุตกับขาสัญญาณที่กำหนดไว้

2. โหมดนับ ถ้าโหมดในการนับมีค่าเท่ากับ "001" วงจรนับจะทำการนับสัญญาณนั้นในขอบขาขึ้น โดยในโหมดนี้สามารถตั้งค่าการส่งสัญญาณอินเตอร์รัพต์ได้ในกรณีที่มีการเซตค่าไว้เพื่อการ

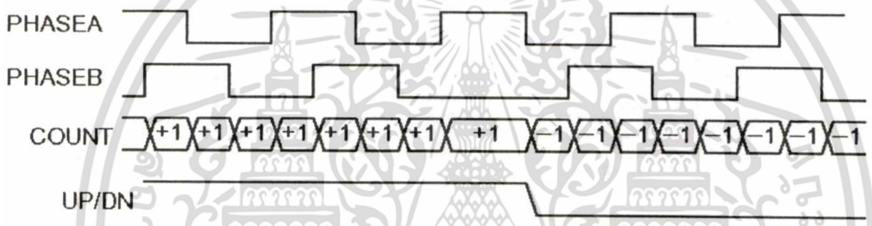
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้งานต่างๆ ซึ่งสัญญาณที่ใช้ในการในการนับนี้สามารถกำหนดขั้วได้ว่าจะให้นับเฉพาะสัญญาณที่มีระดับสูงหรือระดับต่ำได้

3. โหมดนับขอบสัญญาณ ถ้าโหมดในการนับมีค่าเท่ากับ “010” วงจรนับจะทำการนับสัญญาณทั้งในขอบขาขึ้นและขาลง

4. โหมดนับทิศทาง ถ้าโหมดในการนับมีค่าเท่ากับ “011” วงจรนับจะทำการนับสัญญาณก็ต่อเมื่อสัญญาณทางด้านเข้าของขาสัญญาณชุดที่สองมีสถานะสูง โหมดนี้จะใช้กับการจับหรือนับเวลาที่มาจากเงื่อนไขการทำงานภายนอก

5. โหมดการนับแบบ Quadrature ถ้าโหมดในการนับมีค่าเท่ากับ “100” วงจรนับจะทำการนับสัญญาณจากขาอินพุตของขาทางด้าน Primary และ Secondary โหมดนี้จะใช้กับการนับในรูปแบบของการหมุนหรือการตัวจับแบบเชิงเส้นเพื่อใช้ในการดูทิศทางการเคลื่อนที่ของแกนปลายเพลาของมอเตอร์ ดังแสดงรูปแบบสัญญาณไว้ในภาพที่ 3.44



ภาพที่ 3.44 สัญญาณที่ใช้กับโหมดการนับแบบ Quadrature

6. โหมดการนับแบบมีทิศทาง ถ้าโหมดในการนับมีค่าเท่ากับ “101” วงจรนับจะทำการนับสัญญาณจากขาทางด้าน Primary ในขณะที่ขาอินพุตทางด้าน Secondary จะมีหน้าที่ในการเลือกรูปแบบของทิศทาง (นับขึ้น/นับลง) ถ้าสัญญาณที่เข้ามาทางขาอินพุตทางด้าน Secondary มีสถานะสูง วงจรนับจะนับในทิศทางติดลบ แต่ถ้ามีการเซตเป็นสถานะต่ำ วงจรนับจะนับในทิศทางบวก

7. โหมดการนับแบบจุดชนวน ถ้าโหมดในการนับมีค่าเท่ากับ “110” วงจรนับจะทำการนับสัญญาณนาฬิกาหลังจากที่ได้รับสัญญาณสถานะสูงจากขาอินพุตทางด้าน Primary วงจรนับจะทำการนับสัญญาณนาฬิกาไปเรื่อยๆ จนถึงค่าที่ตั้งไว้ เพื่อใช้ในการกำเนิดสัญญาณอินเตอร์รัพต์เพื่อเรียกกระบวนการอื่นๆ ต่อไป หากในช่วงของการนับนั้นมีสัญญาณสถานะสูงจากขาอินพุตทางด้าน Secondary อีกในขณะที่ยังนับไม่เสร็จ จะไม่มีการนับใหม่จนกว่าจะมีการอ่านค่าเดิมเสียก่อน

8. โหมดการนับแบบ Cascade ถ้าโหมดในการนับมีค่าเท่ากับ “111” วงจรนับจะทำการนับสัญญาณแบบต่อเนื่องโดยจะมีการนับสัญญาณภายในวงจรนับจนถึงค่าที่ตั้งไว้เมื่อมีการนับครบก็จะมีการสั่งให้วงจรนับชุดต่อไปทำการนับต่อ ดังนั้นจะทำให้สามารถนับช่วงเวลาหรือจำนวนที่นับมีค่ามากขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

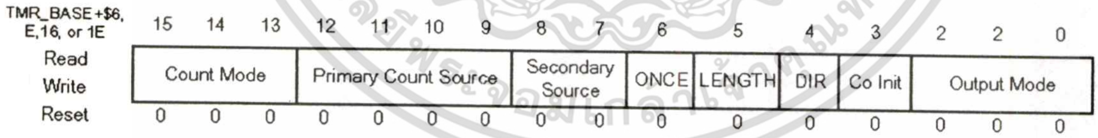
9. โหมดการส่งแบบพัลส์ทางด้านเอาท์พุต ถ้าโหมดในการนับมีค่าเท่ากับ "001" และเอาท์พุต OFLAG ถูกเซตเป็น "111" และกำหนดลักษณะการนับให้นับแบบครั้งเดียว (Count Once = 1) วงจรจับสัญญาณจะมีการสร้างสัญญาณที่มีลักษณะเป็นพัลส์ที่มีความถี่เท่ากับจำนวนฐานสัญญาณนาฬิกาและมีจำนวนของพัลส์เท่ากับค่าที่เก็บอยู่ในตัวเปรียบเทียบ (Compare Register) โหมดนี้มักถูกใช้กับการขับสเตปปิ้งมอเตอร์

10. โหมด PWM แบบคงที่ความถี่ ถ้าโหมดในการนับมีค่าเท่ากับ "001" และลักษณะการนับให้นับแบบวน (Count Once = 0) และค่าที่ OFLAG ถูกเซตเป็น "110" วงจรนับดังกล่าวจะสามารถให้สัญญาณพีดับบิวเอ็มด้วยความถี่เท่ากับความถี่สัญญาณนาฬิกาหารด้วย 65,536 และขนาดความกว้างของพัลส์มีขนาดเท่ากับค่าที่ตั้งไว้เพื่อเปรียบเทียบหารด้วย 65,536 โหมดการทำงานนี้จะใช้กับการควบคุมขนาดสัญญาณพัลส์วิดม็อดดูเลชั่นที่ใช้ในการควบคุมกำลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์

11. โหมด PWM แบบปรับเปลี่ยนความถี่ ถ้าโหมดในการนับมีค่าเท่ากับ "001" และลักษณะการนับให้นับแบบวน (Count Once = 0) และค่าที่ OFLAG ถูกเซตเป็น "100" วงจรนับดังกล่าวจะสามารถให้สัญญาณพีดับบิวเอ็มด้วยความถี่และขนาดความกว้างของพัลส์เท่ากับค่าที่ตั้งไว้เพื่อการเปรียบเทียบ (Compare Register) การทำงานนี้จะใช้กับการควบคุมพัลส์ PWM ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนความถี่

การทำงานของรีจิเตอร์ที่ใช้กับการโมดูลของการนับเวลาหรือจับเวลาจะประกอบไปด้วย

- รีจิตเตอร์ควบคุมการทำงาน (Control Register) มีหน้าที่ในการเซตโหมดการทำงานของโมดูลจับเวลาหรือนับสัญญาณดังแสดงในภาพที่ 3.45 และตารางการทำงานของบิตในตารางที่ 3.22



ภาพที่ 3.45 รีจิตเตอร์ควบคุมการทำงานของชุดวงจรนับและจับเวลา (Control Register)

ตารางที่ 3.22 ตารางแสดงรายละเอียดการใช้งานบิตต่างๆ ของรีจิตเตอร์ควบคุม

บิตที่	รายละเอียด
15-13	เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดชนิดและพฤติกรรมของการทำงาน 000 หมายถึง ไม่มีการทำงานของวงจรตรวจนับและตรวจจับเวลา 001 หมายถึง นับเฉพาะขอบขาขึ้นทางด้านพอร์ตปฐมภูมิ 010 หมายถึง นับเฉพาะขอบขาขึ้นและขาลงทางด้านพอร์ตปฐมภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.22 (ต่อ)

บิตที่	รายละเอียด
	011 หมายถึง นับเฉพาะขอบขาขึ้นทางด้านพอร์ตปฐมภูมิในขณะที่พอร์ตอินพุตทางด้านทุติยภูมิจะต้องมีสถานะเป็น High 100 หมายถึง นับแบบมีทิศทางด้านพอร์ตปฐมภูมิและทางด้านทุติยภูมิ 101 หมายถึง นับเฉพาะขอบขาขึ้นทางด้านพอร์ตปฐมภูมิและทางด้านทุติยภูมิเป็นตัวกำหนดทิศทาง 110 หมายถึง ให้นับขอบสัญญาณทางด้านทุติยภูเพื่อสร้างพัลส์ทริกซ์ให้เกิดที่ทางด้านปฐมภูมิจนกว่าจะนับค่าถึงค่าเปรียบเทียบ (compare register) 111 หมายถึง ให้นับสัญญาณในโหมดต่อเนื่อง (Cascade)
12-9	เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดชนิดของอินพุต, เอาท์พุตหรือสร้างฐานสัญญาณนาฬิกาของพอร์ตปฐมภูมิ 0000 หมายถึง ให้วงจรนับ # 0 มีสถานะเป็นอินพุต 0001 หมายถึง ให้วงจรนับ # 1 มีสถานะเป็นอินพุต 0010 หมายถึง ให้วงจรนับ # 2 มีสถานะเป็นอินพุต 0011 หมายถึง ให้วงจรนับ # 3 มีสถานะเป็นอินพุต 0100 หมายถึง ให้วงจรนับ # 0 มีสถานะเป็นเอาท์พุต 0101 หมายถึง ให้วงจรนับ # 1 มีสถานะเป็นเอาท์พุต 0110 หมายถึง ให้วงจรนับ # 2 มีสถานะเป็นเอาท์พุต 0111 หมายถึง ให้วงจรนับ # 3 มีสถานะเป็นเอาท์พุต 1000 หมายถึง ให้สร้างฐานสัญญาณนาฬิกาโดยหารด้วย 1 1001 หมายถึง ให้สร้างฐานสัญญาณนาฬิกาโดยหารด้วย 2 1010 หมายถึง ให้สร้างฐานสัญญาณนาฬิกาโดยหารด้วย 4 1011 หมายถึง ให้สร้างฐานสัญญาณนาฬิกาโดยหารด้วย 8 1100 ถึง 1111 หมายถึง ให้สร้างฐานสัญญาณนาฬิกาโดยหารด้วย 16, 32, 64, 128 ตามลำดับ
8-7	เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดชนิดของอินพุต, เอาท์พุตหรือสร้างฐานสัญญาณนาฬิกาของพอร์ตทุติยภูมิ (ให้กรณีที่มีการใช้เป็นทิศทางหรือใช้งานในโหมดต่อเนื่อง) 00 หมายถึง ให้วงจรนับ # 0 ที่ใช้เป็นชุดทุติยภูมิมีสถานะเป็นอินพุต 01 หมายถึง ให้วงจรนับ # 1 ที่ใช้เป็นชุดทุติยภูมิมีสถานะเป็นอินพุต 10 หมายถึง ให้วงจรนับ # 2 ที่ใช้เป็นชุดทุติยภูมิมีสถานะเป็นอินพุต 11 หมายถึง ให้วงจรนับ # 3 ที่ใช้เป็นชุดทุติยภูมิมีสถานะเป็นอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.22 (ต่อ)

บิตที่	รายละเอียด
6	เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดจำนวนครั้งของการนับ 0 หมายถึง ให้มีการนับซ้ำ 1 หมายถึง นับจนกว่าจะถึงค่าเปรียบเทียบแล้วหยุดนับ
5	เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดรูปแบบของการนับ 0 หมายถึง ให้นับแบบไปเรื่อยๆ 1 หมายถึง นับจนกว่าถึงค่าเปรียบเทียบ แล้วเริ่มค่านับใหม่
4	เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของการนับ 0 หมายถึง ให้นับขึ้น 1 หมายถึง ให้นับลง
3	เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดความสัมพันธ์ของการเริ่มต้นเมื่อค่านั้นมีค่าถึงค่าเปรียบเทียบ 0 หมายถึง ไม่มีผลที่จะให้เริ่มทำงานใหม่อีกครั้ง 1 หมายถึง มีผลที่จะให้เริ่มทำงานใหม่อีกครั้ง
2-0	เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดการทำงานของโหมดเอาท์พุต OFLAG 000 หมายถึง ยืนยันการทำงานเมื่อมีการนับค่า 001 หมายถึง รีเซต OFLAG เมื่อมีการทำเสร็จจนถึงค่าตัวเปรียบเทียบ 010 หมายถึง เซต OFLAG เมื่อมีการทำเสร็จจนถึงค่าตัวเปรียบเทียบ 011 หมายถึง กลับสภาวะ OFLAG เมื่อมีการทำเสร็จจนถึงค่าตัวเปรียบเทียบ 100 หมายถึง กลับสภาวะ OFLAG โดยใช้รีจิตเตอร์เปรียบเทียบ 101 หมายถึง เซตเมื่อมีการเปรียบเทียบและรีเซตค่าทางด้านพอร์ตทุติยภูมิ 110 หมายถึง เซตเมื่อมีการเปรียบเทียบและรีเซตค่าที่นับ 111 หมายถึง ยอมให้เกิดเอาท์พุตได้ในขณะที่มีการนับ

- รีจิตเตอร์สถานะและควบคุม เป็นรีจิตเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดการทำงานของการเกิดอินเตอร์รัพต์ต่างๆ ของขาสัญญาณดังแสดงในภาพที่ 3.46 และตารางการทำงานของบิตในตารางที่ 3.23

TMR_BASE+$7, F,17, or 1F	15	14	13	12	11	10	9	8	[7:6]	5	4	3	2	1	0
Read	TCF	TCFIE	TOF	TOFIE	IEF	IEFIE	IPS	INPUT	Capture Mode	MSTR	EEOF	VAL		OPS	OEN
Write													FORCE		
Reset	0	0	0	0	0	0	0	0	0 0	0	0	0	0	0	0

ภาพที่ 3.46 รีจิตเตอร์สถานะและควบคุม (Status and Control Register)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.23 ตารางแสดงรายละเอียดการใช้งานบิตต่างๆ ของรีจิตเตอร์สถานะและควบคุม

บิตที่	รายละเอียด
15	บิตนี้จะมีค่าเป็น High เมื่อมีการเปรียบเทียบค่าเสร็จสิ้น บิตนี้สามารถรีเซตได้โดยการเขียนค่าศูนย์เข้าไปในตำแหน่งบิตนี้
141	หากบิตนี้มีสถานะสูงจะยอมให้เกิดการอินเตอร์รัพต์ได้ถ้าค่าในบิต TCF มีการเซต
13	บิตนี้จะมีการเซตเมื่อจำนวนนับมีค่าถึง FFFF หรือ 0000 บิตนี้สามารถรีเซตได้โดยการเขียนค่าศูนย์เข้าไปในตำแหน่งบิตนี้
12	หากบิตนี้มีสถานะสูงจะยอมให้เกิดการอินเตอร์รัพต์ได้ถ้าค่าในบิต TOF มีการเซต
11	บิตนี้จะมีการเซตถ้าค่าอินพุตที่ได้มีค่าสัญญาณทางด้านบวกเกิดขึ้น
10	หากบิตนี้มีสถานะสูงจะยอมให้เกิดการอินเตอร์รัพต์ได้ถ้าค่าในบิต IEF มีการเซต
9	หากบิตนี้มีสถานะสูง มันจะมีการรับสัญญาณอินพุตที่เข้ามาด้วยสถานะตรงกันข้าม
8	เป็นบิตที่บอกถึงสถานะของอินพุตภายนอกหลังจากที่มีการเซตค่าในบิต IPS แล้ว
7-6	เป็นบิตกำหนดเงื่อนไขการทำงานของขอบขาสัญญาณ 00 หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าจำนวนนับ 01 หมายถึง มีการเก็บค่าลงใน Capture Register ในขณะที่เกิดสัญญาณทางขาขึ้นของอินพุต 10 หมายถึง มีการเก็บค่าลงใน Capture Register ในขณะที่เกิดสัญญาณทางขาลงของอินพุต 11 หมายถึง มีการเก็บค่าลงใน Capture Register ในขณะที่เกิดสัญญาณทั้งขาขึ้นและขาลงของอินพุต
5	ใช้สำหรับเซตการทำงานให้เป็นตัวแม่ (Master) ในกรณีที่มีการใช้วงจรนับหรือจับเวลาหลายชุด
4	ถ้าบิตนี้มีการเซตจะมีผลทำให้การทำงานของวงจรนับหรือจับเวลาของชุดอื่นมีผลต่อการทำงานของวงจรนับหรือจับเวลาชุดนี้
3	บิตนี้เป็นการกำหนดค่าของสัญญาณเอาท์พุต OFLAG เมื่อมีการส่งสัญญาณการทำงานจากวงจรนับหรือจับเวลาจากชุดอื่น
2	เป็นบิตที่สามารถเขียนได้อย่างเดียว ใช้สำหรับกำหนดค่าของบิต VAL ที่มีผลต่อค่าทางด้านเอาท์พุตของ OFLAG
1	เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดขั้วทางด้านเอาท์พุตของสัญญาณ OFLAG
0	ถ้าบิตนี้มีการเซต สัญญาณเอาท์พุตของ OFLAG จะมีการส่งออกไปยังขาสัญญาณภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังมีรีจิตเตอร์ใช้งานในโหมดจับเวลาและการนับอีกซึ่งได้แก่ รีจิตเตอร์เปรียบเทียบ 1 และ 2 (Compare1&2 Register), รีจิตเตอร์จับค่า (Capture Register), รีจิตเตอร์รับค่า (Load Register), รีจิตเตอร์โฮล (Hold Register) และรีจิตเตอร์นับค่า (Count Register) โดยรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถอ่านเพิ่มเติมได้ใน [2]

3.7 สรุป

จากคุณสมบัติของตัวประมวลสัญญาณดิจิตอลที่กล่าวมาทั้งหมด งานวิจัยที่กำลังศึกษาและพัฒนาอยู่นี้ต้องการความเร็วและการประมวลผลค่อนข้างสูง จึงได้มีการเลือกใช้ตัวประมวลสัญญาณดิจิตอล DSP56F805EVM ซึ่งเป็นบอร์ดที่มีการต่อหน่วยความจำและอุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิตอลไปเป็นแอนะล็อกเป็นที่เรียบร้อยแล้วเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน (Single Board) โดยการเขียนโปรแกรมการทำงานของชิฟนั้นจะต้องใช้ควบคู่กับคอมพิวเตอร์ในการคอมพายล์และทำการตรวจหาดีบัก โดยส่วนของดีบักนั้นสามารถทดสอบโดยผ่านชุดบอร์ดทางพอร์ตขนานหรือผ่านทางซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ได้โดยใช้ซอฟต์แวร์ Code Warrior ของบริษัท Metrowerks จำกัด [15,16] ในการเขียนโปรแกรม, คอมพายล์และตรวจหาดีบัก ในส่วนของวงจรการต่อใช้งานภายนอกนั้น อุปกรณ์ที่นำมาต่อใช้งานจะต้องมีการแยกโดดสัญญาณ (Opto Isolator) หรือมีส่วนของการป้องกันแรงดันเกินร่วมอยู่ เนื่องจากชุดตัวประมวลผลดังกล่าวใช้ระดับแรงดันไฟเพียง 3.3 โวลต์ ในการทำงาน จึงทำให้การออกแบบวงจรใช้งานค่อนข้างจะยุ่งยากเพียงเล็กน้อย โดยรายละเอียดขั้นตอนการออกแบบวงจรต่างๆ จะกล่าวถึงในบทต่อๆ ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
เทคนิคการควบคุมความเร็วโดยการประยุกต์ ทางด้านเฟสเซอร์และแบบจำลองสำหรับการออกแบบ

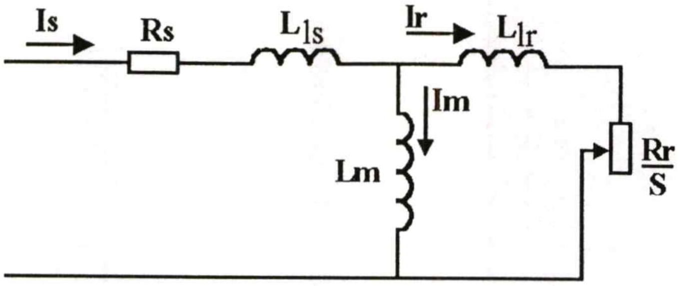
4.1 บทนำ

หากมีการกล่าวถึงในเรื่องการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ การออกแบบส่วนใหญ่จะใช้พื้นฐานของการควบคุมแบบเวกเตอร์และการควบคุมที่ทำให้มอเตอร์มีสมรรถนะสูงสุดโดยการกำหนดค่าการทำงานแบบสมบูรณ์และพยายามทำให้ต้นทุนของอินดักชั่นมอเตอร์โดยรวมมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับดีซีมอเตอร์ อันเป็นการทำนายถึงอนาคตได้ว่าการควบคุมอินดักชั่นมอเตอร์ส่วนใหญ่ที่จะใช้ในอนาคตจะใช้การควบคุมแบบเซอร์โว (การควบคุมแบบฝืนธรรมชาติ) และหลักการการควบคุมอินดักชั่นมอเตอร์แบบต่างๆ จะไม่เกิดขึ้นเลยหากผลลัพธ์การควบคุมดังกล่าวไม่ดีจริงในเรื่องแรงบิดและการควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กในมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ ซึ่งการควบคุมดังกล่าวเป็นการควบคุมที่ยากและอาศัยการค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการตรวจจับการทำงาน แต่การควบคุมที่ยุ่งยากนี้ก็สามารถแก้ไขได้โดยการใช้อุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์มาทำการควบคุมเพื่อให้ระบบมีความเชื่อมั่นสูง การควบคุมที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยการควบคุมกระแสแบบขอบเขตของอีสเตอร์รีซีส (Hysteresis Band) โดยสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตซ์ในชุดอินเวอร์เตอร์จะได้จากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณกระแสไซน์อ้างอิงกับสัญญาณกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งสัญญาณกระแสไซน์อ้างอิงนี้สามารถหาได้จากการประยุกต์ทางด้านเฟสเซอร์จากโครงสร้างของมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ ซึ่งการควบคุมนี้จะเรียกว่าการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยการอาศัยการประยุกต์ทางด้านเฟสเซอร์จากโครงสร้างของมอเตอร์ [17,18]

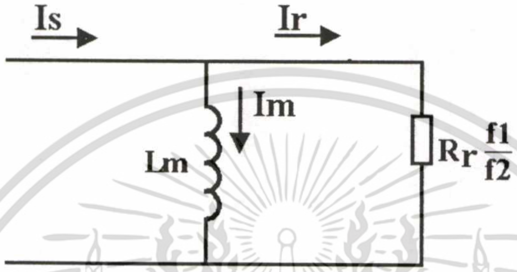
4.2 หลักการประยุกต์ทางด้านเฟสเซอร์สำหรับการควบคุมความเร็ว

โมเดลของอินดักชั่นมอเตอร์ที่ใช้สำหรับการสร้างอัลกอลึทึมสำหรับการควบคุมแบบเฟสเซอร์นี้จะอาศัยวงจรสมมูลแบบที (T) ในส่วนของสเตชั่นนารีของอินดักชั่นมอเตอร์ซึ่งแสดงในภาพที่ 4.1 และจากภาพที่ 4.1 เมื่อเราไม่คำนึงถึงแรงดันตกคร่อมที่ลีคเกจอินดั๊กแตนซ์และแรงดันตกคร่อมค่าความต้านทานที่สเตเตอร์เราจะได้วงจรสมมูลของมอเตอร์ดังภาพที่ 4.2 ซึ่งเราสามารถเขียนทิศทางของกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำในรูปของเฟสเซอร์ไดอะแกรมได้ในภาพที่ 4.3 ซึ่งค่าของกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (I_s) จะประกอบไปด้วยค่ากระแสแมกนิไตซิ้ง (I_m) ซึ่งเป็นตัวที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กให้กับมอเตอร์และค่ากระแสโรเตอร์ (I_r) ที่เป็นตัวสร้างแรงบิดในกับมอเตอร์

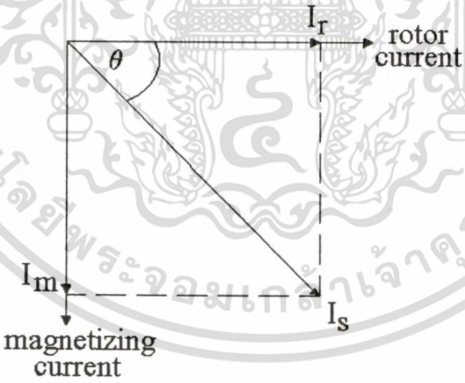
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.1 วงจรสมมูลของอินดักชั่นมอเตอร์



ภาพที่ 4.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำเมื่อไม่คิดแรงดันตกคร่อมที่ลีคเกจอินดั๊กแตนซ์ และแรงดันตกคร่อมค่าความต้านทานที่สเตเตอร์



ภาพที่ 4.3 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ

ในการวิเคราะห์ค่ากระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะทำในสภาวะคงที่ (Steady State) จากภาพที่ 4.2 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้โดยการสมมติแหล่งจ่ายไฟมีค่าเท่ากับ $V_m \cos \omega t$ ดังนั้นค่ากระแสแมกนิไตซิ้งจะมีค่าเท่ากับ

$$I_L = \frac{1}{L_m}\int V_m \cos \omega t \quad dt$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{V_m}{L_m\ \omega} \sin \omega\, t \tag{4.1}$$

และค่ากระแสที่โรเตอร์จะมีค่าเท่ากับ

$$I_R = \frac{V_m}{R_r \frac{f_1}{f_2}} \cos \omega\, t \tag{4.2}$$

ดังนั้นค่ากระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะเกิดจากผลรวมของค่ากระแสแมกนิไตซิ้งและค่ากระแสที่โรเตอร์ซึ่งเมื่อนำสมการ (4.1) และ (4.2) บวกกันจะได้

$$I_s = \frac{V_m}{L_m\ \omega} \sin \omega\, t \quad + \quad \frac{V_m}{R_r \frac{f_1}{f_2}} \cos \omega\, t \tag{4.3}$$

สามารถเขียนสมการใหม่ได้

$$I_s = I_m \sin\theta + I_r \cos\theta \tag{4.4a}$$

เมื่อ

$$\theta = \omega\ t \tag{4.5a}$$

เมื่อ θ คือ ค่ามุมองศาทางไฟฟ้า

ω คือ ค่าความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า (เรเดียนต่อวินาที)

หากเทียบค่ากระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์ (I_s) เป็นลำดับเฟส A ในกรณีของเฟสที่เหลืออีก 2 เฟส จะมีขนาดของกระแสที่เท่ากันกับกระแสในเฟส A เพียงแต่มุมที่ได้นั้นจะมีการเลื่อนออกไปเป็นมุม 120 และ 240 องศา โดยลำดับ

$$I_{sb} = I_m \sin\theta_b + I_r \cos\theta_b \tag{4.4b}$$

$$I_{sc} = I_m \sin\theta_c + I_r \cos\theta_c \tag{4.4c}$$

เมื่อ

$$\theta_b = \omega t - \frac{2\pi}{3} \tag{4.5b}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

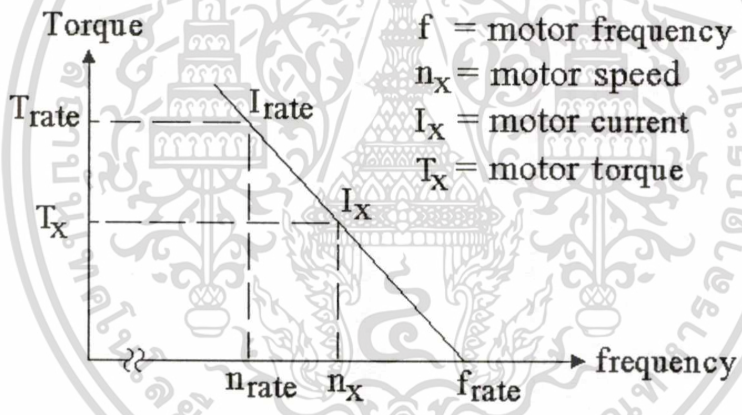
$$\theta_c = \omega t + \frac{2\pi}{3} \tag{4.5c}$$

และจากวงจรสมมูลในภาพที่ 4.2 หากค่ากระแสแมกนิไตซิ้งนี้มีค่าคงที่ นั่นหมายถึงค่าของฟลักซ์ที่แอร์แก๊ปก็จะมีค่าคงที่ การปรับค่าของกระแสที่โรเตอร์จะมีค่าเป็นสัดส่วนกับค่าของแรงบิดที่เกิดขึ้นที่แอร์แก็ป ดังแสดงในสมการ (4.6)

$$T_{em} \approx K_1 \, \phi_{ag} \, I_r \tag{4.6}$$

$$T_{em} \approx K_4 \, f_{sl} \tag{4.7}$$

จากสมการ (4.7) ค่าความถี่สลิปที่พบจะมีความสัมพันธ์ที่เป็นลักษณะเชิงเส้นกับค่าของแรงบิดที่มอเตอร์ดังแสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 กราฟคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของค่าแรงบิดและความเร็ว

ซึ่งค่าความถี่สลิปนี้สามารถหาได้จากค่าพิกัดความเร็วรอบที่ระบุในแผ่นป้ายของมอเตอร์ (ความเร็วรอบที่พิกัดกระแสของมอเตอร์) ยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์มีพิกัดความเร็วรอบ (n_{rate}) เท่ากับ 1430 รอบต่อนาที ที่กระแสพิกัด (I_{rate}) เท่ากับ 3.6 แอมแปร์ โดยสามารถให้แรงบิดที่พิกัด (T_{rate}) ได้ 9.6 นิวตัน-เมตร หากให้มอเตอร์ทำงานที่ความถี่พิกัด (50 เฮิรตซ์) และแรงดันที่พิกัด (380 โวลต์) ในกรณีไม่ได้ต่อภาระ (แรงบิดโหลดเท่ากับศูนย์) จะมีค่าความเร็วรอบเท่ากับ 1496 รอบต่อนาที ที่กระแส 2.2 แอมแปร์ แต่เมื่อมีการต่อภาระขนาด 2 นิวตัน-เมตร จะทำให้ความเร็วรอบที่ได้มีค่าลดลงเหลือเพียง 1483 รอบต่อนาที ที่กระแส 2.42 แอมแปร์ และหากเพิ่มภาระขนาด 4, 6 และ 8 นิวตัน-เมตรต่อไป จะได้ค่าความเร็วรอบลดเหลือ 1466, 1453 และ 1442 รอบต่อนาที ที่กระแส 2.59,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.91 และ 3.08 แอมแปร์ ตามลำดับ ซึ่งจากตัวอย่างจะเห็นได้ว่าค่าของแรงบิดจะมีค่าที่เป็นสัดส่วนกับค่าของสลิป (ความถี่สลิป) และค่าของกระแส ดังที่แสดงแสดงความสัมพันธ์ไว้ในภาพที่ 4.4 และสมการ (4.6) และ (4.7)

4.3 การสร้างอัลกอลึทึมของหลักการควบคุมความเร็วแบบเฟสเซอร์

จากความสัมพันธ์ที่กล่าวมาในข้างต้น หากเราสามารถควบคุมค่าความถี่และองค์ประกอบของกระแสแมกนีไตซิ้ง (I_m) ให้มีค่าเท่ากับค่าที่พิกัด นั้นหมายถึงจะทำให้ค่าของฟลักซ์ที่แอร์แก็ปมีค่าเท่ากับค่าที่พิกัดด้วย

$$E_{ag} = I_m \cdot X_m = K_3\ f\ \phi_{ag} \tag{4.8}$$

$$I_m = K_5\ f\ \phi_{ag} \tag{4.9}$$

เมื่อ K_5 คือ ค่าคงที่

ในการควบคุมค่าขององค์ประกอบของกระแสแมกนีไตซิ้ง (I_m) ประกอบกับการควบคุมค่าของกระแสที่โรเตอร์ให้มีค่าเท่ากับค่ากระแสที่พิกัดของแรงบิด $\left(I_{r(rate)}\right)$ เราจะได้สมการที่ใช้ในการสร้างกระแสอ้างอิงที่มีความสัมพันธ์กับค่าของแรงบิดควบคุม (t_c) ดังสมการ (4.10)

$$I_{aref} = I_m \sin\theta_a + I_{r(rate)} \frac{T_c}{T_{rate}} \cos\theta_a$$

$$= I_m \sin\theta_a + I_{r(rate)}\ t_c \cos\theta_a$$

$$I_{bref} = I_m \sin\theta_b + I_{r(rate)}\ t_c \cos\theta_b$$

$$I_{cref} = I_m \sin\theta_c + I_{r(rate)}\ t_c \cos\theta_c \tag{4.10}$$

เมื่อ $I_{aref}, I_{bref}, I_{cref}$ คือ ค่ากระแสไซน์อ้างอิงที่เฟส A, เฟส B และเฟส C (แอมแปร์)

T_c คือ ค่าแรงบิดที่ใช้ในการควบคุม (นิวตัน – เมตร)

T_{rate} คือ ค่าแรงบิดที่พิกัดของมอเตอร์ (นิวตัน – เมตร)

t_c คือ ค่าแรงบิดที่ใช้ในการควบคุมส่วนด้วยค่าแรงบิดพิกัดของมอเตอร์ (เปอร์ยูนิต)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (4.10) ค่าของกระแสอ้างอิงที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับค่าของแรงบิดดังที่ได้อธิบายมาแล้วในตัวอย่างข้างต้น และถ้าหากเราต้องการควบคุมค่าของกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะสามารถทำได้โดยการควบคุมผ่านค่าแรงบิดควบคุม (T_c) ซึ่งจะมีค่าสูงสุดเท่ากับค่าแรงบิดที่พิกัดของมอเตอร์ (T_{rate}) และเราจะได้ค่าของกระแสค่าๆ หนึ่งที่แรงบิดควบคุมนั้นๆ โดยที่ค่าของกระแสนี้ (กระแสแมกนีไตซิ้งและกระแสโรเตอร์) จะขึ้นอยู่กับค่าของความถี่ที่ป้อนให้มอเตอร์จึงทำให้ค่าความถี่สลิปที่ได้เป็นฟังก์ชันกับค่าของแรงบิดที่ใช้ในควบคุมการทำงาน [19] และจากภาพที่ 4.4 เราจะได้ความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$\omega = P\,\omega_r + \omega_{sl\,(rate)} \frac{T_c}{T_{rate}} \tag{4.11}$$

เมื่อ P คือ ค่าจำนวนคู่โพลของมอเตอร์

ω คือ ค่าความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส (เรเดียน / วินาที)

ω_r คือ ค่าความเร็วเชิงมุมที่โรเตอร์ (เรเดียน / วินาที)

$\omega_{sl\,(rate)}$ คือ ค่าความเร็วเชิงมุมสลิปที่พิกัดของมอเตอร์ (เรเดียน / วินาที)

ค่าความถี่สลิปที่พิกัดสามารถหาค่าได้จากรายละเอียดที่ระบุในแผ่นป้ายของมอเตอร์ดังที่ได้อธิบายความสัมพันธ์ไว้ในตัวอย่างข้างต้น จากตัวอย่างสามารถบอกถึงค่าของแรงบิดต่อค่าความถี่สลิปได้และจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ที่สเตเตอร์จากการปรับเปลี่ยนค่าของแรงบิด ค่าของมุมองศาสามารถหาได้โดยการอินติเกรตค่าความเร็วเชิงมุมเทียบกับเวลา

$$\theta_a = \int \omega\, dt$$

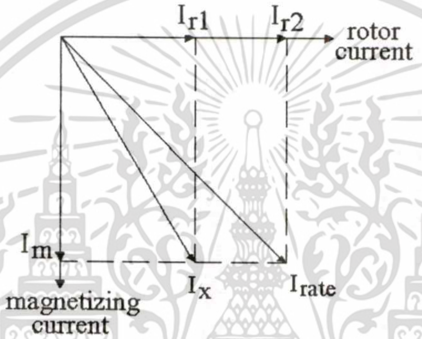
$$\theta_b = \int \omega\, dt - \frac{2\pi}{3}$$

$$\theta_c = \int \omega\, dt + \frac{2\pi}{3} \tag{4.12}$$

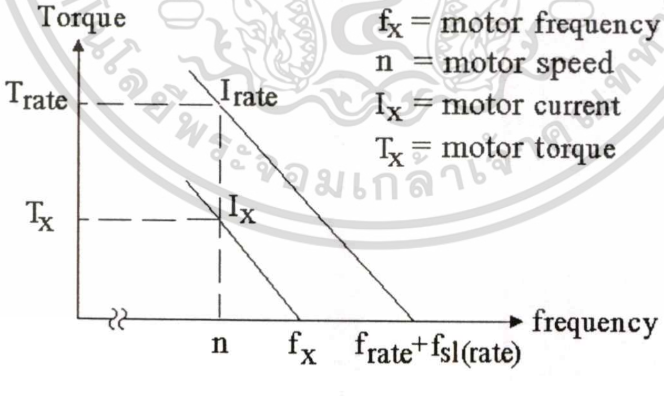
จากสมการ (4.10) ถึง (4.11) และภาพที่ 4.5 ถึง 4.6 สามารถอธิบายและยกตัวอย่างความสัมพันธ์การทำงานในงานขับเคลื่อนของมอเตอร์ที่ได้จากการควบคุมแบบเฟสเซอร์ได้ดังนี้ โดยสมมติให้มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วรอบ (n) เท่ากับ 1200 รอบต่อนาที (ไม่มีภาระ) ดังนั้นความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ (f) จะมีค่าเท่ากับ 40 เฮิรตซ์ และใช้กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์เท่ากับ 2.2 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$(I_m \approx 2.2\,A, I_r \approx 0\,A)$ หากมีการเพิ่มภาระขึ้นเป็น 1 ส่วน 2 เท่าของพิกัดมอเตอร์ จะทำให้ค่าความเร็วรอบที่ได้ตกไป เพื่อเป็นการชดเชยค่าความเร็วรอบที่ขาดหายไป มอเตอร์จะต้องดึงกระแสมากขึ้นเพื่อสร้างแรงบิดขึ้นมาชดเชย (ค่า I_r จะมากขึ้น) ทำให้ผลรวมกระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์ (I_x) มีค่ามากขึ้น ในขณะเดียวกันก็จะมีการชดเชยความถี่ (f_x) ที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์เป็น 41.16 เฮิรตซ์ เพื่อทำให้ค่าแรงบิดมอเตอร์ที่ได้มีค่าเท่ากับแรงบิดโหลด โดยยังคงมีความเร็วรอบ (n) เท่าเดิมที่ 1200 รอบต่อนาที และหากมีการต่อภาระมากขึ้นจนกระทั่งถึงค่าที่พิกัด ค่ากระแสของมอเตอร์จะมีค่าเท่ากับ 3.6 แอมแปร์ $(I_m \approx 2.2\,A, I_r \approx 2.84\,A)$ และจะมีค่าความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์เท่ากับ $f + f_{sl(rate)}$ หรือเท่ากับ 42.33 เฮิรตซ์ ซึ่งค่าที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้จะทำให้มอเตอร์ตัวเดิมนี้ยังคงทำงานอยู่ที่ความเร็วรอบ (n) เท่ากับ 1200 รอบต่อนาที เหมือนเดิม



ภาพที่ 4.5 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ที่ได้จากการควบคุมแบบเฟสเซอร์



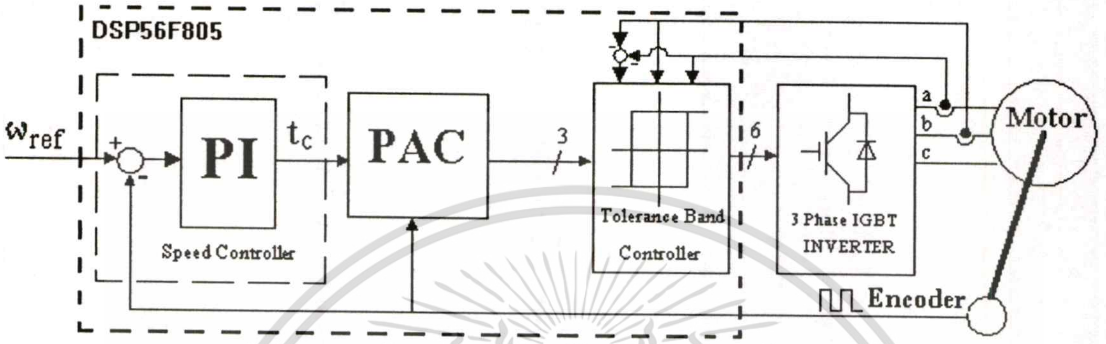
ภาพที่ 4.6 กราฟคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของค่าแรงบิดและความเร็วที่ได้จากการควบคุมแบบเฟสเซอร์

4.4 การวิเคราะห์เทคนิคการควบคุมความเร็วแบบเฟสเซอร์

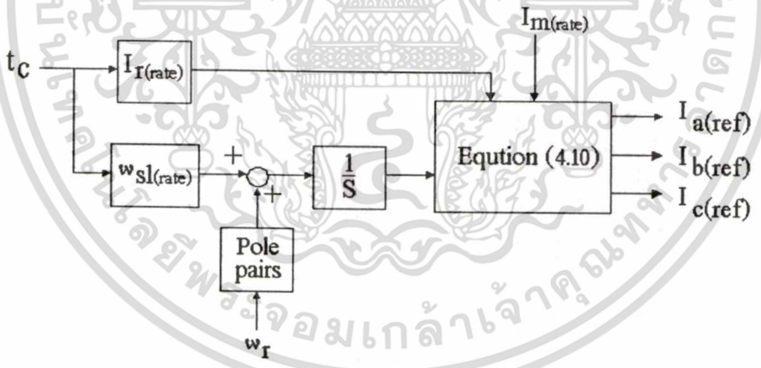
การวิเคราะห์การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แบบเฟสเซอร์จะถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.7 ซึ่งจากภาพจะเป็นการแสดงถึงบล๊อกไดอะแกรมของการควบคุมมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำโดยใช้หลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ทางด้านเฟสเซอร์จากโครงสร้างของมอเตอร์ในการควบคุมการทำงาน และในภาพที่ 4.8 จะเป็นการแสดงถึงบล๊อกไดอะแกรม PAC ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณกระแสไซน์อ้างอิงที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งการทำงานของบล๊อกไดอะแกรมสามารถแบ่งออกได้ตามวงรอบการทำงานซึ่งได้แก่ วงรอบกระแส (Current Control Loop) และวงรอบความเร็ว (Speed Loop) โดยสามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้



ภาพที่ 4.7 บล๊อกไดอะแกรมของการควบคุมมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำโดยใช้หลักการประยุกต์ทางด้านเฟสเซอร์จากโครงสร้างของมอเตอร์



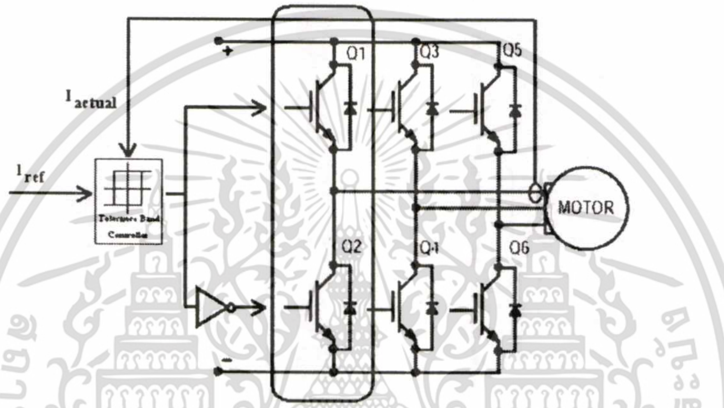
ภาพที่ 4.8 บล๊อกไดอะแกรมของ PAC

4.4.1 การทำงานของวงรอบกระแสที่ใช้ในการสร้างสัญญาณขับนำ

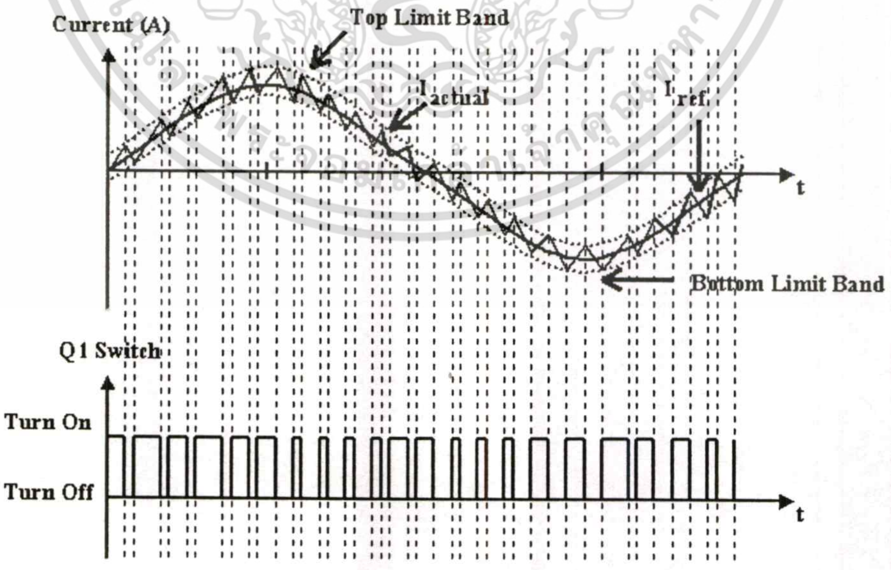
วงรอบการทำงานของกระแสนี้จะเป็นลูปที่อยู่ในส่วนท้ายของวงจรมีหน้าที่ในการสร้างสัญญาณขับนำให้กับสวิตซ์กำลัง ซึ่งการวิเคราะห์การเกิดของสัญญาณขับนำนี้จะวิเคราะห์เพียงกิ่งเดียวในวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากอีก 2 กิ่งที่เหลือก็จะอาศัยการทำงานในลักษณะแบบเดียวกัน การทำงานสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ การเปรียบเทียบจะอาศัยค่ากระแสไซน์อ้างอิงที่ได้จากการสร้างโดยใช้หลักการประยุกต์ทางเฟสเซอร์จากโครงสร้างของมอเตอร์กับค่ากระแสจริงที่จ่ายให้กับมอเตอร์ที่ผ่านหม้อแปลงกระแส (CT) แล้วมาเปรียบเทียบกันดังแสดงในภาพที่ 4.9 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามมิให้นำไปใช้เพื่อประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบนี้จะเกิดเป็นช่วงเวลาของสัญญาณที่ใช้ในการขับนำขึ้น ยกตัวอย่างเช่น หากค่ากระแสจริงที่ได้จากการป้อนกลับมีค่ามากกว่าค่ากระแสไซน์อ้างอิงบวกกับแบนด์ (Top Limit) จะทำให้สวิตซ์ตัวบน (Q1) ที่อยู่ในกิ่งที่ทำการวิเคราะห์นี้หยุดการทำงานและสวิตซ์ตัวล่าง (Q2) ที่อยู่ในกิ่งที่ทำการวิเคราะห์นี้จะทำงานแทน ในทางกลับกันหากขนาดของกระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์มีค่าลดลงถึงค่าขอบของกระแสไซน์อ้างอิงบวกกับแบนด์ล่าง (Bottom Limit) จะทำให้สวิตซ์ตัวล่าง (Q2) หยุดการทำงานและสวิตซ์ตัวบน (Q1) ทำงานแทน ซึ่งการทำงานจะเป็นไปในลักษณะนี้เรื่อยๆ ดังภาพที่ 4.9 (ข) ซึ่งค่าความถี่ที่เกิดจากการสวิตซ์นี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของแบนด์ที่ใช้ในการทำงาน [20] หากค่าของแบนด์แคบจะทำให้ความถี่สวิตชิ่งที่ได้มีค่าสูง เป็นต้น



(ก) วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่ใช้ในการวิเคราะห์การเกิดสัญญาณขับนำ



(ข) สัญญาณขับนำที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างกระแสไซน์อ้างอิงกับค่ากระแสจริง

ภาพที่ 4.9 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส และสัญญาณขับนำที่ได้จากการเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การทำงานของวงรอบความเร็วจากสภาวะหยุดนิ่งไปสู่ค่าความเร็วรอบที่ตั้งไว้

การทำงานจะเริ่มจากการกำหนดค่าความเร็วรอบที่ต้องการให้มอเตอร์หมุน (ω_{ref}) จากภาพที่ 4.5 ในลูปของความเร็วรอบ (ลูปนอก) จะสังเกตได้ว่าในตอนแรกมอเตอร์จะยังไม่หมุนทำให้ค่าความเร็วรอบที่วัดได้มีค่าเท่ากับศูนย์ และเมื่อนำค่าความเร็วรอบคำสั่ง (ω_{ref}) ลบด้วยค่าความเร็วรอบจากมอเตอร์ (ω_r) จะทำให้เกิดค่าผลต่างเกิดขึ้น (error) ซึ่งค่าผลต่างนี้จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการควบคุมแบบพีไอเพื่อหาค่าของแรงบิดควบคุม (t_c) ที่ใช้ในการกำหนดค่าของกระแสโรเตอร์ (I_r) ซึ่งเป็นค่ากระแสส่วนที่ไหลในโรเตอร์ดังที่แสดงไว้ในสมการ (4.10) และเมื่อนำไปรวมกับค่ากระแสที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก (I_m) จะทำให้ได้ขนาดของกระแสที่ใช้ในการสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงที่ใช้ในการขับนำสวิตซ์กำลังต่อไป และในระหว่างที่มอเตอร์มีการเริ่มหมุนหรือออกตัวไปได้แล้วนั้น ค่าผลต่างที่เกิดขึ้น (error) ก็จะมีค่าลดน้อยลงเนื่องจากการลบกันของค่าความเร็วรอบคำสั่ง (ω_{ref}) กับค่าความเร็วรอบจากมอเตอร์ (ω_r) ส่งผลทำให้ค่าของแรงบิดควบคุม (t_c) ที่ผ่านกระบวนการพีไอมีค่าลดลงน้อยลง ดังนั้นค่าของขนาดกระแสที่ใช้ในการสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงจะมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าของแรงบิดควบคุม (t_c) มีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นหมายถึงมอเตอร์มีการชนะแรงเฉื่อยออกตัวเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ดังนั้นค่ากระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะมีค่าเท่ากับค่ากระแสที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กนั้นเอง $(I_s \approx I_m)$ ซึ่งในจุดนี้ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีค่าเท่ากับค่าความเร็วรอบที่ต้องการให้มอเตอร์หมุน $(\omega_r \approx \omega_{ref})$ และในระหว่างกระบวนการสร้างขนาดของสัญญาณไซน์นี้จะมีอีกกระบวนการหนึ่งที่ทำไปพร้อมๆ กับกระบวนการดังกล่าวคือ กระบวนการสร้างความถี่ ซึ่งกระบวนการนี้จะมีการทำงานโดยอาศัยค่าของแรงบิดควบคุม (t_c) ที่ได้จากผลต่าง (error) ที่เกิดขึ้นผ่านกระบวนการพีไอเพื่อมากำหนดขนาดของค่าความเร็วรอบสลิป (ω_{sl}) ที่ใช้ในการชดเชยค่าความเร็วดังที่ได้แสดงบล๊อกการทำงานไว้ในภาพที่ 4.6 ซึ่งค่าของแรงบิดควบคุมที่ได้จากกระบวนการพีไอจะถูกนำไปคูณกับค่าของความเร็วรอบสลิปที่พิกัด $(\omega_{sl\,(rate)})$ ที่ได้จากข้อมูลพิกัดในแผ่นป้ายมอเตอร์ดังที่อธิบายไว้ในตอนต้น ค่าความเร็วรอบสลิปที่คำนวณได้นี้จะถูกนำไปรวมกับค่าของความเร็วรอบของมอเตอร์ (ω_r) ดังแสดงที่มาไว้ในสมการ (4.11) จากนั้นจะนำค่าความเร็วที่ได้ไปทำการอินทิเกรตเพื่อหาค่าของมุมที่ใช้ในการกำหนดตำแหน่งของสัญญาณไซน์อ้างอิงที่ใช้ในการขับนำสวิตซ์กำลัง ซึ่งพฤติกรรมของสัญญาณไซน์อ้างอิงในตอนเริ่มทำงานจะมีการทำงานที่ความถี่ต่ำและจะค่อยๆ มีความถี่สูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าความเร็วรอบมีค่าเท่ากับค่าความเร็วรอบคำสั่ง (ω_{ref})

4.4.3 การทำงานของวงรอบความเร็วจากค่าความเร็วรอบ ณ จุดหนึ่งไปอีกค่าความเร็วรอบหนึ่ง

ในขณะที่มอเตอร์มีการหมุนอยู่ที่ค่าความเร็วรอบที่ต้องการ ณ จุดๆ หนึ่ง แล้วมีการปรับเพิ่มค่าความเร็วรอบคำสั่งเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด จะส่งผลทำให้มีค่าผิดพลาด (error) เกิดขึ้นในลูปของความเร็วรอบ ซึ่งค่าดังกล่าวเกิดจากค่าความเร็วรอบคำสั่ง (ω_{ref}) ลบด้วยค่าความเร็วรอบจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

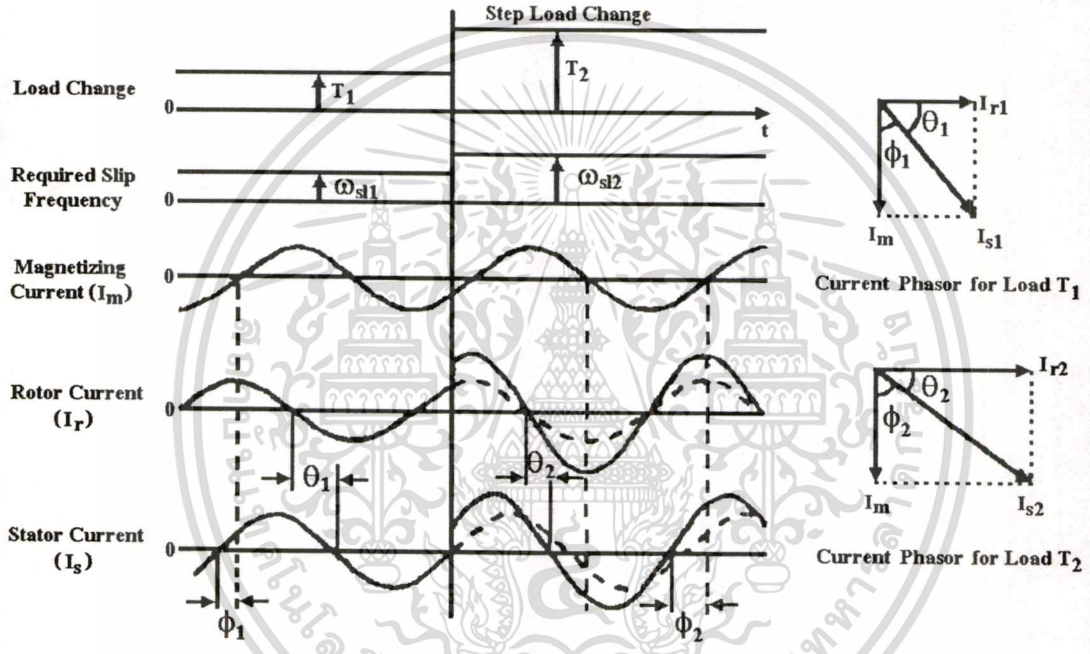
มอเตอร์ (ω_r) ผลต่างที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ค่าแรงบิดควบคุม (t_c) ที่ผ่านกระบวนการพีไอมีการเปลี่ยนแปลง ค่าของกระแสโรเตอร์ (I_r) ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงดังที่แสดงไว้ในสมการ (4.10) และที่ช่วงเวลาเดียวกันนี้ ค่าความถี่ที่จ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ก็มีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเนื่องจากผลคูณระหว่างค่าความเร็วรอบสลิปที่พิกัด $(\omega_{sl\,(rate)})$ กับค่าแรงบิดควบคุม (t_c) นี้มีการเปลี่ยนแปลงดังที่แสดงไว้ในสมการ (4.11) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไซน์อ้างอิงและความถี่นี้จะทำให้มอเตอร์มีการเร่งความเร็วรอบขึ้นโดยมีการดึงกระแสและปรับความถี่เพิ่มขึ้นเพื่อทำให้ความเร็วรอบที่ได้มีค่าเท่ากับค่าความเร็วรอบคำสั่ง (ω_{ref}) และเมื่อค่าความเร็วรอบที่วัดได้ (ω_r) มีค่าเท่ากับค่าที่ตั้งไว้ ค่าของกระแสไซน์อ้างอิงก็จะมีค่าลดลง เนื่องจากค่าผิดพลาด (error) ที่เกิดขึ้นในลูปความเร็วมีค่าลดน้อยลง ส่วนค่าความถี่ที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงมาทำงานที่ความถี่ใหม่ต่อไป ส่วนในกรณีที่มีการลดค่าความเร็วรอบคำสั่ง (ω_{ref}) ที่ต้องการลง มอเตอร์ก็จะมีพฤติกรรมคล้ายกับสภาวะเพิ่มค่าคำสั่งความเร็วรอบ เพียงแต่กระแสจะมีการเบ่งตัวออกและปรับความถี่ให้มีค่าลดลงตามค่าความเร็วรอบคำสั่ง (ω_{ref}) จากนั้นค่ากระแสไซน์อ้างอิงก็จะกลับเข้าสู่สภาวะปกติอีกครั้งหนึ่งที่ค่าความเร็วรอบคำสั่งใหม่

4.4.4 การทำงานของวงรอบความเร็วในสภาวะต่อโหลด

ตลอดเวลาที่มอเตอร์มีการทำงาน ระบบการควบคุมจะอาศัยการตรวจจับค่าความเร็วรอบที่ได้จากการวัดที่ตัวโรเตอร์ (ω_r) เพื่อหาค่าผิดพลาด (error) ที่ใช้ในการควบคุมค่าแรงบิดควบคุม (t_c) ตลอดเวลา ซึ่งในกรณีที่มีการทดสอบการต่อภาระโหลด ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ (ω_r) ที่ได้จะมีค่าลดลง ส่งผลทำให้เกิดค่าผิดพลาด (error) ขึ้นในลูปของความเร็วรอบ จึงทำให้ค่าของแรงบิดควบคุม (t_c) ที่ผ่านกระบวนการพีไอมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นค่ากระแสโรเตอร์ (I_r) ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าของแรงบิดควบคุม (t_c) ที่มากขึ้นดังสมการ (4.10) เพื่อต้องการที่จะสร้างแรงบิดที่ปลายเพลาให้ชนะแรงบิดโหลดและทำให้ค่าความเร็วรอบกลับเข้าสู่ค่าความเร็วรอบคำสั่ง (ω_{ref}) ซึ่งการเพิ่มค่ากระแสโรเตอร์ (I_r) นี้จะส่งผลทำให้ขนาดของกระแสที่ใช้ในการสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงมีขนาดสูงขึ้น ผลที่ได้ก็คือมอเตอร์จะมีการดึงกระแสมากขึ้นตามสัญญาณไซน์อ้างอิง ในขณะเดียวกันกับที่แรงบิดควบคุม (t_c) มีการเเปลี่ยนแปลงจะส่งผลทำให้ผลคูณระหว่างค่าความเร็วรอบสลิปที่พิกัด $(\omega_{sl\,(rate)})$ กับค่าแรงบิดควบคุม (t_c) มีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยดังสมการ (4.11) ซึ่งผลที่ได้ก็คือค่าขนาดของกระแสไซน์อ้างอิงและค่าความถี่ที่จ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้น เพื่อทำให้มอเตอร์สามารถหมุนอยู่ที่ค่าความเร็วรอบคำสั่งที่ต้องการได้โดยมีการรับภาระอยู่ตลอดเวลา และจากภาพที่ 4.10 จะเป็นการยกตัวอย่างของรูปคลื่นกระแสในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างฉับพลัน (สเตปโหลด) โดยสมมติให้มอเตอร์มีการรับค่าภาระอยู่ที่ค่าๆ หนึ่ง ซึ่งในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด (Step load change) นี้ จะสังเกตได้ว่าค่ากระแสโรเตอร์ (I_r) จะมีค่าสูงขึ้นตามค่าของแรงบิดควบคุม (t_c) ที่ผ่านกระบวนการพีไอ ส่วนค่ากระแสแมกนีไต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิ้ง (I_m) ยังคงมีค่าเท่าเดิม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสโรเตอร์นี้ จะส่งผลทำให้ค่ากระแสทางด้านสเตเตอร์ (I_s) มีค่าสูงขึ้น นั่นหมายถึงค่ากระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นอย่างฉับพลัน ดังแสดงด้วยเส้นทึบในภาพที่ 4.10 และในช่วงสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงนี้เอง ค่าความเร็วเชิงมุมสลิป (ω_{sl}) ที่เกิดจากเทอมของความเร็วเชิงมุมสลิปที่พิกัด $(\omega_{sl\,(rate)})$ คูณกับค่าแรงบิดควบคุม (t_c) ในสมการ (4.11) ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน จึงทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการ (4.11) มีค่าสูงขึ้น ซึ่งหมายถึงค่าความถี่ที่ใช้ในการทำงานมีค่าสูงขึ้นนั่นเอง หรือกล่าวง่ายๆ คือค่ากระแสและความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระของโหลด เพื่อต้องการควบคุมให้มอเตอร์ตัวนี้สามารถรองรับโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงได้โดยยังคงรักษาค่าความเร็วรอบเท่าเดิมนั่นเอง



ภาพที่ 4.10 รูปคลื่นกระแสที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สลิปต่อการเปลี่ยนแปลงค่าภาระแบบสเตปโหลด

4.4.5 การทำงานของวงรอบความเร็วในสภาวะปลดภาระ

ในสภาวะที่มอเตอร์มีการต่อภาระอยู่แล้วมีการปลดภาระออกทันทีทันใด ค่าของความเร็วรอบที่ได้จากการวัดที่ตัวโรเตอร์ (ω_r) จะมีค่ามากกว่าค่าความเร็วรอบคำสั่ง (ω_{ref}) ซึ่งจะทำให้ค่าผิดพลาด (error) มีค่าเป็นลบและเมื่อนำไปผ่านกระบวนการพีไอเพื่อหาค่าแรงบิดควบคุม (t_c) จะทำให้ค่าของแรงบิดควบคุมมีการเปลี่ยนแปลง ค่ากระแสโรเตอร์ (I_r) ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าของแรงบิดควบคุม (t_c) ตามไปด้วย ผลที่ได้ก็คือค่ากระแสโรเตอร์ (I_r) จะมีค่าลดลงจนกว่าค่าแรงบิดที่ปลายเพลามีค่าเท่ากับค่าแรงบิดที่โหลดคงเหลือนั้นๆ และในขณะเดียวกันกับที่แรงบิดควบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุม (t_c) มีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลทำให้ผลคูณระหว่างค่าความเร็วรอบสลิปที่พิกัด $(\omega_{sl\,(rate)})$ กับค่าแรงบิดควบคุม (t_c) มีการเปลี่ยนแปลงตาม ซึ่งผลที่ได้ก็คือค่าความถี่ที่จ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์จะมีค่าลดลงและมีการปรับตัวเองเพื่อทำให้ค่าความเร็วรอบ (ω_r) ที่เกินออกไปกลับเข้าสู่ค่าความเร็วรอบที่ต้องการ (ω_{ref}) อีกครั้งหนึ่ง

4.4.6 การทำงานของวงรอบความเร็วในสภาวะกลับทิศทางหมุน

การทำงานในสภาวะกลับทิศทางหมุนจะกล่าวจากสภาวะที่ความเร็วเท่ากับค่าๆ หนึ่ง เช่น ความเร็วของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 1500 รอบต่อนาที ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงคำสั่ง (ω_{ref}) ความเร็วเท่ากับ –1500 รอบต่อนาที จะทำให้ผลของการลบกันระหว่างค่าความเร็วคำสั่งและค่าความเร็วที่ได้จากการตรวจจับ (ω_r) มีค่าผลต่างในทางลบสูง ซึ่งผลต่างนี้เมื่อผ่านกระบวนพีไอจะทำให้ค่าของแรงบิดควบคุม (t_c) มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะเปลี่ยนแปลงมากหรือน้อย, เร็วหรือช้า ขึ้นอยู่กับค่าเกณฑ์พีไอที่ใช้ในกระบวนการดังกล่าว การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะทำให้ค่าของแรงบิดควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าบวกไปยังค่าลบ ส่งผลทำให้ค่าของกระแสไซน์อ้างอิงที่เกิดจากผลรวมระหว่างค่ากระแสสร้างสนามแม่เหล็กที่มีค่าที่พิกัด (I_m) กับค่าของกระแสโรเตอร์ (I_r) มีขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยดังสมการ (4.10) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะทำให้มอเตอร์มีการลดความเร็วลงเพื่อต้องการลดค่าผลต่างให้มีค่าลดน้อยลง ในช่วงการลดความเร็วนี้เองจะทำให้ขนาดของกระแสมีค่าสูงขึ้น ค่าผลคูณระหว่างความเร็วรอบสลิปที่พิกัด $(\omega_{sl\,(rate)})$ กับค่าแรงบิดควบคุม (t_c) จะมีค่าเป็นลบ และเมื่อรวมกับค่าของความเร็วรอบที่ได้จากการวัดที่ตัวโรเตอร์ (ω_r) จะทำให้ค่าของความเร็วรอบ (ω) ค่อยๆ มีค่าลดลง ดังแสดงไว้ในสมการ (4.11) ซึ่งผลที่ได้ก็คือค่าความถี่ของกระแสจะค่อยๆ มีค่าลดลง จนกระทั่งมอเตอร์เริ่มจะวิ่งเข้าสู่การหมุนศูนย์รอบต่อนาที ในช่วงนี้เองขนาดของกระแสจะมีค่าสูงสุด (กระแสที่พิกัด) มุมเฟสจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางในทางตรงกันข้ามขึ้น (ความถี่เริ่มมีค่าติดลบ) ในขณะที่วงรอบความเร็วก็ยังคงมีการตรวจสอบค่าความเร็วของมอเตอร์ (ω_r) ตลอดเวลาว่าค่าผลของการลบกันระหว่างค่าความเร็วคำสั่ง (ω_{ref}) และค่าความเร็วที่ได้จากการตรวจจับ (ω_r) มีค่าผลต่างเท่ากับศูนย์หรือไม่ ในช่วงนี้การทำงานของมอเตอร์จะเริ่มมีการหมุนกลับในอีกทิศทางหนึ่งซึ่งจะทำให้ผลของความเร็วที่ได้จากการตรวจจับมีค่าเป็นลบ เมื่อนำค่าความเร็วคำสั่ง (ω_{ref}) ลบกับค่าความเร็วที่ได้จากการตรวจจับ (ω_r) จะทำให้ค่าผลต่าง (error) เริ่มมีค่าลดลง ซึ่งค่าผลต่างนี้เมื่อผ่านกระบวนพีไอจะทำให้ค่าของแรงบิดควบคุม (t_c) มีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลทำให้กระแสไซน์อ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงตาม ซึ่งการทำงาน ณ จุดนี้จะทำให้มอเตอร์มีการเพิ่มขนาดของกระแสที่ใช้ในการขับเคลื่อนมากขึ้นพร้อมกับปรับความถี่ให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อเร่งให้ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้มีค่าเท่ากับค่าความเร็วคำสั่ง (ω_{ref}) ดังการทำงานที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อการทำงานจากสภาวะหยุดนิ่งไปยังค่าความเร็วรอบคำสั่ง (ω_{ref}) นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในควบคุม

หลักการควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำโดยใช้การประยุกต์ทางด้านเฟสเซอร์จะอาศัยข้อมูลจากแผ่นป้ายของมอเตอร์ (Name plate) ประกอบกับการคำนวณเพื่อการประมาณค่าต่างๆ ที่ใช้งาน โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ขนาดพิกัด 2 แรงม้า (ดังที่แสดงไว้ในภาคผนวก) มาทำการคำนวณเพื่อหาค่ากระแสและแรงบิด โดยมอเตอร์ที่ใช้จะมีรายละเอียดค่าพารามิเตอร์ดังนี้

มอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาดพิกัด 2 แรงม้า แรงดัน 380 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ ขดลวดต่อแบบสตาร์ จำนวนขั้วแม่เหล็ก 4 ขั้ว ความเร็วที่พิกัดจากการทดสอบ 1430 รอบต่อวินาที ค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ (R_s) และโรเตอร์ (R_r) เท่ากับ 3.965 และ 3.477 โอห์ม ค่าความเหนี่ยวนำร่วม (L_m) เท่ากับ 0.29212 เฮนรี่ ค่าความเหนี่ยวนำในสเตเตอร์และโรเตอร์ ($L_{ls} = L_{lr}$) เท่ากับ 0.01929 เฮนรี่ จากค่าพารามิเตอร์ที่ได้ สามารถหาค่ากระแสต่างๆ ได้จากสมการดังต่อไปนี้ [21,22]

$$\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & \omega_1 L_s & L_m p & \omega_1 L_m \\ -\omega_1 L_s & R_s + L_s p & -\omega_1 L_m & L_m p \\ L_m p & \omega_{sl} L_m & R_r + L_r p & \omega_{sl} L_r \\ -\omega_{sl} L_m & L_m p & -\omega_{sl} L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} \tag{4.13}$$

เมื่อ

	V_{qs}, V_{ds}	คือ ค่าแรงดันที่สเตเตอร์ที่แกน q และแกน d
	V_{qr}, V_{dr}	คือ ค่าแรงดันที่โรเตอร์ที่แกน q และแกน d
	i_{qs}, i_{ds}	คือ ค่ากระแสที่สเตเตอร์ที่แกน q และแกน d
	i_{qr}, i_{dr}	คือ ค่ากระแสที่โรเตอร์ที่แกน q และแกน d
	R_s, R_r	คือ ค่า ค.ต.ท. ที่สเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์
	L_s	คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมที่สเตเตอร์ของมอเตอร์
	L_r	คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมที่โรเตอร์ของมอเตอร์
	L_m	คือ ค่าความเหนี่ยวนำในการสร้างสนามแม่เหล็ก
	p	คือ ตัวดำเนินการ (Differential)

ในการวิเคราะห์จะกระทำในสภาวะคงที่ (Steady stage) ที่พิกัดของมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ โดยอ้างถึงแกนหมุน (Synchronously rotating reference frame) ซึ่งการวิเคราะห์ในสภาวะคงที่ เทอมของ p หรือตัวดำเนินการ (Differential) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ และค่าของแรงดัน V_{qs} จะมีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์ โดยที่ค่า V_{ds} จะมีค่าเท่ากับค่าแรงดันสูงสุดที่ป้อนให้กับมอเตอร์ต่อเฟส ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าพีค (Peak) ของแรงดันที่ใช้งานต่อเฟสหรือประมาณเท่ากับ 310 โวลต์ ส่วนค่าแรงดัน V_{qr} และ V_{dr} จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์ เนื่องมากจากวงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก [4] และเมื่อทำการแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้ลงในสมการ (4.13) จะได้ค่า i_{qs} = -3.40852, i_{ds} = 3.57422, i_{qr} = 0.40717 และ i_{dr} = -3.6629 แอมแปร์ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปหาค่าของฟลักซ์ที่โรเตอร์ (ψ_r) และค่าแรงบิดที่พิกัดของมอเตอร์

$$\psi_r = \sqrt{\left(L_m i_{qs} + L_r i_{qr}\right)^2 + \left(L_m i_{ds} + L_r i_{dr}\right)^2} \tag{4.14}$$

$$T_e^* = \frac{3}{2}\frac{P}{2} L_m\left(i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}\right) \tag{4.15}$$

จะได้ค่าฟลักซ์ที่โรเตอร์เท่ากับ 0.8742 เวเบอร์ และค่าแรงบิดที่พิกัดเท่ากับ 9.66 นิวตัน-เมตร และเมื่อนำค่าที่ได้ทั้งหมดแทนลงในสมการ (4.16) ถึง (4.18) จะได้ค่าของกระแสที่โรเตอร์, กระแสแมกนีไตซิ้งและกระแสพิกัดที่ป้อนให้กับมอเตอร์เท่ากับ 3.9289, 2.9927 และ 4.9389 แอมแปร์ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้นี้เป็นค่าพีค (peak) เมื่อทำเป็นค่าอาร์เอ็มเอสจะได้ 2.778, 2.116 และ 3.492 แอมแปร์ จะเห็นได้ว่าค่ากระแสอินพุตจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าพิกัดที่อยู่ในแผ่นป้ายของมอเตอร์

$$I_m = \frac{1}{L_m}\psi_r \tag{4.16}$$

$$I_{r(rate)} = \frac{4}{3}\frac{1}{P}\frac{L_r}{L_m}\frac{T_e^*}{\psi_r} \tag{4.17}$$

$$I_s = \sqrt{I_m^{\,2} + I_{r(rate)}^{\,2}} \tag{4.18}$$

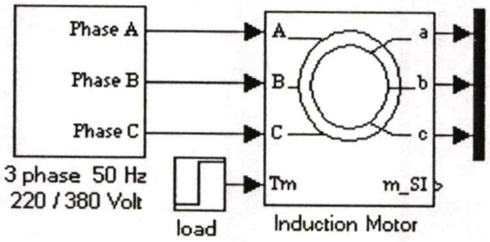
นอกจากวิธีการหากระแสและแรงบิดที่พิกัดที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ การหาค่าอีกรูปแบบหนึ่งสามารถหาได้โดยใช้วงจรสมมูลของมอเตอร์แล้วทำการคำนวณในลักษณะวงจรทางไฟฟ้า ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะได้เช่นเดียวกันกับวิธีที่แสดงดังที่ผ่านมาแล้วข้างต้น

4.6 โมเดลและการจำลองโดยใช้เทคนิคการควบคุมความเร็วรอบแบบเฟสเซอร์

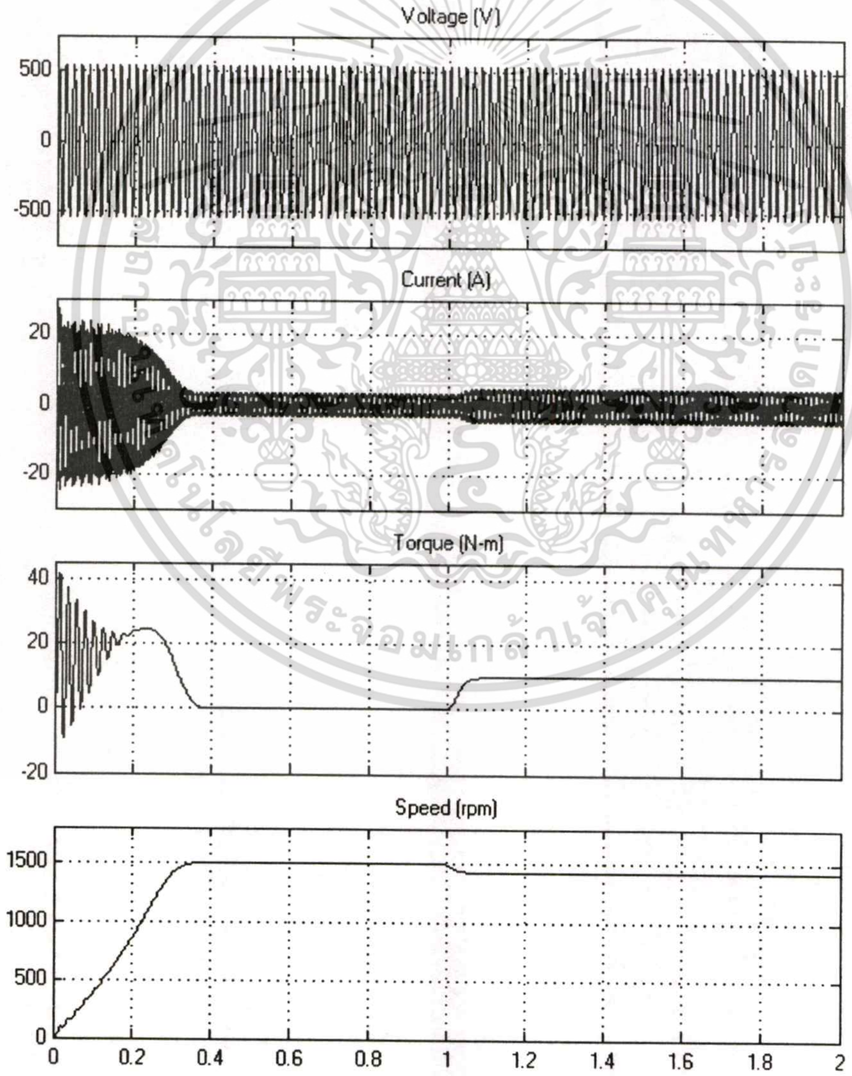
การทดลองหลักการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเซอร์ในวิทยานิพนธ์นี้ จะเป็นการจำลองกับโปรแกรม MATLAB & Simulink [23, 24] โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ (ดังแสดงในภาคผนวก) เพื่อใช้เป็นค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในโปรแกรมดังกล่าว การจำลองจะเริ่มจากการทดสอบจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ที่ขนาดแรงดันและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ที่พิกัดดังโมเดลการควบคุมที่แสดงไว้ในภาพที่ 4.11 เพื่อดูผลการตอบสนองของความเร็วและแรงบิดที่ได้ในสภาวะปกติ (Direct Online) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบกับการควบคุมที่ได้จากหลักการควบคุมแบบเฟสเซอร์ต่อไป



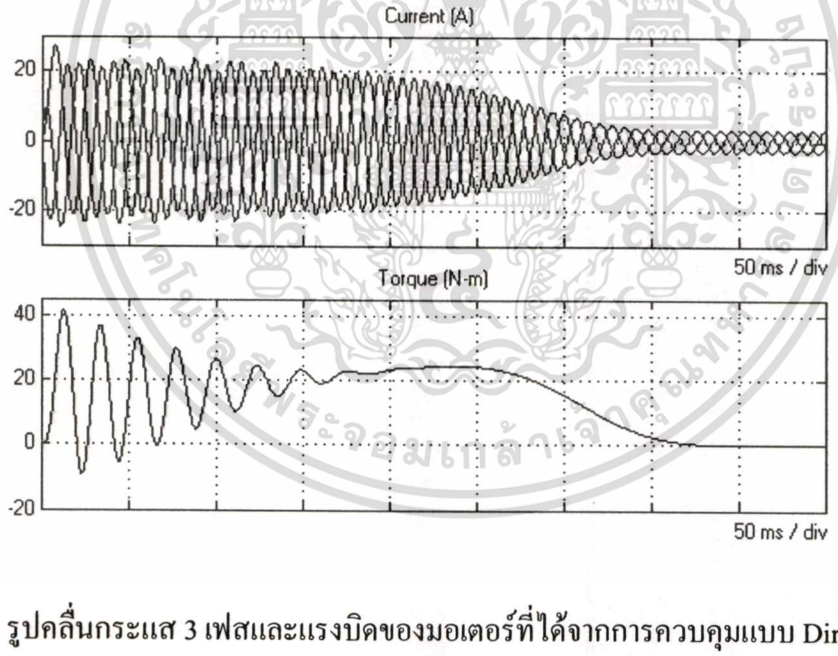
ภาพที่ 4.11 โมเดลการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยตรง (Direct Online)



ภาพที่ 4.12 รูปคลื่นแรงดันไลน์, กระแส, แรงบิดและความเร็วรอบที่ได้จากการป้อนไฟที่มีขนาดแรงดันและความถี่ที่พิกัดให้กับมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.12 แสดงรูปคลื่นแรงดันไลน์, กระแส, แรงบิดและความเร็วรอบที่ได้จากการจำลองโดยการป้อนไฟที่มีขนาดแรงดันและความถี่ที่พิกัดให้กับมอเตอร์ จะเห็นได้ว่าแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะมีค่าสูงสุด (Peak) เท่ากับ 537 โวลต์ หรือเท่ากับค่าอาร์เอ็มเอสประมาณ 380 โวลต์ จากจุดนี้จะเห็นได้ว่ากระแสใช้งานในตอนสตาร์ท (Start) จะมีค่าสูงถึงประมาณ 6 เท่าของกระแสพิกัด เนื่องมาจากค่าสลิปในตอนเริ่มทำงานจะมีค่าเท่ากับ 1 ส่งผลทำให้ค่าของความต้านทานทางด้านโรเตอร์ที่มีค่าต่ำ จึงทำให้ค่าของกระแสในตอนสตาร์ทมีค่าสูง ซึ่งค่ากระแสนี้จะถูกนำมาใช้ในการสร้างแรงบิดเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนให้มอเตอร์หมุนออกตัว โดยในช่วงสตาร์ทจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าของแรงบิดที่ได้จะมีการเกิดออสซิลเลตขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะค่าฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าของกระแสในแต่ละเฟสที่มีการแกว่งไปมาในลักษณะที่มีขนาดไม่สมดูลย์กันดังภาพที่ 4.13 ส่งผลทำให้ค่าความเร็วรอบที่ได้ตอนออกตัวซึ่งได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.12 เกิดการแกว่งหรือเกิดการกระเพื่อมตามไปด้วย ส่วนในช่วงที่มีการต่อภาระที่พิกัดที่เวลา 1 วินาที จะสังเกตเห็นได้ว่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จะมีการค่าลดลง ส่วนกระแสจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อสร้างแรงบิดให้กับมอเตอร์เพื่อใช้ในการขับโหลด ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติของการรับภาระของมอเตอร์โดยทั่วไป

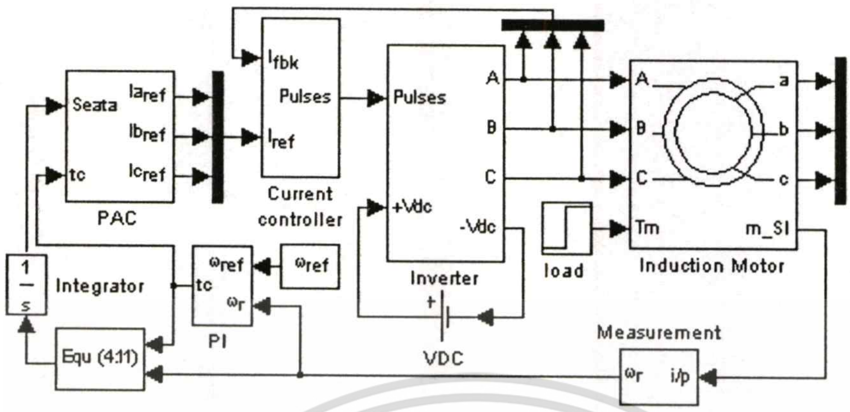


ภาพที่ 4.13 รูปคลื่นกระแส 3 เฟสและแรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากการควบคุมแบบ Direct Online

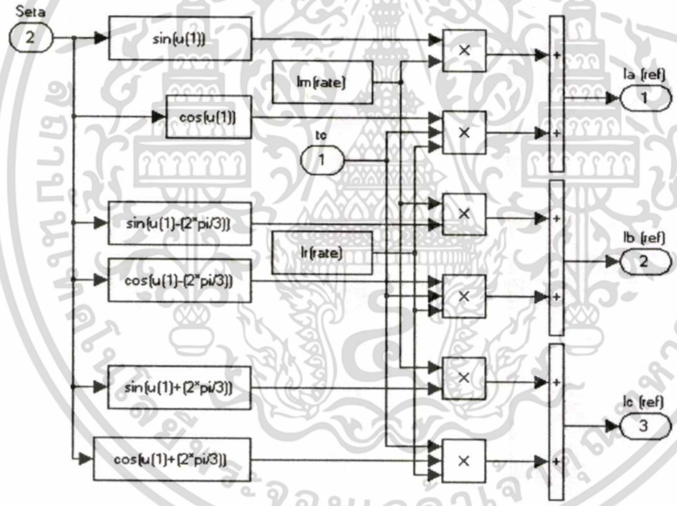
จากภาพที่ 4.14 จะเป็นการแสดงถึงโมเดลที่ใช้ในการจำลองหลักการควบคุมแบบเฟสเซอร์และในภาพที่ 4.15 จะเป็นการแสดงถึงโมเดลภายในบล๊อกไดอะแกรมของหลักการควบคุมแบบเฟสเซอร์ที่ใช้ในการสร้างกระแสไซน์อ้างอิงที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งการทดลองจะเริ่มจากการควบคุมให้มอเตอร์ทำงานจากสภาวะหยุดนิ่งจนถึงค่าความเร็วรอบที่ตั้งไว้ จากนั้นทำการต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาระโหลดเพื่อดูผลการสนองของมอเตอร์ที่มีต่อโหลดเทียบกับการควบคุมที่ได้จากการควบคุมแบบ Direct Online และการควบคุมแบบสเกล่าร์ต่อไป



ภาพที่ 4.14 โมเดลการควบคุมแบบเฟสเซอร์ที่ใช้ในการทดลองในโปรแกรม Matlab & Simulink

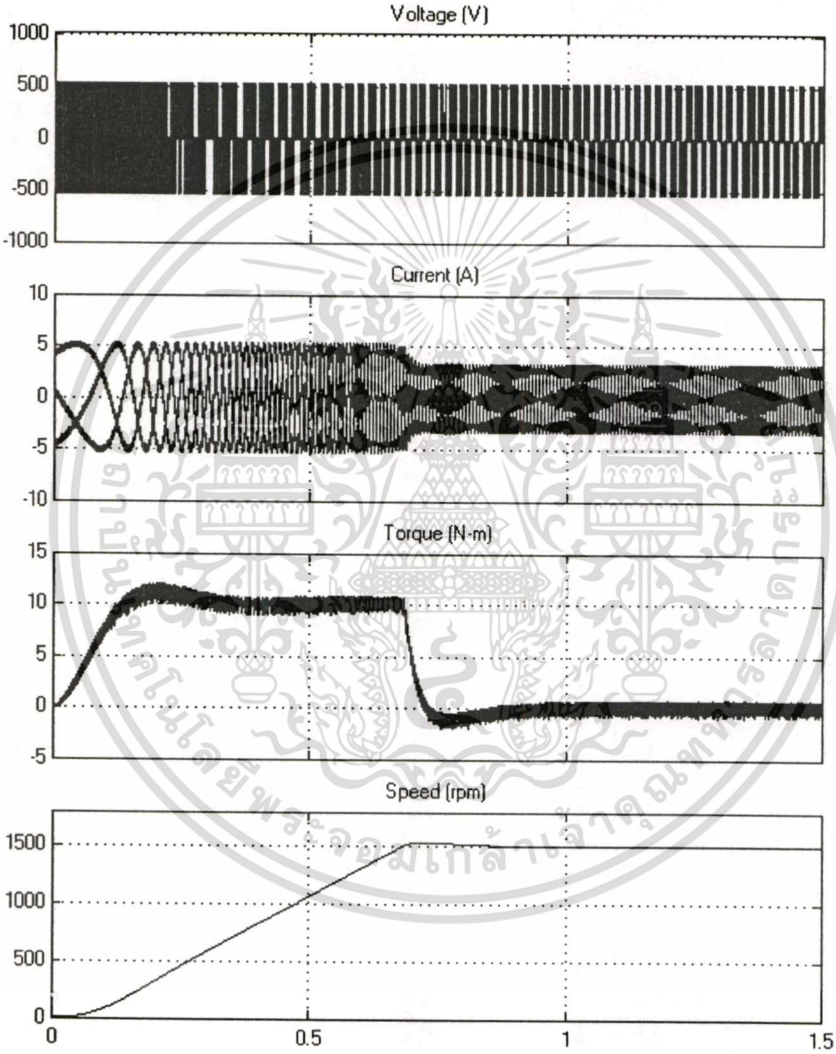


ภาพที่ 4.15 โมเดลภายในบล๊อก PAC (Phasor Applied Speed Control)

การทดสอบหลักการควบคุมแบบเฟสเซอร์จะเริ่มจากการกำหนดค่าความเร็วรอบที่ต้องการไว้ จากนั้นจึงทำการรันโปรแกรมเพื่อดูสมรรถนะการเข้าสู่สภาวะคงที่ของมอเตอร์ในขณะไร้ภาระ โดยที่การทดสอบนี้จะกำหนดให้ค่าความเร็วรอบคำสั่งเท่ากับ 1500 รอบต่อนาที จากภาพที่ 4.16 ค่าของความเร็วรอบที่เกิดขึ้นจะมีค่าเริ่มต้นตั้งแต่ศูนย์และมีการไต่การทำงานจากความถี่ต่ำไปยังความถี่สูง จึงทำให้ค่าของแรงบิดที่ได้ไม่เกิดการกระเพื่อมขึ้น และการควบคุมดังกล่าวสามารถให้ค่าแรงบิดที่พิกัดได้ตลอดย่านที่มีการเริ่มหมุน ค่าของความถี่และแรงดันมูลฐานที่ได้จะมีค่าต่ำในช่วงที่มอเตอร์เริ่มออกตัวและจะค่อยๆ มีค่าสูงขึ้นตามการควบคุมของสวิตซ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไซน์อ้างอิงกับกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งค่าของแรงบิดนี้จะมีการลิมิตไว้ที่ค่าแรงบิดพิกัดของมอเตอร์ นั่นหมายถึงเป็นการลิมิตค่าของกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ด้วย รูปคลื่นกระแสที่นำมาแสดงนี้จะเป็นรูปคลื่นกระแสทั้ง 3 เฟส ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ จะเห็นได้ว่าขนาดของกระแสจะมีค่าสูงสุด (Peak) เท่ากับ 5.09 แอมแปร์ และเมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าเท่ากับค่าความเร็วคำสั่งแล้วขนาดของกระแสที่ใช้จะเริ่มมีค่าลดลงพร้อมกับค่าของแรงบิดที่มีค่าลดลงตาม เนื่องจากมอเตอร์ได้มีการชนะแรงเฉื่อยที่ใช้ในการออกตัวเรียบร้อยแล้ว

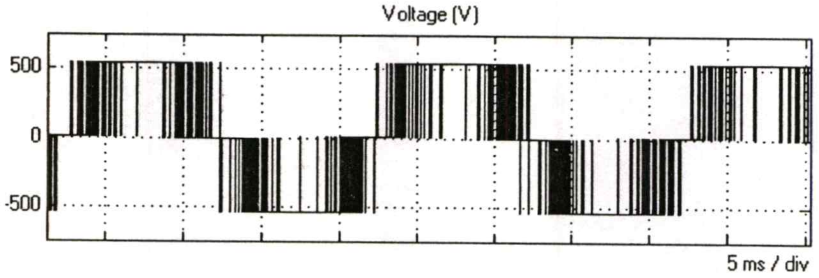


ภาพที่ 4.16 รูปคลื่นแรงดันไลน์, กระแส, แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการควบคุมแบบเฟสเซอร์

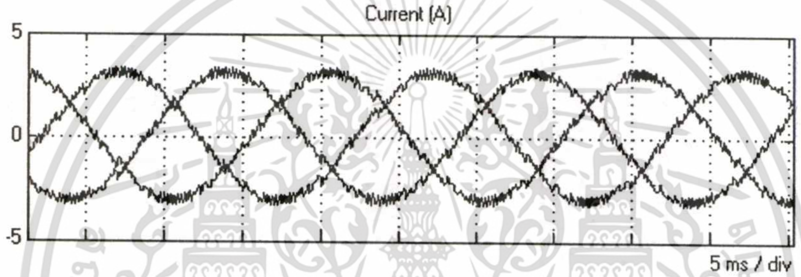
ภาพที่ 4.17 และ 4.18 จะเป็นการแสดงถึงรูปคลื่นแรงดันไลน์และกระแสที่ได้จากการควบคุมแบบเฟสเซอร์ที่ความเร็วคำสั่ง 1500 รอบต่อนาที ซึ่งรูปคลื่นของแรงดันที่ได้จะเกิดจากการทำงานของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สวิตซ์กำลังที่อาศัยหลักการควบคุมแบบฮีสเตอร์รีซีสแบนด์ดังที่ได้กล่าวถึงกระบวนการทำงานมาแล้วในหัวข้อข้างต้น



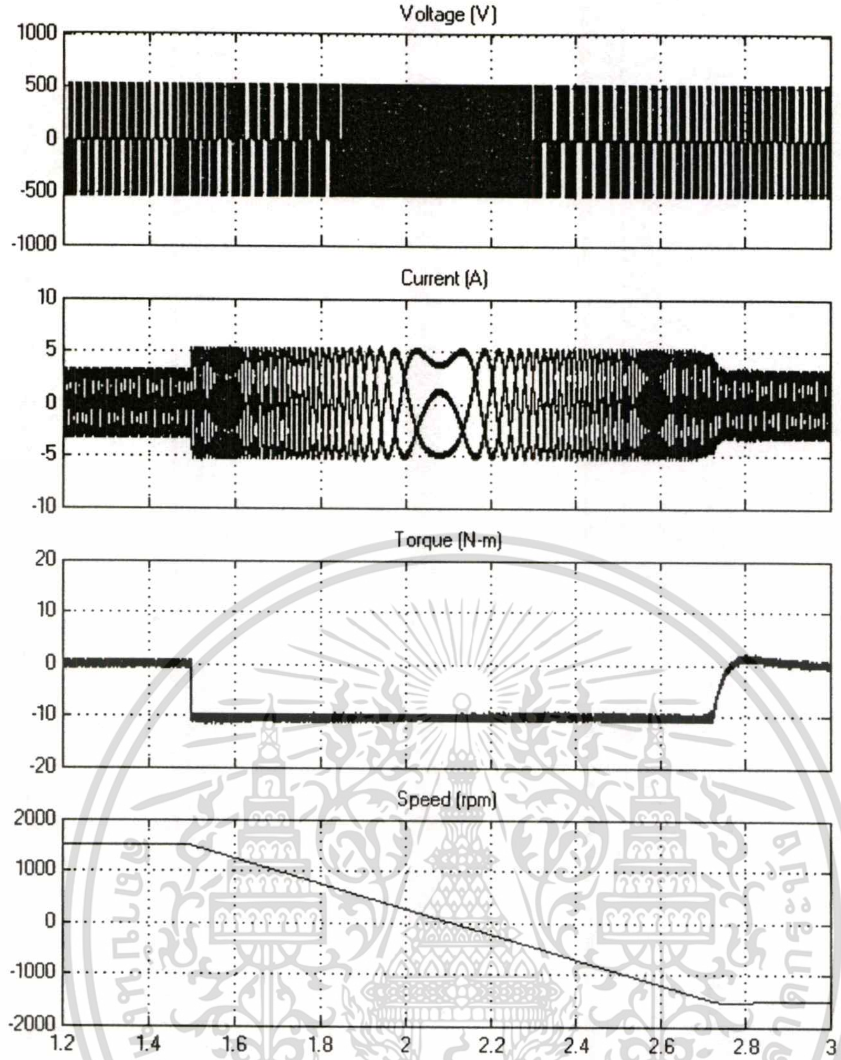
ภาพที่ 4.17 รูปคลื่นแรงดันไลน์ที่ได้จากการควบคุมแบบเฟสเซอร์



ภาพที่ 4.18 รูปคลื่นกระแส 3 เฟส ที่ได้จากการควบคุมแบบเฟสเซอร์

ส่วนในภาพที่ 4.19 จะเป็นการแสดงถึงรูปคลื่นแรงดันไลน์, กระแส, แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบกลับทิศทางหมุนแบบสเตปคำสั่งในสภาวะไร้ภาระจากค่าความเร็วรอบ 1500 ไปยัง –1500 รอบต่อนาที ที่เวลา 1.5 วินาที จะพบว่าค่าแรงบิดมีค่าลดลงโดยที่ค่าแรงบิดจะมีค่าติดลบ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากกระบวนการควบคุมที่ต้องการจะให้มอเตอร์มีการลดค่าความเร็วลง แต่เนื่องจากตัวมอเตอร์เองมีค่าความเฉื่อยอยู่ประกอบกับค่าเกณฑ์ที่ใช้ในการควบคุมที่ได้รับการออกแบบมีค่าน้อยจึงทำให้ค่าความเร็วรอบที่ได้ค่อยๆ มีค่าลดลงจนกระทั่งมีค่าเท่ากับศูนย์และเริ่มหมุนกลับทิศทางตามคำสั่งที่ตั้งไว้ ในช่วงที่มีการลดความเร็วและเปลี่ยนทิศทางหมุนจะสังเกตได้ว่าความถี่ของกระแสจะค่อยๆ มีค่าลดลงในขณะเดียวกันขนาดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในจุดนี้มอเตอร์ยังคงรักษาค่าแรงบิดที่พิกัดได้ตลอดเวลาที่มีการลดความเร็วและกลับทิศทางหมุน จนกระทั่งมอเตอร์มีการหมุนไปยังค่าความเร็วคำสั่งที่ตั้งไว้นั่นเอง และเมื่อมอเตอร์มีค่าความเร็วเข้าใกล้ค่าความเร็วรอบคำสั่ง ค่าของแรงบิดที่ได้จะเริ่มมีค่าลดลงและจะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าเท่ากับค่าความเร็วรอบคำสั่ง และในช่วงที่จะมีการกลับทางหมุนของมอเตอร์แบบต่อเนื่องจะสังเกตได้ว่า รูปคลื่นกระแสทั้ง 3 เฟสจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีการเลื่อนมุมของเฟสจนกระทั่งลำดับของเฟสมีการเปลี่ยนทิศทางจากเฟส A, B, C ไปเป็น B, A, C เป็นต้น

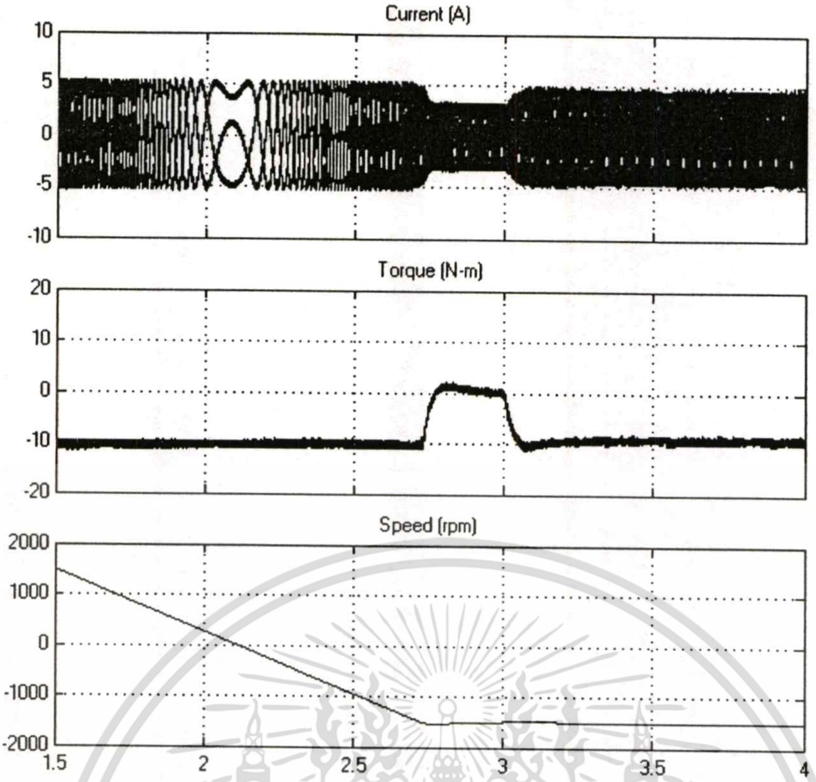
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



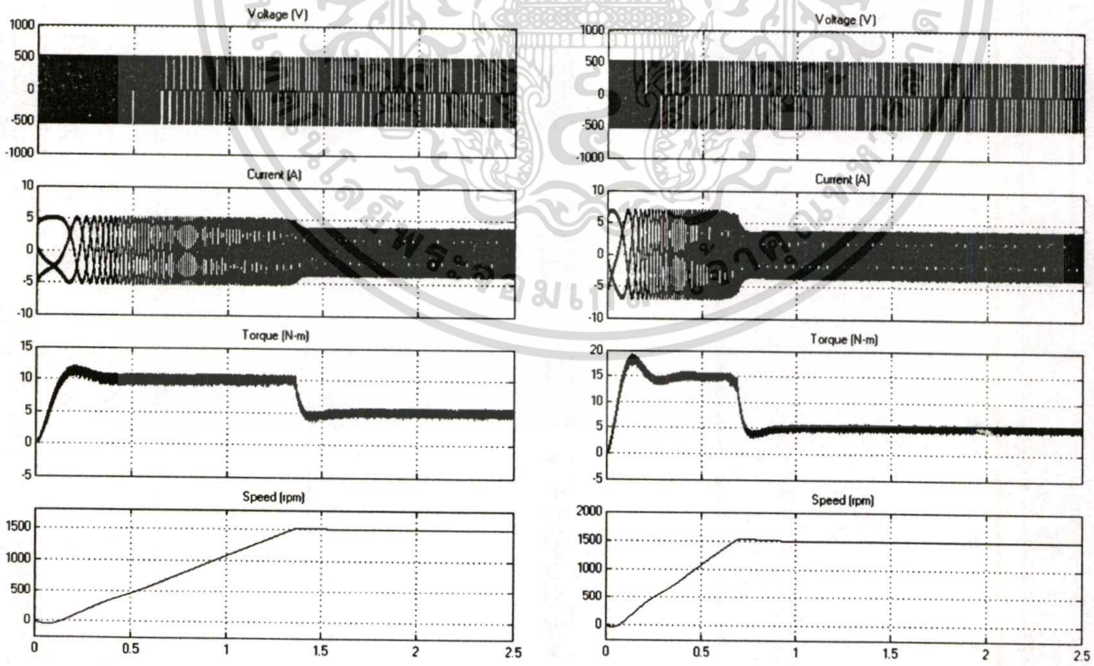
ภาพที่ 4.19 รูปคลื่นแรงดันไลน์, กระแส, แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบกลับทิศทางหมุนในสภาวะไร้ภาระ

ภาพที่ 4.20 จะเป็นการแสดงถึงรูปคลื่นกระแส, แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบกลับทิศทางหมุนในสภาวะไร้ภาระและมีการต่อภาระที่พิกัดที่เวลา 3 วินาที จะพบว่าการควบคุมการทำงานของมอเตอร์สามารถกระทำได้ทั้งในสภาวะที่มีการหมุนไปและหมุนกลับโดยยังคงรักษาค่าของความเร็วรอบคำสั่งได้ตลอดเวลา และจากภาพที่ 4.21 จะแสดงถึงรูปคลื่นกระแส, แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบโดยการต่อภาระขนาด 5 นิวตัน-เมตร ตลอดเวลาที่มีการขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อดูผลการตอบสนองความเร็วรอบ โดยในภาพที่ 4.21 (ก) จะเป็นการควบคุมค่าแรงบิดควบคุม (tc) เท่ากับ 1 เปอร์ยูนิต และภาพที่ 4.21 (ข) จะเป็นการควบคุมค่าแรงบิดควบคุม (tc) เท่ากับ 1.5 เปอร์ยูนิต หากย้อนกลับไปยังภาพที่ 4.16 มอเตอร์ต้องใช้เวลาประมาณ 800 มิลลิวินาที ในการหมุนจากค่าความเร็ว 0 รอบต่อนาทีไปยังค่าความเร็วคำสั่ง 1500 รอบต่อนาที ในสภาวะไร้ภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.20 รูปคลื่นกระแส, แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบกลับทิศทางหมุนในสภาวะไร้ภาระและมีการต่อภาระที่พิกัดที่เวลา 3 วินาที



(ก) ค่าแรงบิดควบคุม (tc) = 1 เปอร์ยูนิต

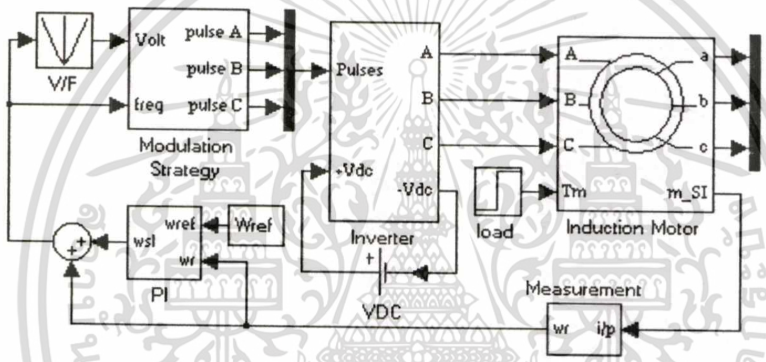
(ข) ค่าแรงบิดควบคุม (tc) = 1.5 เปอร์ยูนิต

ภาพที่ 4.21 รูปคลื่นกระแส, แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบโดย - การต่อภาระขนาด 5 นิวตัน-เมตร ตลอดเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ถ้าหากมีการต่อโหลดไว้ก่อน จะเห็นได้ว่าค่าเวลาการตอบสนองดังกล่าวจะใช้ช่วงเวลาที่ยาวนานมากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.21 (ก) จะใช้ช่วงเวลาประมาณ 1.4 วินาที ในการตอบสนองความเร็ว ที่เป็นเช่นนี้เพราะมอเตอร์จะต้องสร้างแรงบิดเพื่อใช้ในการขับโหลดและเมื่อมีการชนะค่าแรงบิดโหลดก็จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นซึ่งการเคลื่อนที่นี้จะเป็นลักษณะเชิงเส้นโดยมีความสัมพันธ์ระว่างค่าแรงบิดที่สร้างขึ้นกับค่าความเฉื่อยของมอเตอร์ ส่วนในภาพที่ 4.21 (ข) แสดงถึงระบบที่สามารถเร่งความเร็วในการตอบสนองขึ้นได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าลิมิตของแรงบิดที่สร้างไว้ให้มีค่าสูงขึ้น

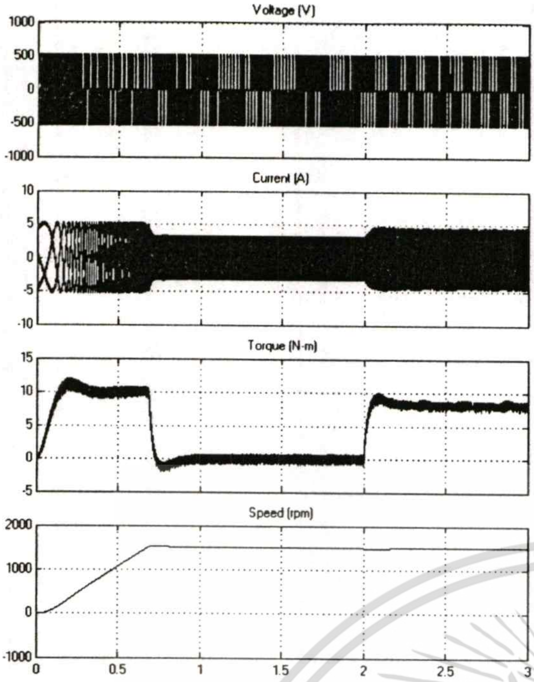
การเปรียบเทียบหลักการควบคุมแบบเฟสเซอร์กับหลักการควบคุมแบบสเกล่าร์ในงานวิจัยนี้จะเป็นการนำเสนอพฤติกรรมการตอบสนองต่อความเร็วคำสั่ง โดยการทดลองนี้จะอาศัยการทำงานของบล๊อกไดอะแกรมดังภาพที่ 4.22 ซึ่งค่าดัชนีการม็อดดูเลทที่ใช้จะเป็นค่าเชิงเส้น (อุดมคติ)



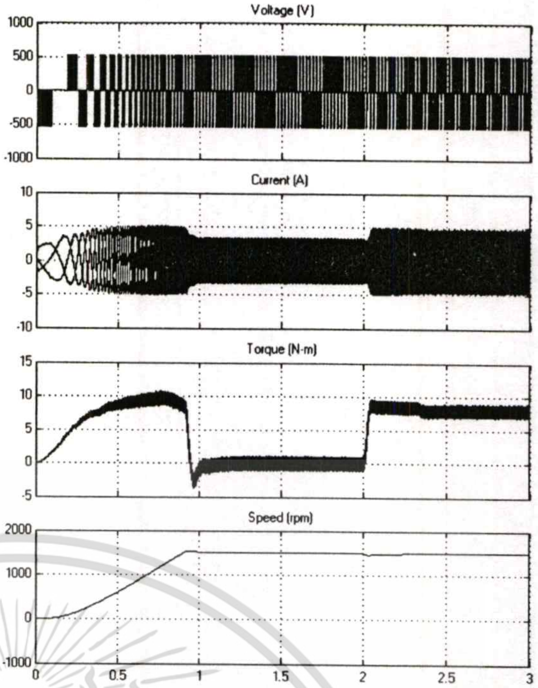
ภาพที่ 4.22 โมเดลการควบคุมแบบสเกล่าร์ที่ใช้ในการทดลองในโปรแกรม Matlab & Simulink

การเปรียบเทียบจะเริ่มจากการรับค่าคำสั่งเดียวกันและดูพฤติกรรมการตอบสนองต่อความเร็วคำสั่งจากภาพที่ 4.23 จะแสดงถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการควบคุมทั้งสองหลักการ โดยในภาพที่ 4.23 (ก) จะเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการควบคุมแบบเฟสเซอร์ ส่วนในภาพที่ 4.23 (ข) จะเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการควบคุมแบบสเกล่าร์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการควบคุมจะเห็นได้ว่า การควบคุมแบบสเกล่าร์จะให้ค่าแรงบิดเริ่มหมุนต่ำ ค่าของสโลปความเร็วที่ได้จะมีลักษณะโค้งงอเล็กน้อย ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากสาเหตุการเริ่มหมุนที่ความถี่ต่ำจำเป็นต้องมีค่าแรงดันบูตเริ่มต้นเพื่อต้องการรักษาค่าฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในแอร์แก๊ปให้มีค่าคงที่ที่พิกัดอันเป็นการควบคุมค่าแรงบิดให้มีค่าที่พิกัดเสมอ แต่ในขณะที่การควบคุมเฟสเซอร์นั้นค่าของฟลักซ์ที่แอร์แก๊ปจะมีค่าคงที่ตลอดเวลา ดังนั้นค่าของแรงบิดที่ได้จึงขึ้นอยู่กับค่าของกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์นั้นเองดังสมการ (2.23) ที่ได้กล่าวถึงแล้วในบทที่ 2 และจากภาพที่ 4.24 จะเป็นการแสดงส่วนขยายในภาพที่ 4.23 ในสภาวะที่มีการรองรับโหลดขนาด 8 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 2 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

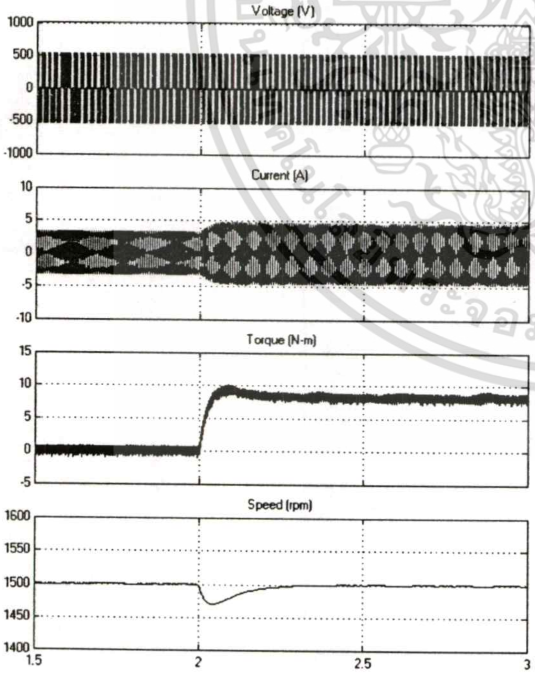


(ก) Phasor Control (0 to 1500)

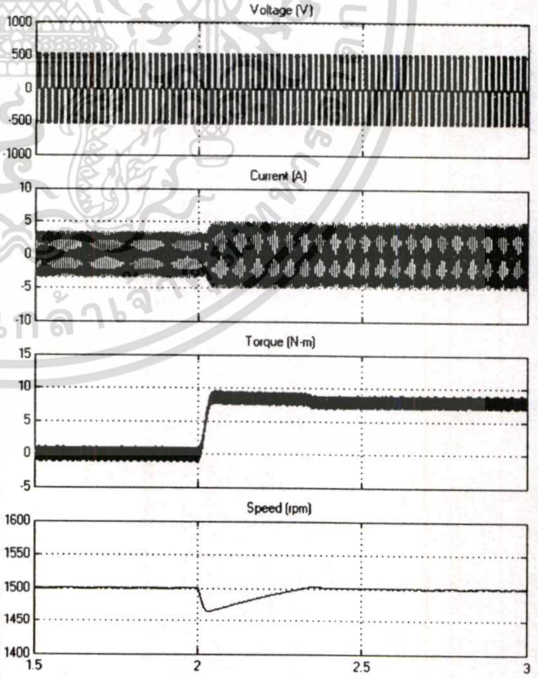


(ข) Scalar Control (0 to 1500)

ภาพที่ 4.23 รูปคลื่นแรงดันไลน์, กระแส, แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จาก - การทดสอบที่ค่าความเร็วคำสั่ง 0 ถึง 1500 รอบต่อนาที



(ก) Phasor Control (Zoom)

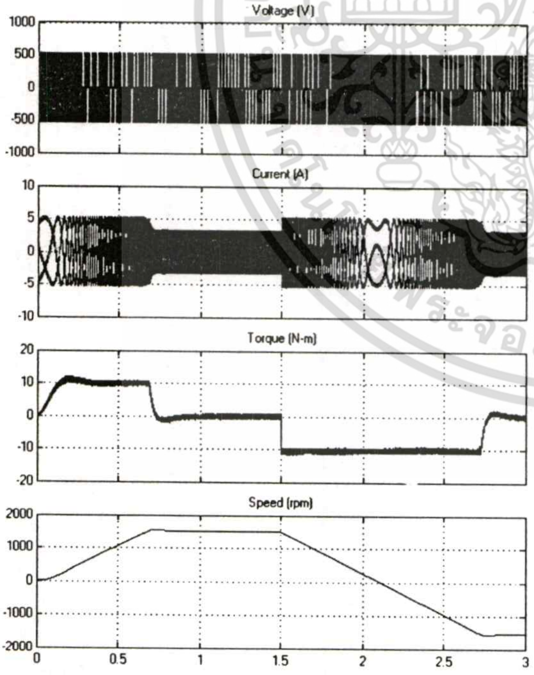


(ข) Scalar Control (Zoom)

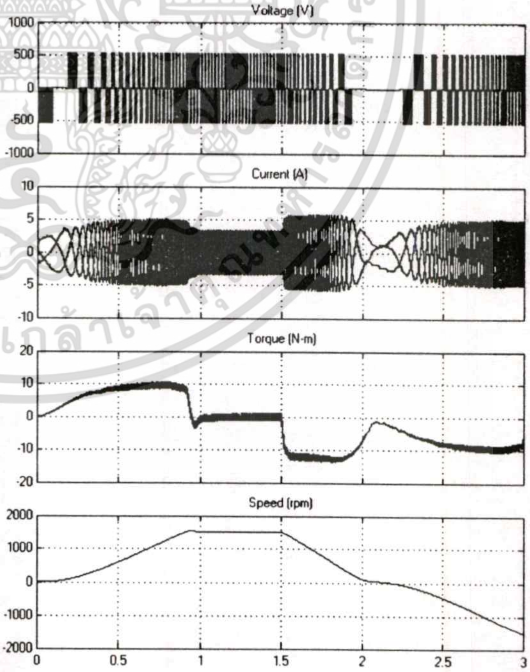
ภาพที่ 4.24 รูปคลื่นแรงดันไลน์, กระแส, แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการ - ทดสอบใส่ค่าภาระขนาด 8 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 2 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.24 จะเห็นได้ว่าค่าความชันของแรงบิดช่วงการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการควบคุมแบบเฟสเซอร์จะมีค่าความชันที่มากกว่าการควบคุมแบบสเกล่าร์อยู่เล็กน้อย ซึ่งจุดนี้เองสามารถบอกได้ถึงการทำงานของระบบว่าการควบคุมแบบเฟสเซอร์ซึ่งอาศัยหลักการควบคุมกระแสจะให้ผลการตอบสนองความเร็วรอบต่อเวลาได้ดีกว่าการควบคุมแบบสเกล่าร์นั่นเอง [25] ส่วนในภาพที่ 4.25 จะแสดงถึงการทดสอบการกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์ทั้ง 2 หลักการ ที่เวลา 1.5 วินาที ผลลัพธ์ที่ได้จากการควบคุมแบบเฟสเซอร์จะพบว่าค่าความเร็วรอบที่ได้จะมีค่าเป็นเชิงเส้นตลอดย่านการทำงานและไม่มีการกระเพื่อมของค่าแรงบิดหรือค่าความเร็วรอบเลย ส่วนการควบคุมแบบสเกล่าร์ค่าของความเร็วที่ได้จะมีค่าคงที่เป็นเชิงเส้นช่วงหนึ่ง จนกระทั่งมอเตอร์มีความเร็วลดลงจนเริ่มมีการกลับทางหมุน ซึ่งในจุดนี้ค่าของแรงบิดที่ได้จะมีค่าลดลงเนื่องจากแรงดันที่หายไป ส่งผลทำให้ความเร็วรอบมีการชลอตัวและเมื่อค่าของการม็อดดูเลทเริ่มมีค่าสูงขึ้นก็จะทำให้มีการเริ่มออกตัวใหม่อีกครั้งเพื่อเร่งความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มีค่าเท่ากับค่าความเร็วคำสั่ง ซึ่งพฤติกรรมในช่วงการกลับทางหมุนนี้เราจะสังเกตเห็นได้ว่า ค่าของแรงบิดช่วงที่มีการสั่งกลับทางหมุนจะไม่สามารถคงค่าแรงบิดที่พิกัดได้ตลอดเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการควบคุมการทำงานในลักษณะนี้สามารถแก้ไขได้โดยคำนึงถึงผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในการชดเชยค่าของแรงดันบูต ซึ่งจะทำให้ผลการเปลี่ยนแปลงดีขึ้นได้



(ก) Phasor Control (1500 to –1500 rpm)



(ข) Scalar Control (1500 to –1500 rpm)

ภาพที่ 4.25 รูปคลื่นแรงดันไลน์, กระแส, แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการ - ทดสอบกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์ ที่เวลา 1.5 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 สรุป

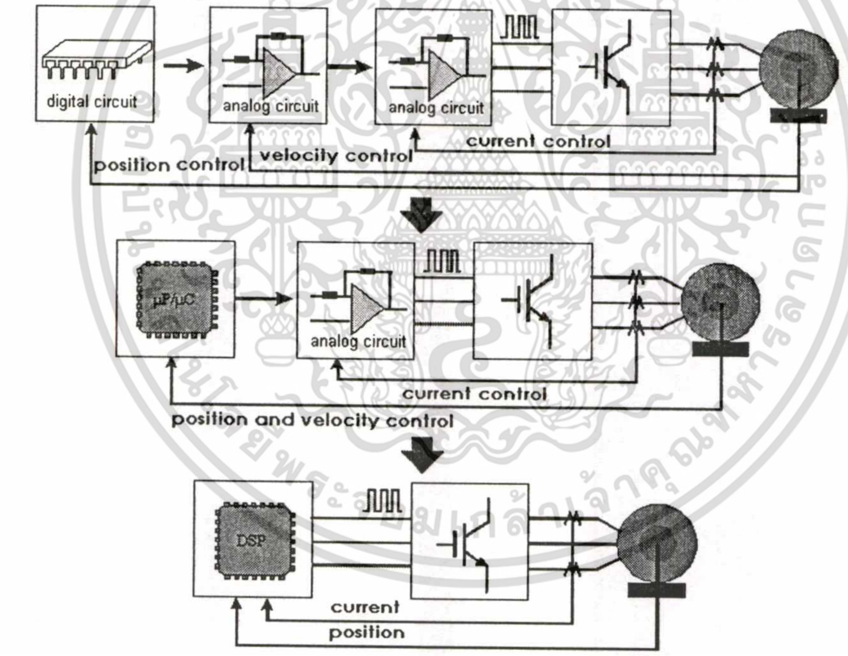
ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยใช้หลักการควบคุมแบบเฟสเซอร์ร่วมทั้งการจำลองหลักการดังกล่าวเพื่อดูพฤติกรรมการทำงานและการตอบสนองต่อเวลา อีกทั้งยังเป็นการตรวจสอบค่าอัลกอลึทึมที่ได้จากหลักการควบคุมดังกล่าวเทียบกับหลักการของทฤษฎีที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 2 ซึ่งจากการจำลองการทำงานจะพบว่าการควบคุมดังกล่าวสามารถทำงานได้จริงตามหลักการได้ให้ไว้และตรงตามวัตถุประสงค์ของการควบคุมการทำงานทุกประการ ส่วนในเรื่องการเปรียบสมรรถนะการตอบสนองความเร็วรอบต่อเวลาระหว่างการควบคุมแบบเฟสเซอร์และการควบคุมแบบสเกล่าร์ ในการจำลองได้มีการปรับค่าเกณฑ์ของกระบวนการควบคุมและค่าลิมิตที่ใช้งานให้มีค่าอยู่ในค่ามาตราฐานเดียวกัน จึงทำให้ผลที่ได้ออกมานั้นอยู่ในเกณฑ์การทำงานที่มีค่าใกล้เคียงกัน และถ้าหากพิจารณาถึงผลการตอบสนองความเร็วรอบต่อเวลาแล้ว การควบคุมแบบเฟสเซอร์ซึ่งอาศัยการควบคุมกระแส (Current Control) จะให้ผลการตอบสนองของแรงบิดที่ไวกว่าการควบคุมแบบสเกลล่าร์หรือการควบคุมแรงดันต่อความถี่นั่นเอง [25] ซึ่งหมายถึงค่าความเร็วรอบที่ได้จะมีค่าการตอบสนองความเร็วต่อเวลาที่ดีกว่านั้นเอง ในขั้นตอนของการทดสอบการทำงานจริง เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟที่ใช้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส หลังจากผ่านวงจรคอนเวอร์เตอร์แล้วจะได้แรงดันไฟตรงที่มีขนาดแรงดัน 310 โวลต์ เท่านั้น ดังนั้นในการทำงานจึงต้องทำการกลับขดลวดที่ต่อแบบสตาร์ไปเป็นการต่อแบบเดลต้า ซึ่งจะทำให้มอเตอร์ดังกล่าวมีขนาดพิกัดแรงดันใช้งานอยู่ที่ 220 โวลต์ และมีค่าพิกัดของกระแสใช้งานเท่ากับ 6.3 แอมแปร์ โดยยังคงให้ผลลัพธ์การทำงานได้เช่นเดียวกับการต่อขดลวดใช้งานแบบสตาร์นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การออกแบบและการสร้าง

5.1 บทนำ

เครื่องต้นแบบที่ได้วิจัยและพัฒนาขึ้นนี้เป็นเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งจากเดิมในโครงงานวิจัยสมัยก่อน การทำเครื่องต้นแบบส่วนใหญ่จะใช้อุปกรณ์จำพวกแอนะล็อกค่อนข้างสูงภายในวงจร ส่งผลทำให้วงจรที่ได้มีความน่าเชื่อถือต่ำ ดังนั้นในโครงงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอเครื่องต้นแบบที่โครงสร้างโดยส่วนใหญ่จะเป็นระบบดิจิตอลโดยการทำงานจะมีสภาวะเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น แต่ในบางภาคของการทำงานเช่นการตรวจจับกระแสหรือแรงดันจะต้องอาศัยการทำงานของวงจรแอนะล็อกเข้ามาช่วยในการยกระดับ (Offset) แรงดัน เนื่องจากภาคการทำงานของ A/D นั้นไม่สามารถทำงานในย่านที่แรงดันหรือกระแสเป็นลบได้

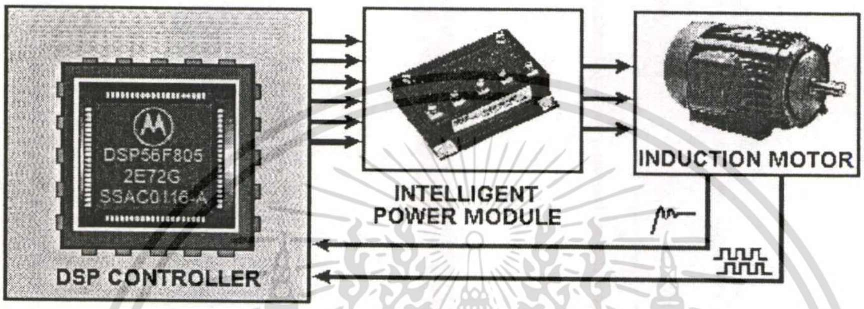


ภาพที่ 5.1 วิวัฒนาการจากการควบคุมแบบแอนะล็อกไปสู่การควบคุมแบบดิจิตอล

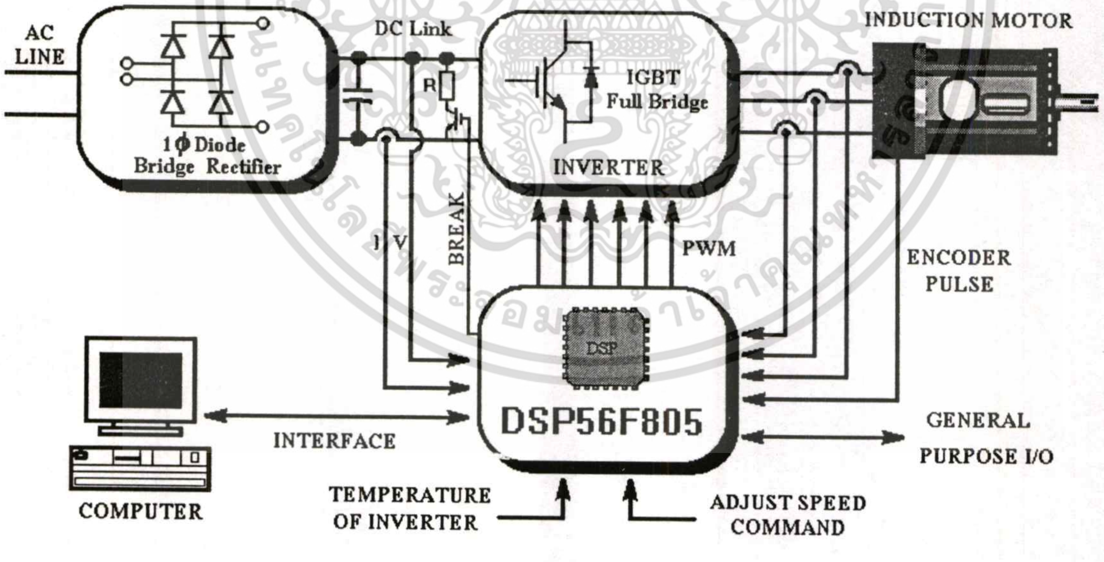
จากภาพที่ 5.1 แสดงวิวัฒนาการจากการควบคุมแบบแอนะล็อกไปสู่การควบคุมแบบดิจิตอล ซึ่งในสมัยก่อน เทคโนโลยีทางด้านตัวประมวลผลและควบคุมยังไม่ก้าวหน้านัก การทำงานส่วนใหญ่ของวงจรจะใช้วงจรแอนะล็อกในการควบคุมการทำงาน ซึ่งทำให้วงจรที่ใช้มีขนาดใหญ่ กินกำลังไฟฟ้าค่อนข้างสูงและมีความน่าเชื่อถือต่ำ แต่เมื่อมีการวิวัฒนาการสูงขึ้นก็เริ่มมีการใช้อุปกรณ์จำพวกไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ามาทำงานร่วมกับวงจรแอนะล็อกซึ่งการทำงานดังกล่าวค่อนข้างจะสะดวก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสามารถโปรแกรมการทำงานได้และสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของต้นทุนที่ใช้ในการซื้ออุปกรณ์ลงได้ ต่อมาความยุ่งยากที่เกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่างอุปกรณ์ทางด้านแอนะล็อกกับไมโครคอนโทรลเลอร์และขีดจำกัดของการประมวลผล ก็ได้นำไปสู่การพัฒนาเป็นชิฟที่มีการทำงานในลักษณะสมบูรณ์ภายในตัวเอง (Complete in Single Chip) ซึ่งชิฟดังกล่าวเป็นการร่วมเทคโนโลยีเฉพาะด้านภายในตัวเดียว ซึ่งการทำงานของชิฟนี้จะขึ้นอยู่กับการโปรแกรมการทำงานในส่วนต่างๆ ดังภาพที่ 5.2 แสดงถึงชิฟตระกูล DSP56F805 ของบริษัท โมโตโรลา ที่ใช้สำหรับการควบคุมการทำงานของวงจรกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์



ภาพที่ 5.2 บล๊อกการควบคุมโดยใช้ DSP ควบคุมการทำงานของวงจรกำลังเพื่อการขับเคลื่อน



ภาพที่ 5.3 บล๊อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของชุดอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในโครงงานวิจัย

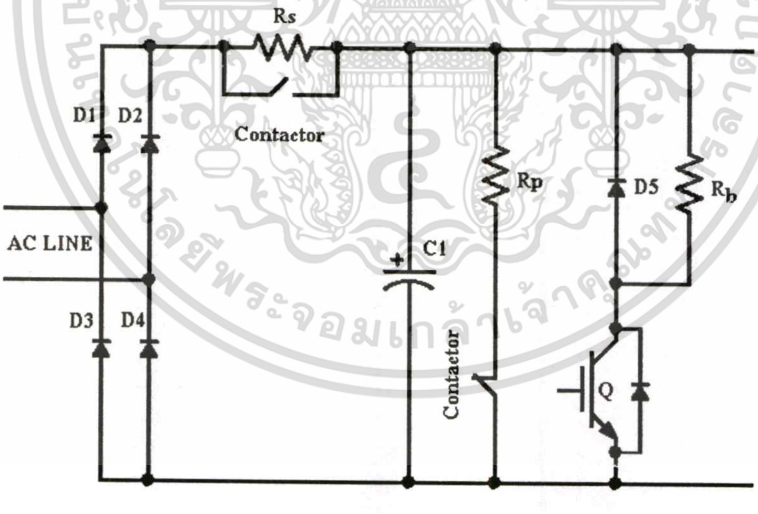
ในเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำแบบปรับความถี่ที่ออกแบบและสร้างขึ้นนี้ประกอบไปด้วยภาคจ่ายกำลังคือ ชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์ วงจรกรอง และชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะนำมาต่อร่วมเข้ากับวงจรควบคุมและระบบป้องกันวงจร โดยในภาพที่ 5.3 จะเป็นการแสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บล๊อกไดอะแกรมส่วนต่างๆ ของวงจร โดยที่ด้านวงจรด้านเข้าจะต่อกับระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ เพื่อแปลงเป็นไฟตรงแล้วผ่านไปยังตัวเก็บประจุเพื่อทำให้ไฟตรงที่ได้มีขนาดที่เรียบ (Voltage Source) จากนั้นนำไฟตรงที่ได้ส่งต่อไปยังวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงจากไฟตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ เพื่อป้อนในกับมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยกระบวนการทั้งหมดจะควบคุมโดยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DSP56F805) ซึ่งตัวประมวลผลดังกล่าวจะมีการทำงานที่เชื่อมต่อกับระบบคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ตรวจสอบสภาวะการทำงานของบอร์ดที่ใช้ในการควบคุม ซึ่งขั้นตอนการออกแบบจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

5.2 การออกแบบและสร้างชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับชุดอินเวอร์เตอร์เพื่อใช้ในการควบคุมมอเตอร์ ชุดคอนเวอร์เตอร์นี้จะถูกแสดงไว้ในบล๊อกแรกของภาพที่ 5.3 ซึ่งชุดดังกล่าวจะประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์และวงจรกรองที่ใช้ตัวเก็บประจุโดยรับแรงดันทางด้านอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสขนาดแรงดัน 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าแรงดันไฟตรงทางด้านเอาท์พุตประมาณ 310 โวลต์ ดังแสดงรายละเอียดวงจรไว้ในภาพที่ 5.4



ภาพที่ 5.4 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์และวงจรกรอง

จากภาพที่ 5.4 ความต้านทานที่ต่ออนุกรม (R_s) กับตัวเก็บประจุ จะมีหน้าที่จำกัดกระแสเมื่อเริ่มทำงาน เพราะในช่วงเวลานี้ แรงดันที่ตัวเก็บประจุยังมีค่าประมาณศูนย์โวลต์ทำให้กระแสที่ไหลอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งกระแสจำนวนนี้จะไหลผ่านไดโอดของวงจรเรียงกระแสซึ่งอาจจะทำให้ไดโอดเสียหายได้ และเมื่อแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้นถึงระดับที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสมแล้วตัวต้านทานนี้จะถูกลัดวงจรด้วยแมคเนติคคอนแทกเตอร์เพื่อไม่ให้เกิดกำลังสูญเสียที่ค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรม (R_s) กับตัวเก็บประจุขณะที่วงจรทำงานและวงจรเรียงกระแสจะได้ส่งผ่านกำลังเต็มที่ ส่วนค่าความต้านทานที่ต่อขนาน (R_p) กับตัวเก็บประจุมีหน้าที่ในการคายประจุทิ้งไปเมื่อวงจรหยุดทำงาน เพื่อป้องกันมิให้เกิดอันตรายเนื่องจากประจุที่ค้างอยู่ ทั้งนี้เพราะประจุที่ค้างอยู่มีปริมาณมากและมีแรงดันสูง โดยรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบวงจรเรียงกระแสและการออกแบบเพื่อเลือกขนาดของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ไดโอดกำลังขาเข้า ความต้านทานอนุกรมที่ใช้จำกัดกระแสขณะเริ่มเปิดเครื่อง และความต้านทานขนานที่ใช้ในการคายประจุเมื่อตอนปิดเครื่องจะได้กล่าวถึงต่อไปนี้

5.2.1 การออกแบบค่าและพิกัดของตัวเก็บประจุในวงจรกรอง

ในการออกแบบเบื้องต้นจะเป็นการเลือกค่าตัวเก็บประจุ โดยจากข้อกำหนดในการออกแบบวงจรเรียงกระแสนี้ ขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ทางด้านขาเข้ามีขนาดแรงดัน 220 โวลต์ 1 เฟส, ยอมให้มีช่วงการกระเพื่อมของแรงดันไฟตรงประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์, มอเตอร์มีประสิทธิภาพประมาณ 85 เปอร์เซ็นต์และมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 และประมาณค่าประสิทธิภาพของชุดอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากข้อกำหนดในการออกแบบดังกล่าวสามารถหาค่าตัวเก็บประจุได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Capacitor = \frac{I_{dc}\ x\ period}{ripple\,voltage} \tag{5.1}$$

เมื่อ I_{dc} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าใช้งานทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง (แอมแปร์)

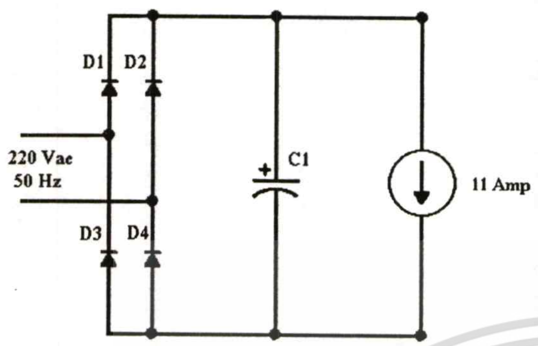
period คือ คาบเวลาของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดแต่ละตัว (10 มิลลิวินาที)

ripplie voltage คือ ค่าแรงดันกระเพื่อม (โวลต์)

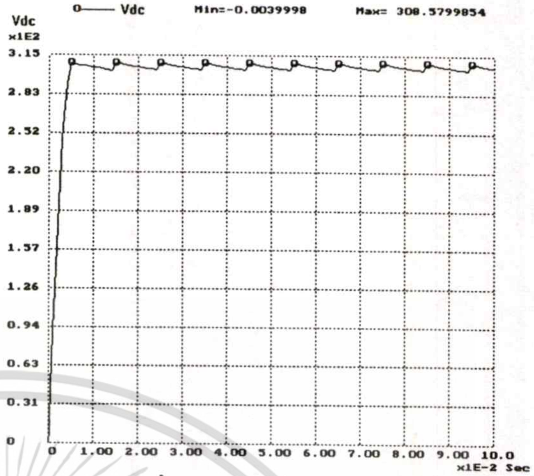
จากสมการ (5.1) เมื่อกระแสใช้งานมีค่าเท่ากับกำลังขาเข้ามอเตอร์ (ประมาณ 2.4 กิโลโวลต์แอมแปร์) และคิดค่าประสิทธิภาพของชุดอินเวอร์เตอร์ส่วนด้วยแรงดันไฟตรงซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 310 โวลต์ จะได้ค่ากระแสประมาณ 11 แอมแปร์ และเมื่อนำไปแทนค่าลงในสมการ (5.1) โดยยอมให้กระเพื่อมของแรงดันไฟตรงอยู่ในช่วง 2 เปอร์เซ็นต์ (ประมาณ 6.225 โวลต์) จะได้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 17,257 ไมโครฟารัด จากค่าตัวเก็บประจุที่คำนวณได้ในทางปฏิบัติได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 4700 ไมโครฟารัด ชนิดอิเล็กโตรไลติก (Electrolytic) ทนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ 450 โวลต์ จำนวน 4 ตัว ต่อขนานกันโดยใช้บาร์ทองแดงในการเชื่อมต่อจะทำให้ได้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 18,800 ไมโครฟารัด ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงและเมื่อได้ขนาดของตัวเก็บประจุแล้วในขั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไปจะนำค่าตัวเก็บประจุนี้ไปวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม LEK [26] เพื่อหาขนาดไดโอดและตัวต้านทานกระแสอัดประจุ ดังการต่อวงจรตามภาพที่ 5.5



(ก) วงจรการวิเคราะห์



(ข) รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ

ภาพที่ 5.5 วงจรเรียงกระแสที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์และรูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์

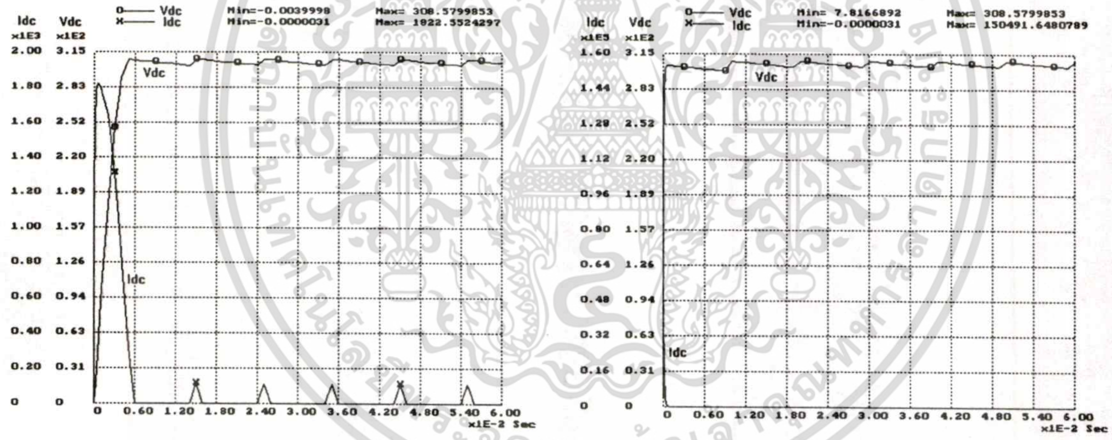
จากภาพที่ 5.5 จะเห็นได้ว่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าระหว่าง 303.39 โวลต์และ 308.52 โวลต์ โดยมีแรงดันไฟตรงเฉลี่ยประมาณ 306 โวลต์ คิดเป็น 98 เปอร์เซ็นต์ของส่วนแรงดันค่ายอด และแรงดันกระเพื่อมเท่ากับ 5.13 โวลต์ คิดเป็น 1.65 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟตรง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแรงดันไฟตรงเฉลี่ยและแรงดันกระเพื่อมมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบและอยู่ในพิกัดที่ออกแบบไว้

5.2.2 การเลือกพิกัดของไดโอดกำลังขาเข้า

จากข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบตัวเก็บประจุจะถูกนำมาใช้ในการหาค่าพิกัดของไดโอด ซึ่งในที่นี้กระแสใช้งานที่ดีซีบัสมีค่าประมาณ 11 แอมแปร์ หากมีการทรานเฟอร์กลับไปยังด้านไฟฟ้ากระแสสลับโดยคิดช่วงเวลาที่ไดโอดทำงานเท่ากับ 2.1 มิลลิวินาที และมีค่าแอมปิจูดสูงสุดเท่ากับ 65 แอมแปร์ จะทำให้ได้ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสประมาณ 14 แอมแปร์ โดยทั่วไปการกำหนดพิกัดของไดโอดจะเป็นการกำหนดพิกัดที่ 25 องศาเซลเซียส แต่การเลือกพิกัดใช้งานต้องคำนึงถึงอุณหภูมิขณะทำงาน ในการออกแบบได้มีการประเมินอุณหภูมิที่ตัวถังขณะทำงาน เมื่อมีแผ่นระบายความร้อนให้ตัวถังของไดโอดมีอุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส และประเมินอุณหภูมิห้องมีค่าไม่เกิน 45 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณา Thermal derating factor ของสารกึ่งตัวนำ พิกัดของกระแสไดโอดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะลดลงเหลือประมาณ 0.8 เท่าของพิกัด ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้ไดโอดที่มีพิกัดกระแสที่อุณหภูมิที่ตัวถังเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเท่ากับ 17.5 แอมแปร์ และเมื่อคำนึงถึงการเกิด Over load กับค่า safety factor อีกประมาณ 1.5 เท่า ดังนั้นจะต้องใช้ไดโอดที่มีพิกัดของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเท่ากับ 26.25 แอมแปร์ ส่วนพิกัดแรงดันของไดโอดจะเลือกให้ทนต่อทั้งแรงดันภาวะชั่วครู่และสภาวะอยู่ตัวประมาณ 1.25 เท่า จึงเลือกใช้ไดโอดที่มีพิกัดแรงดัน 400 โวลต์ โดยในทางปฏิบัติเลือกใช้ไดโอดเบอร์ CM2504 ซึ่งมีพิกัดกระแส 25 แอมแปร์ ทนแรงดันได้ 400 โวลต์ เมื่อได้ขนาดตัวตัวเก็บประจุและไดโอดแล้ว ในขั้นตอนต่อไปจะทำการหาค่าตัวต้านทานกระแสอัดประจุ (R_S) โดยอาศัยการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์โดยให้ไฟกระแสสลับด้านเข้าเป็นไซน์และโคไซน์เพื่อทำการหาค่าความต้านทานดังกล่าว และจากภาพที่ 5.6 แสดงรูปคลื่นของกระแสในตอนเริ่มเปิดเครื่องที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้กระแสสลับด้านเข้าเป็นไซน์และโคไซน์ จะเห็นได้ว่าค่ายอดกระแสในตอนเริ่มเปิดเครื่อง เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้ามีรูปคลื่นเป็นไซน์จะทำให้เกิดค่ายอดของกระแสประมาณ 1,822 แอมแปร์ และในกรณีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้ามีรูปคลื่นเป็นโคไซน์ ค่ายอดของกระแสในตอนเริ่มเปิดเครื่องมีค่าเท่ากับ 150,491 แอมแปร์ ซึ่งมีค่าสูงกว่าพิกัดของไดโอดที่ใช้งานอยู่มาก ดังนั้นเพื่อที่จะจำกัดค่ายอดจะต้องใช้ค่าความต้านทาน R_S ต่ออนุกรมก่อนเข้าตัวเก็บประจุ เพื่อจำกัดค่ายอดกระแสในช่วงแรกในตอนเริ่มเปิดเครื่องไม่ให้เกิดพิกัดของกระแสไดโอดที่เลือกใช้



(ก) แรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นไซน์ (ข) แรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นโคไซน์

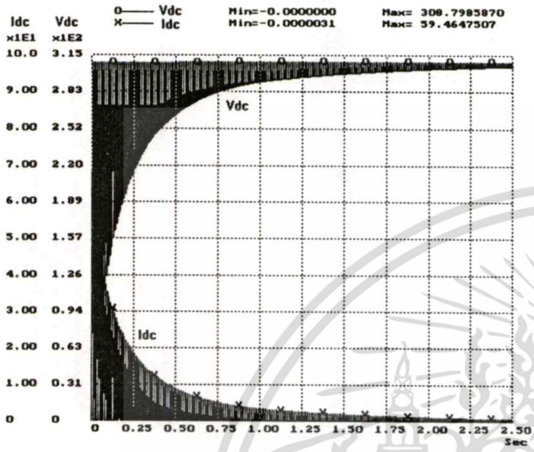
ภาพที่ 5.6 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านไดโอดในตอนเริ่มเปิดเครื่องเมื่อแรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นไซน์และโคไซน์

5.2.3 การเลือกความต้านทานอนุกรมที่ใช้จำกัดกระแสอัดประจุขณะเริ่มเปิดเครื่อง

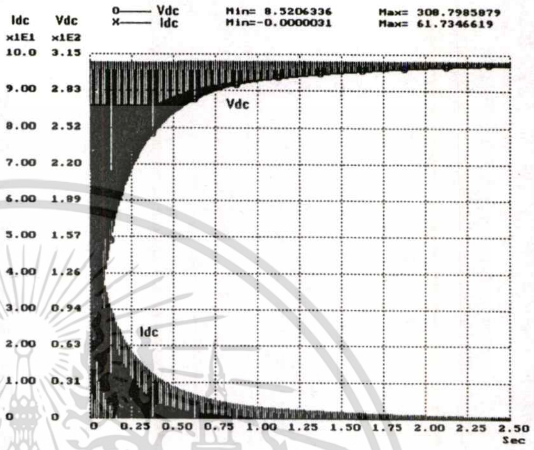
ในการเลือกพิกัดของตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมเพื่อจำกัดกระแสในตอนเริ่มเปิดเครื่องเมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้าเป็นไซน์ จะใช้วิธีการประมาณค่าเบื้องต้นและวิเคราะห์วงจรโดยใช้คอมพิวเตอร์แล้วปรับค่าจนกระทั่งกระแสในตอนเริ่มเปิดอยู่ในเกณฑ์ที่ไดโอดสามารถทำงานได้โดยไม่เกิดความเสียหาย ซึ่งจากวงจรจะอาศัยการกดสวิตซ์ให้แมกเนติกคอนแท็กเตอร์ทำงานหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจ่ายไฟเข้าระบบแล้วประมาณ 2 วินาที จากการจำลองปรากฏว่าต้องใช้ค่าความต้านทานประมาณ 5 โอห์ม ซึ่งจะทำให้ได้ค่ายอดของกระแสประมาณ 61 แอมแปร์ ดังแสดงในภาพที่ 5.7 สำหรับพิกัดกำลังของความต้านทานนั้น เนื่องจากไม่สามารถต้านพิกัดกำลังในสภาวะชั่วครู่ของความต้านทานได้ ดังนั้นจึงได้ทดลองใช้ความต้านทานที่มีพิกัดกำลังในภาวะอยู่ตัว 100 วัตต์ โดยใช้ตัวต้านทานขนาด 50 โอห์ม ขนาด 10 วัตต์ต่อขนานกัน ซึ่งสามารถรับกำลังในสภาวะชั่วครู่ได้



(ก) แรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นไซน์



(ข) แรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นโคไซน์

ภาพที่ 5.7 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านไดโอดในตอนเริ่มเปิดเครื่องเมื่อมีความต้านทานจำกัดกระแสและแรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นไซน์และโคไซน์

5.2.4 ความต้านทานขนานที่ใช้ในการคายประจุเมื่อตอนปิดเครื่อง

การคำนวณหาค่าความต้านทานที่ใช้ในการคายประจุตามมาตรฐานของ วสท. 408 กำหนดให้ตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันไม่เกิน 600 โวลต์ จะต้องมีความต้านทานต่ออยู่เพื่อช่วยให้ตัวเก็บประจุคายประจุให้แรงดันเหลือ 50 โวลต์ ภายในเวลา 1 นาที ค่าความต้านทานในการคายประจุสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$e_c = 1.1 V_{DC}\, e^{-\frac{60}{RC}} \qquad (5.2)$$

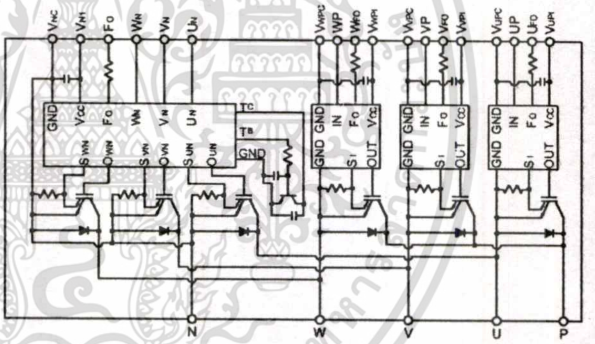
เมื่อ V_{DC} = 310 โวลต์ e_c = 50 โวลต์ C = 18,800 ไมโครฟารัด จากข้อกำหนดข้างต้นจะได้ค่าความต้านทานที่ใช้ในการคายประจุประมาณเท่ากับ 1.662 กิโลโอห์ม และกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวต้านทานในการคายประจุประมาณ 14 วัตต์ ในทางปฏิบัติเลือกใช้ค่าความต้านทานในการคายประจุขนาด 2 กิโลโอห์ม 10 วัตต์ จำนวน 1 ตัว โดยต่อผ่านหน้าสัมผัสของแมกเนติกคอนแท็กเตอร์ดังที่แสดงวงจรไว้ในภาพที่ 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การออกแบบและสร้างชุดวงจรอินเวอร์เตอร์

ภาคนี้แสดงไว้ในบล๊อกถัดจากบล๊อกการทำงานของชุดคอนเวอร์เตอร์ในภาพที่ 5.3 การทำงานในภาคนี้จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ได้รับจากภาควงจรคอนเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายให้แก่มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการขับเคลื่อน ในการทำงานจะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแล้วมาทำการแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ เพื่อป้อนในกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในส่วนของชุดอินเวอร์เตอร์นี้จะเลือกใช้ทรานซิสเตอร์กำลังแบบ IGBT ที่เป็นแบบโมดูลสวิตซ์ของบริษัทมิตซูมิชิ ซึ่งจากข้อมูล (data sheet) เราสามารถเลือกใช้โมดูลสวิตซ์รุ่น PM20CSJ060 สำหรับการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าได้ แต่จากข้อมูลดังกล่าวจะพบว่าเหมาะสมกับงานในเชิงพาณิชย์เป็นส่วนใหญ่ จึงทำให้โครงงานวิจัยนี้ได้มีการเผื่อค่าเซฟตี้แฟคเตอร์ไว้ 1 สเตป ดังนั้นจึงได้เลือกใช้โมดูลสวิตซ์รุ่น PM30CSJ060 ซึ่งมีคุณสมบัติที่เด่นคือ มีพิกัดทนแรงดันได้ถึง 600 โวลต์ รองรับการจ่ายกระแสได้ถึง 30 แอมแปร์ และสามารถส่งสัญญาณฟอล์ตจากตัวโมดูลได้เพื่อใช้ในการหยุดสัญญาณขับนำในกรณีที่เกิดการลัดวงจรภายในกิ่ง, กระแสเกินหรืออุณหภูมิภายในตัวเองมีค่าสูง และสามารถรองรับความถี่สวิตชิ่งสูงสุดได้ถึง 20 กิโลเฮิรตซ์ [27] ดังแสดงโครงสร้างในภาพที่ 5.8

(ก) โครงสร้างภายนอกของทรานซิสเตอร์



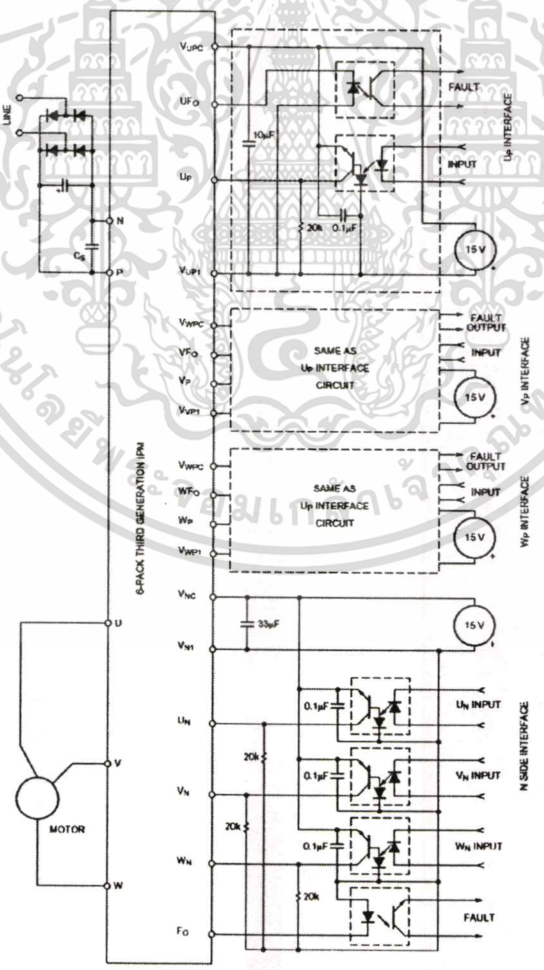
(ข) โครงสร้างภายในของทรานซิสเตอร์

ภาพที่ 5.8 ทรานซิสเตอร์โมดูลกำลังแบบ IGBT รุ่น PM30CSJ060

การควบคุมการทำงานของสวิตซ์กำลังแบบโมดูลนี้จำเป็นต้องมีวงจรแยกโดดสัญญาณ (Isolate) ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานซึ่งวงจรแยกโดดที่ใช้ในการทำงานนี้จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ออปโต้ (OPTO) เบอร์ TLP 550 จำนวน 6 ตัวทำหน้าที่แยกโดดสัญญาณทางไฟฟ้า โดยออปโต้ที่ใช้ในการควบคุมสวิตซ์ 3 กิ่งบนจะมีการแยกรับไฟตรงขนาด 15 โวลต์ จากหม้อแปลงคนละลูกกัน ส่วนออปโต้ที่ใช้ในการควบคุมสวิตซ์ 3 กิ่งล่างจะรับไฟตรงขนาด 15 โวลต์ จากหม้อแปลงเดียวกัน การควบคุมการทำงานของโมดูลสวิตซ์นี้สามารถทำได้โดยการควบคุมจากออปโต้ซึ่งในสภาวะปกติ (สวิตซ์ไม่มีการทำงาน) ทางด้านโมดูลสวิตซ์จะมีไฟตรงขนาด 15 โวลต์ไปยังขา Up, Vp, Wp, Un1,Vn1 และ Wn1 หากต้องการให้สวิตซ์ตัวใดตัวหนึ่งภายในโมดูลสวิตซ์ทำงาน สามารถทำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทำให้ศักย์ของแรงดันที่ขานั้นมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือควบคุมจากทางด้านไดโอดที่ใช้ในการเปล่งแสงภายในตัวออปโต้เอง โดยทำให้มีกระแสไฟไหลผ่านไดโอดเปล่งแสงขนาด 16 มิลลิแอมแปร์ หรือที่พิกัดกระแสของออปโต้ เพื่อทำให้วงจรอีกฝั่งของออปโต้ทำหน้าที่เหมือนสวิตซ์ในการควบคุมระดับสถานะไฟให้กับขาสัญญาณของชุดโมดูลสวิตซ์ ส่วนวงจรที่ใช้ส่งสัญญาณฟอล์ตที่ออกจากตัวโมดูลเพื่อใช้ในการหยุดสัญญาณขับนำ ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรภายในกิ่ง, กระแสเกิน หรืออุณหภูมิภายในตัวเองมีค่าสูงจะใช้อุปกรณ์ออปโต้ (OPTO) เบอร์ PIC810 จำนวน 4 ตัว โดยสัญญาณที่มาจากออปโต้ 3 ตัวแรกนี้จะมาจากการตรวจจับบริเวณสวิตซ์ 3 กิ่งบน ส่วนสัญญาณอีกตัวจะได้จากการตรวจจับจากบริเวณสวิตซ์ 3 กิ่งล่าง การทำงานของวงจรส่งสัญญาณฟอล์ตนี้ จะมีการทำงานโดยส่งสัญญาณที่มีคาบความกว้างสัญญาณขนาด 10 ไมโครวินาที ออกมาทางขาสัญญาณฟอล์ต ซึ่งการใช้งานสัญญาณฟอล์ตนี้จะต้องอาศัยวงจรภายนอกในการช่วยค้างสภาวะการเกิด เพื่อหยุดสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ต่อไป โดยวงจรภายนอกนี้จะกล่าวถึงในหัวข้อวงจรขับนำต่อไป

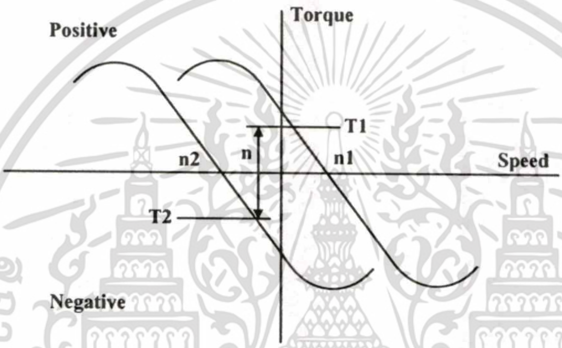


ภาพที่ 5.9 วงจรแยกโดดและชุดขับนำทรานซิสเตอร์โมดูลกำลังแบบ IGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การออกแบบและสร้างวงจร Dynamic Breaking

ในการใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ หากความเร็วรอบที่ได้จากการควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงจากคำสั่งความเร็วรอบสูงสู่ความเร็วรอบต่ำอย่างทันทีทันใด จะทำให้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กหมุน (Synchronous Speed) มีค่าน้อยกว่าความเร็วที่โรเตอร์ (Rotor Rotating Speed) ค่าสลิปของมอเตอร์จะมีค่าเป็นลบ กล่าวคือเมื่อความถี่ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับความถี่ f1 แล้วมีการเปลี่ยนความเร็วมาเป็นความถี่ f2 จะทำให้ความเร็วของฟลักซ์แม่เหล็กหมุนลดลงจาก n1 มายัง n2 ตามลำดับ และมีค่าต่ำกว่าความเร็วของตัวหมุน (n) นั่นคือ สลิปจะมีค่าติดลบและแรงบิดของมอเตอร์ (T2) กลายเป็นแรงบิดของแรงเบรก (braking torque) ดังที่ได้แสดงคุณสมบัติแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำไว้ในภาพที่ 5.10



ภาพที่ 5.10 คุณสมบัติแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในขณะนี้มอเตอร์ทำหน้าที่เสมือนเครื่องกำเนิดพลังงานด้วยการส่งพลังงานกลจากมอเตอร์และโหลดมาเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านทางไดโอดที่คร่อมสวิตซ์กำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์ กลับเข้ามาชาร์ตยังตัวเก็บประจุ (Capacitor) พลังงานที่ถูกส่งกลับมานี้ไม่สามารถผ่านวงจรเรียงกระแสไปสู่แหล่งจ่ายไฟสลับได้ จึงสะสมเป็นแรงดันคร่อมตัวเก็บปะจุ ส่งผลทำให้แรงดันที่ดีซีบัสมีค่าสูงขึ้น ถ้าค่าแรงดันสูงเกินค่าที่กำหนดจะทำให้ทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่สลายแรงดันในส่วนเกินทำงาน ทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวต้านทานเบรก (R_b) ดังแสดงในภาพที่ 5.4 ที่ตัวต้านทานจะเกิดความร้อนขึ้นเนื่องมาจากการผลาญพลังงานที่เกิดจาก Dynamic Braking ดังนั้นพลังงานที่เก็บสะสมในตัวเก็บประจุก็จะถูกคายออกมาทำให้แรงดันที่ดีซีบัสมีค่าต่ำลงและเมื่อมีการลดต่ำลงกว่าค่าที่กำหนดทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่สลายแรงดันในส่วนเกินจะหยุดทำงาน กระแสเบรกก็จะหยุดไหลซึ่งค่าของตัวต้านทานสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$R_b = \frac{{V_{dc}}^2}{\left[\frac{2\pi\, n_1}{60}\right].T_B} \tag{5.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ R_b คือ ค่าความต้านทานที่ใช้ในการเบรก

V_{dc} คือ ค่าแรงดันไฟตรงที่เริ่มทำการเบรก

n_1 คือ ค่าความเร็วรอบก่อนที่มีการลดความเร็ว (รอบต่อนาที)

T_B คือ ค่าแรงบิดต้าน (ปกติมีค่าไม่เกินค่าพิกัดแรงบิดของมอเตอร์)

และเมื่อทำการแทนค่าลงในสมการ(5.3) โดยให้ค่าความเร็วรอบก่อนที่มีการลดความเร็วเท่ากับ 1500 รอบต่อนาที และ ค่าแรงดันไฟตรงที่เริ่มทำการเบรกเท่ากับ 310 โวลต์ และ ค่าแรงบิดต้านเท่ากับค่าพิกัดแรงบิดของมอเตอร์ (9.6 นิวตัน-เมตร) จะได้ค่าความต้านทานเท่ากับ 64 โอห์ม ส่วนขนาดพิกัดกำลังของตัวต้านทานดังกล่าวสามารถหาได้จากสมการ(5.4) และเมื่อแทนค่าลงในสมการดังกล่าวโดยคิดค่าส่วนต่างความเร็วรอบที่มากที่สุดเท่ากับ 2900 รอบต่อนาที จะได้ขนาดพิกัดกำลังของตัวต้านทานเท่ากับ 874.61 วัตต์ ในทางปฏิบัติเลือกใช้ค่าความต้านทานเท่ากับ 100 โอห์ม ขนาด 600 วัตต์ และเลือกใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2SK2746 ที่สามารถทนแรงดันได้ 800 โวลต์ รองรับกระแสต่อเนื่องได้ถึง 7 แอมแปร์ ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ในเบรก ส่วนวงจรที่ใช้ในส่วนการควบคุมจะได้กล่าวถึงในหัวข้อระบบการป้องกันต่อไป

$$P_{Rb} = \frac{\left[\dfrac{2\pi\left(n_1 - n_2\right)}{60}\right].\left(T_B - 0.1\,T_{rate}\right).time_B}{2.time_d} \tag{5.4}$$

เมื่อ P_{Rb} คือ ขนาดพิกัดกำลังของตัวต้านทานเบรก

$n_1 - n_2$ คือ ส่วนต่างความเร็วรอบที่มีการลดความเร็ว (รอบต่อนาที)

T_{rate} คือ ค่าแรงบิดพิกัดของมอเตอร์

$time_B$ คือ ช่วงระยะเวลาในการเบรก (ประมาณ 1 วินาที)

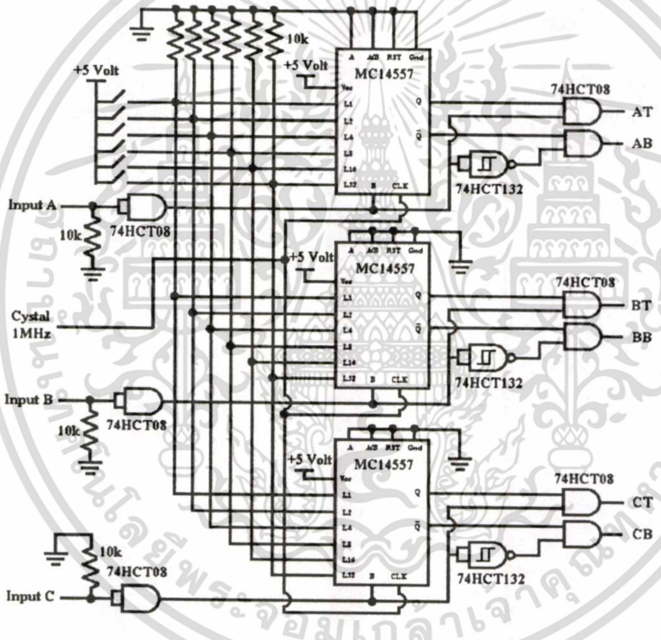
$time_d$ คือ คาบเวลาที่สามารถเปลี่ยนความเร็วซ้ำกันได้ (1.5 วินาที)

5.5 การออกแบบและสร้างวงจรขับนำและวงจรประวิงเวลา

การควบคุมพัลส์สัญญาณในโครงงานวิจัยนี้จะใช้อุปกรณ์ดิจิตอลซิกแนลโปรเซสเซอร์ (DSP56F805) ในการประมวลผลและสั่งการ ซึ่งสัญญาณขับนำที่ได้จาก DSP จะถูกใช้ในการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ สัญญาณที่ออกจาก DSP ก่อนที่จะนำไปใช้งานจะต้องมีการผ่านวงจรเกท เนื่องจากสัญญาณที่ออกจาก DSP ที่ระดับสัญญาณสูง (High) จะมีค่าอยู่ที่ 2.4 – 3.3 โวลต์ และระดับต่ำ (Low) จะมีค่าอยู่ที่ 0.1 – 0.4 โวลต์ หากนำไปใช้ในการควบคุมเกทตระกูล CMOS จะทำให้ประสบปัญหาในเรื่องของระดับสัญญาณได้ ดังนั้นจำเป็นจะต้องทำให้สัญญาณดังกล่าวมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับสัญญาณที่มีความชัดเจนมากขึ้นโดยนำมาผ่านวงจรเกท ซึ่งเกทที่ใช้จะต้องใช้ตระกูล HCT เท่านั้น เนื่องจากสามารถรับสัญญาณในระดับ TTL แต่ให้สัญญาณทางด้านเอาท์พุตแบบ CMOS (ระดับต่ำ: 0 – 0.1 V และระดับสูง: 4.9 – 5 V) จึงทำให้ระดับสัญญาณที่ใช้ในการขับนำมีสถานะที่แน่นอนมากขึ้น จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ไปผ่านชุดสร้างประวิงเวลา (Dead time) ซึ่งปกติในตัว DSP นี้สามารถสร้างช่วงประวิงเวลาได้ภายในตัวเอง แต่จากงานวิจัยนี้ความถี่ของการสวิตซ์ไม่คงที่ประกอบกับพัลส์สัญญาณขับนำที่ใช้ในการขับนำสวิตซ์ได้มาจากการเปรียบเทียบระหว่างกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์จริงกับกระแสไซน์อ้างอิงจึงทำให้การควบคุมการทำงานของพัลส์พีดับบิวเอ็มที่ได้นั้นจะต้องผ่านกระบวนการทางซอฟต์แวร์โดยการระบุสถานะการทำงานของบิตที่ใช้ในการสร้างพัลส์พีดับบิวเอ็ม จึงทำให้งานวิจัยนี้ต้องเลือกใช้วงจรภายนอกเข้ามาช่วยในการทำงานดังแสดงวงจรประวิงเวลาไว้ในภาพที่ 5.11

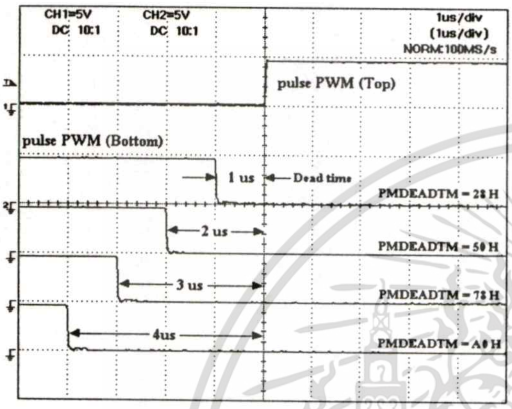


ภาพที่ 5.11 วงจรสร้างช่วงการประวิงเวลา (Dead time)

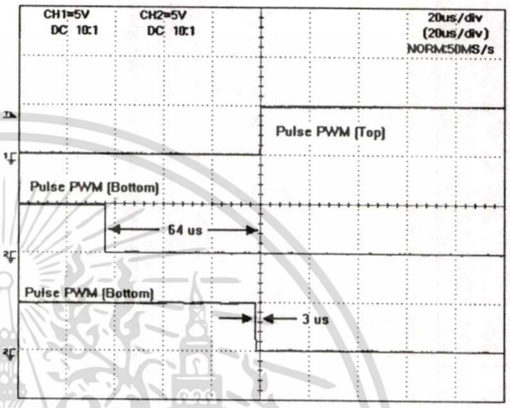
จากภาพที่ 5.11 การทำงานของวงจรประวิงเวลาสามารถอธิบายได้ดังนี้ สัญญาณที่ได้จากการปรับระดับของแรงดันจะถูกนำไปเข้าไอซีเบอร์ MC14557 ซึ่งมีคุณสมบัติในการเลื่อนบิต โดยจะทำงานจะอาศัยจังหวะจากสัญญาณนาฬิกาภายนอกขนาด 1 เมกะเฮิรตซ์ โดยที่ช่วงเวลาความกว้างของเวลาเดดไทม์นี้สามารถกำหนดได้จากสภาวะสูงหรือต่ำที่ให้กับขาสัญญาณ L1 ถึง L32 ของไอซีเบอร์ MC14557 และจากงานวิจัยนี้เลือกใช้สวิตซ์โมดูลกำลัง (PM30CSJ060) ซึ่งค่าประวิงเวลาหรือค่าเดดไทม์ต่ำสุดที่ต้องการเท่ากับ 3 ไมโครวินาที จึงเซตขาสัญญาณ L1 และ L2 ให้มีสถานะต่ำ จากนั้นนำเอาสัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากไอซีเบอร์ MC14557 มาทำการซิงโครไนซ์กับสัญญาณจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(สัญญาณก่อนเข้าไอซีเบอร์ MC14557) เพื่อให้ได้เอาท์พุตที่มีสัญญาณขับนำกิ่งชุดบนและชุดล่างมีเดดไทม์เท่ากับ 3 ไมโครวินาที ดังที่เซตสภาวะให้กับไอซีเบอร์ดังกล่าว และค่าประวิงเวลานี้สามารถปรับเปลี่ยนได้ถึง 64 ไมโครวินาทีขึ้นอยู่กับการเซตค่าในไอซีเบอร์ MC14557 ซึ่งค่าเวลานี้หากมีการตั้งค่าของช่วงเวลาการสร้างน้อยเกินไปจะทำให้เกินปัญหาการลัดวงจรในกิ่งได้ แต่ถ้าค่าช่วงเวลาการสร้างเดดไทม์มากเกินไปจะทำให้รูปคลื่นของแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์เกิดความผิดปกติขึ้นได้ [3]



(ก)



(ข)

ภาพที่ 5.12 ตัวอย่างสัญญาณพัลส์ขับนำที่ได้จากการประวิงเวลา

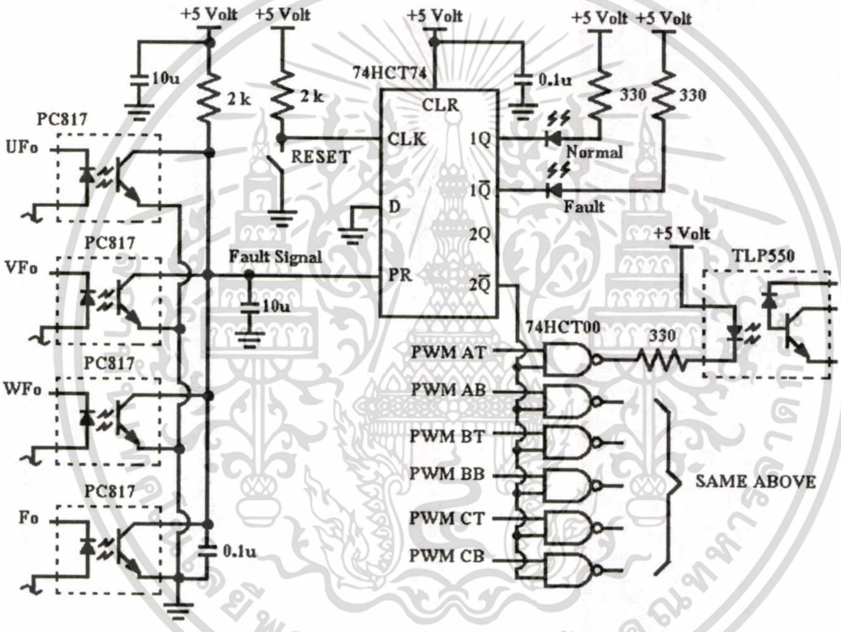
(ก) สัญญาณที่ได้จากการสร้างภายในตัว DSP โดยกำหนดที่รีจิตเตอร์ PMDEADTM

(ข) สัญญาณที่ได้จากการสร้างภายโดยใช้วงจรภายนอก

จากขั้นตอนการสร้างวงจรประวิงเวลา สัญญาณที่ได้จะถูกควบคุมให้มีการทำงานที่มีความสัมพันธ์กับวงจรชุดโมดูลกำลังซึ่งตัวอุปกรณ์ดังกล่าวจะมีความสามารถในการส่งสัญญาณพัลส์ฟอล์ตขนาด 10 ไมโครวินาที ออกมาที่ขาฟอล์ตได้ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรภายในกิ่ง, กระแสเกินหรือมีอุณหภูมิสูง โดยสัญญาณดังกล่าวนี้จะนำไปเข้าออปโต้เบอร์ PC817 เพื่อทำการไอโซเลตกราวด์ของสัญญาณควบคุม ปกติทางด้านเอาท์พุตของออปโต้เบอร์ PC817 จะเปิดวงจร จึงทำให้ขา PRESET ของไอซี 74HCT74 มีสถานะสูง ซึ่งในสภาวะนี้ขาสัญญาณ $1Q$ จะมีสถานะต่ำ ทำให้ LED ที่แสดงสภาวะปกติ (Normal) สว่าง และขาสัญญาณ $2\overline{Q}$ จะมีสถานะสูง ซึ่งขานี้จะต่ออยู่กับเกท 74HCT00 เพื่อใช้ในการควบคุมสัญญาณที่ใช้ในการขับนำชุดอินเวอร์เตอร์ โดยจะสังเกตได้ว่าหากสถานะของขา $2\overline{Q}$ ของเกท 74HCT00 มีสถานะสูง สัญญาณทริกซ์หรือสัญญาณขับนำอินเวอร์เตอร์ที่ต่ออยู่กับอีกขาหนึ่งของเกท 74HCT00 จะสามารถควบคุมการทำงานของออปโต้เบอร์ TLP550 ได้ แต่ถ้าสถานะของขา $2\overline{Q}$ ของเกท 74HCT00 มีสถานะต่ำ จะทำให้สัญญาณทริกซ์หรือสัญญาณขับนำอินเวอร์เตอร์ที่ต่ออยู่กับอีกขาหนึ่งของเกท 74HCT00 ไม่สามารถควบคุมการทำงานของออปโต้เบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TLP550 ได้ ซึ่งขั้นตอนการทำงานในสภาวะที่มีการลัดวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้ หากมีการลัดวงจรในกิ่งของชุดโมดูลกำลังหรือมีการนำกระแสสูงเกินพิกัดของตัว IPM หรือชุดโมดูลกำลังจะมีการส่งสัญญาณฟอล์ตออกมาทางขาสัญญาณฟอล์ตของตัวโมดูล ทำให้ขา PRESET ของไอซี 74HCT74 มีสถานะต่ำ ส่งผลทำให้ขาสัญญาณ $1Q$ จะมีสถานะสูง ทำให้ LED ที่แสดงสภาวะปกติ (Normal) ดับลง ในขณะที่ขาสัญญาณ $1\overline{Q}$ จะมีสถานะต่ำ ทำให้ LED ที่แสดงสภาวะลัดวงจร (Fault) สว่างขึ้น และช่วงเวลาเดียวกันนี้ขาสัญญาณ $2\overline{Q}$ จะมีสถานะต่ำ จึงทำให้สัญญาณที่ไปขับชุดอินเวอร์เตอร์หยุดทำงานเนื่องจากคุณสมบัติของแนนเกท (NAND Gate) และหากต้องการเริ่มวงจรใหม่สามารถทำได้โดยการ กด RESET เพื่อเป็นการสร้างสัญญาณกระตุ้นเข้าไปเพื่อเปลี่ยนสภาวะการทำงานให้กลับเป็นสภาวะปกติต่อไป



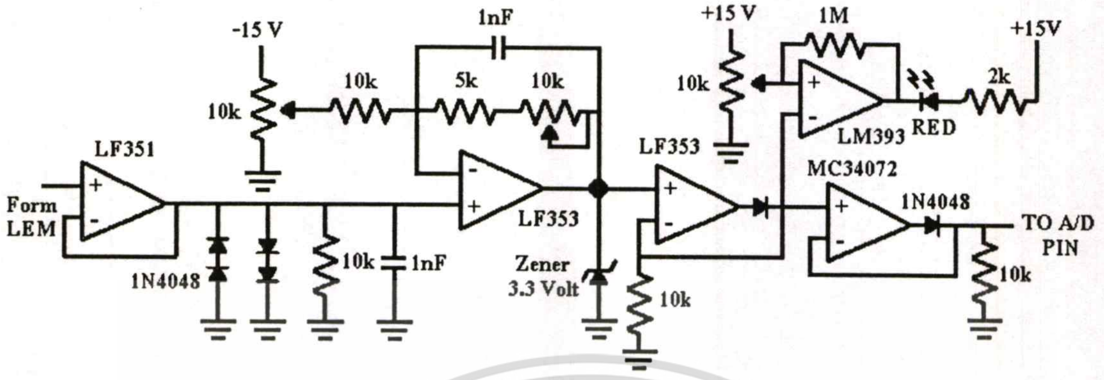
ภาพที่ 5.13 วงจรควบคุมและหยุดพัลส์สัญญาณขับนำชุดอินเวอร์เตอร์

5.6 การออกแบบและสร้างวงจรตรวจจับและป้อนกลับของกระแส

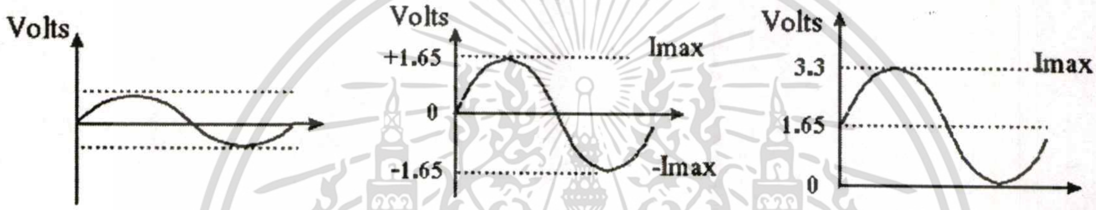
วงจรตรวจจับกระแสนี้เป็นวงจรที่ใช้เพื่อทำการยกระดับสัญญาณจากอุปกรณ์ตัวจับกระแส (LEM รุ่น LA-55P) ซึ่งสัญญาณทางด้านเอาท์พุทจะอยู่ในรูปของกระแสที่มีค่าอัตราส่วน 1:1000 นั่นหมายถึงหากวัดกระแสขนาด 10 แอมแปร์ จะทำให้ได้สัญญาณกระแสเอาท์พุทขนาด 10 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งสัญญาณที่ได้นี้ก่อนจะนำไปใช้งานจะต้องนำไปผ่านตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม ± 1 เปอร์เซ็นต์ เพื่อแปลงให้อยู่ในรูปของแรงดันจากนั้นนำไปเข้าวงจรบัฟเฟอร์และวงจรออฟเซ็ตเพื่อทำการเพิ่มองค์ประกอบทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไป เนื่องจากวงจรแอนะล็อกไปเป็นดิจิตอลภายในตัว DSP นี้ มีย่านการทำงานตั้งแต่ 0 – 3.3 โวลต์ จึงทำให้วงจรที่ออกแบบนี้จะต้องมีระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันทางด้านเอาท์พุตไม่เกิน 3.3 โวลต์ และจะต้องไม่มีสัญญาณทางด้านซีกลบ ไม่เช่นนั้นจะทำให้ DSP เกิดการเสียหายได้



(ก)



(ข) (ค) (ง)

ภาพที่ 5.14 วงจรตรวจจับกระแสและรูปคลื่น

(ก) วงจรตรวจจับกระแสและยกระดับแรงดัน (Offset)

(ข) รูปคลื่นจำลองที่ได้จาก LEM (ค่าสูงสุดของการกระแสใช้งาน)

(ค) รูปคลื่นจำลองที่ได้จากการปรับเกณฑ์

(ง) รูปคลื่นจำลองที่ได้จากการปรับออฟเซตของสัญญาณเพื่อป้อนให้กับ DSP

จากภาพที่ 5.14 ภายในวงจรจะประกอบด้วยส่วนของการขลิบสัญญาณโดยใช้ไดโอด 1N4148 ต่อไขว้กัน เพื่อป้องกันสัญญาณกระชาก (Transient) ที่ส่งไปยังวงจรยกระดับแรงดัน ซึ่งวงจรยกระดับนี้จะทำหน้าที่ยกระดับแรงดันและขยายสัญญาณ 1.5 เท่า เมื่อออกจากวงจรนี้แล้วจะไปเข้าวงจรขลิบสัญญาณทางด้านซีกลบ โดยวงจรนี้จะมีการทำงาน 2 ชั้น คือผ่านวงจรออฟแอมป์ LF353 ซึ่งใช้แหล่งจ่ายบวกลบ 15 โวลต์ สัญญาณเอาท์พุทที่ได้ค่อนข้างอันตรายกับ DSP จึงได้มีการนำสัญญาณดังกล่าวมาผ่านเข้าวงจรออฟแอมป์เบอร์ MC34072 ซึ่งใช้ไฟเลี้ยงขนาด 5 โวลต์ โดยข้อดีของวงจรที่ใช้ออฟแอมป์เบอร์ MC34072 คือสัญญาณที่ออกทางด้านเอาท์ พุตจะมีขนาดไม่เกิน 3.3 โวลต์ และมีความสามารถในการทำงานดีเท่ากับออฟแอมป์เบอร์ LF351 จึงทำให้วงจรที่ได้รับการออกแบบนี้ค่อนข้างสมบูรณ์และปลอดภัยสำหรับ DSP ส่วนวงจรในภาคท้าย ของวงจรตรวจจับกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

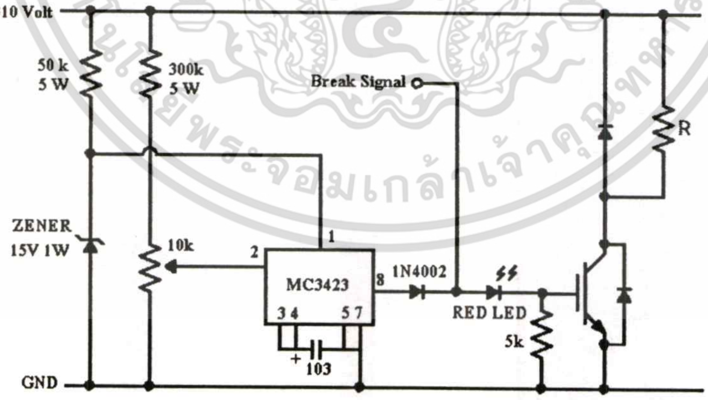
นี้คือวงจรแสดงสภาวะของกระแสที่ได้จากการตรวจจับ โดยสามารถตั้งย่านค่ากระแสที่ต้องการตัวจับเพื่อเตือนการทำงานได้ ยกตัวอย่างเช่น ถ้ามีระดับกระแสสูงถึงค่าที่ตั้งไว้จะทำให้หลอด LED สว่างขึ้น เป็นต้น ซึ่งวงจรที่ออกแบบส่วนนี้สามารถนำไปใช้ในการสั่งหยุดสัญญาณขับนำสวิตซ์ที่ใช้ในการขับนำชุดอินเวอร์เตอร์ได้ โดยจะติดตั้งในชุดตรวจจับกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์และชุดตรวจจับกระแสในส่วนของแหล่งจ่ายไฟตรง (DC Link) ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อต่อไป

5.7 การออกแบบและสร้างวงจรป้องกันต่างๆ

ระบบป้องกันวงจรนับว่าเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยระบบป้องกันวงจรจะประกอบไปด้วย วงจรป้องกันกระแสเกิน (Over Current), วงจรป้องกันแรงดันเกิน (Over Voltage) และวงจรตรวจจับแรงดัน โดยวงจรป้องกันที่ออกแบบและสร้างขึ้นนี้สามารถสรุปการทำงานในแต่ละส่วนได้ดังนี้

5.7.1 วงจรป้องกันแรงดันเกิน

การเกิดสภาวะแรงดันเกินนั้นมักจะเกิดเมื่อมอเตอร์มีการการลดความเร็ว ซึ่งการทำงานของวงจรป้องกันแรงดันเกินนี้จะทำหน้าที่ตรวจจับแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหลัก ซึ่งในสภาวะปกติจะมีค่าแรงดันประมาณ 310 โวลต์ โดยจะให้แรงดันขาออกประมาณ 2.6 โวลต์ ขึ้นอยู่กับแรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรง หากระดับแรงดันทางด้านไฟตรงมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า 315 โวลต์ ส่วนของวงจรเบรก (Break) จะมีการทำงาน โดยวงจรสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 5.15



ภาพที่ 5.15 วงจรป้องกันแรงดันเกิน

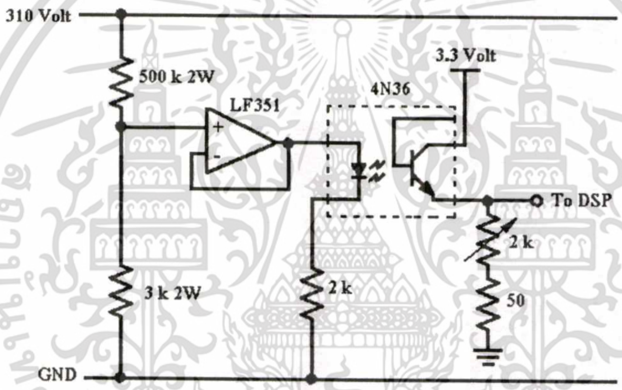
การทำงานของวงจรจะใช้ไอซีเบอร์ MC3423 ซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับระดับของสัญญาณที่มาจากภาคการตรวจจับแรงดัน ซึ่งในขณะที่แรงดันเกิน 315 โวลต์ จะทำให้สัญญาณไฟตรงจากภาคตรวจจับแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงส่งผลทำให้ขาสัญญาณทางด้านเอาท์พุตของไอซีมีการเปลี่ยนสถานะจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Low ไปเป็น High ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะถูกส่งไปทริกซ์การทำงานของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการเบรกหรือระบายกระแส ส่วนสัญญาณเบรก (Break Signal) จากภาพจะใช้เป็นสัญญาณอินพุตจากอุปกรณ์ภายนอก (ถ้ามีการต่อใช้งาน)

5.7.2 วงจรตรวจจับแรงดัน

การตรวจวัดแรงดันเกินในที่นี้เป็นการตรวจจับเพื่อใช้หยุดการทำงานของสัญญาณขับนำสวิตซ์กำลังในกรณีที่มีแรงดันที่ดีซีบัสไม่เพียงพอหรือแรงดันที่ดีซีบัสมีค่าสูงผิดปกติ การทำงานของวงจรจะอาศัยการตรวจจับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้หลักการแบ่งแรงดันด้วยตัวต้านทานและนำแรงดันที่ได้นี้ส่งต่อให้อุปกรณ์ออปโต้เพื่อแยกสัญญาณกราวด์ โดยใช้ออปโต้เบอร์ 4N36 ทำงานในโหมดเชิงเส้น สัญญาณที่ได้ทางด้านเอาท์พุตจะนำเข้าสู่ขาแอนะล็อกไปเป็นดิจิตอลของตัวประมวลผลเพื่อใช้ในการตรวจวัดสภาวะแรงดันต่อไป



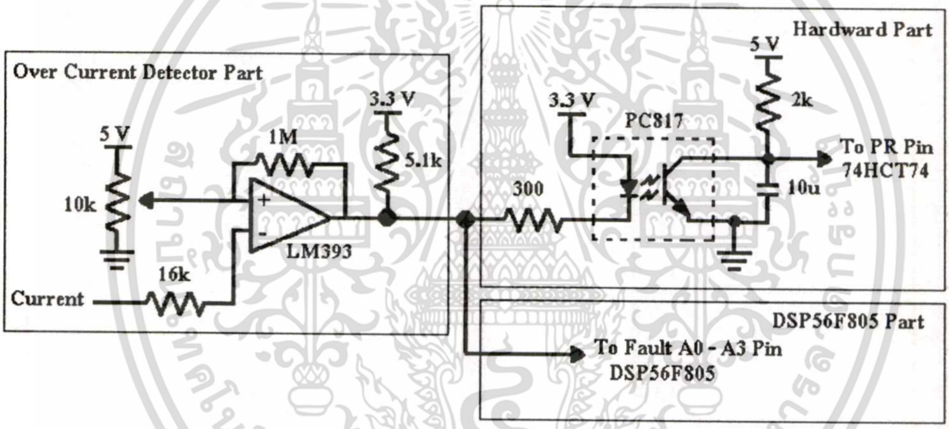
ภาพที่ 5.16 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟตรง

5.7.3 วงจรป้องกันกระแสเกิน

กรณีกระแสเกินส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้นเมื่อเริ่มเดินเครื่องหรือเพิ่มความถี่ของเครื่องควบคุมมอเตอร์เร็วเกินไปหรือการใส่ภาระให้กับมอเตอร์ที่ไม่เหมาะสมหรืออีกกรณีหนึ่งคือการเกิดการลัดวงจรของมอเตอร์ ซึ่งในการตรวจจับกระแสในโครงงานวิจัยนี้จะใช้ Hall Effect Current Sensor (LA-55P) ตรวจจับกระแสในวงจร ซึ่งข้อดีของ Hall Effect นี้คือ มีการแยกส่วน (Isolate) ของกระแสที่ใช้ในการตรวจจับ, สามารถวัดขนาดกระแสได้ถึง 50 แอมแปร์ โดยมีความเบี่ยงเบนเชิงเส้นต่ำกว่า 0.15 เปอร์เซ็นต์ และสามารถตอบสนองความถี่ในการทำงานได้ถึง 200 กิโลเฮิรตซ์ โดยให้มีค่าผิดพลาด ± 0.65 เปอร์เซ็นต์ที่ระดับการวัดกระแส 50 แอมแปร์ อีกทั้งยังสามารถรองรับอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสต่อเวลา (di/dt) ที่ค่ามากกว่า 200 แอมแปร์ต่อไมโครวินาทีได้ ซึ่งสัญญาณที่ออกจาก LEM นี้ จะต้องนำไปผ่านวงจรยกระดับและลิมิตแรงดันดังที่ได้อธิบายมาแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในหัวข้อที่ 5.6 สัญญาณที่ผ่านวงจรยกระดับแรงดันนี้จะถูกนำมาเข้าวงจรตรวจจับกระแสเกินซึ่งอาศัยหลักการเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงโดยใช้ไอซี LM393 ในการทำงาน จากวงจรในภาพที่ 5.17 จะสังเกตได้ว่าแรงดันทางด้านเอาท์พุตจะมีขนาดแรงดันการทำงานเพียง 3.3 โวลต์ เนื่องจากวงจรดังกล่าวนี้ถูกออกแบบมาเพื่อการควบคุมการตัดทำงานในขณะกระแสเกิน (Over current) หรือลัดวงจร (Fault) ได้ทั้งทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ โดยทางด้านฮาร์ดแวร์จะเป็นการหยุดพัลส์สัญญาณขับนำของชุดอินเวอร์เตอร์โดยอาศัยการควบคุมผ่านไอซี 74HCT74 ที่ใช้ในการควบคุมพัลส์พีดับบิวเอ็มดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อการควบคุมการทำงานของพัลส์สัญญาณขับนำ ส่วนทางด้านซอฟต์แวร์จะอาศัยขาฟอล์ต A0 ถึง A3 ของ DSP56F805 ในการทำงาน ซึ่งถ้าขาดังกล่าวนี้มีสภาวะต่ำ (Low) เมื่อใด จะทำให้เกิดการอินเตอร์รัพต์ในส่วนของโปรเท็กชั่น (Protection) ขึ้น ส่งผลทำให้มีการหยุดการทำงานของชุดสัญญาณพีดับบิวเอ็มอย่างฉับพลัน โดยระดับสัญญาณที่ได้จะอยู่ในสถานะ High Impedance ทั้งหมด

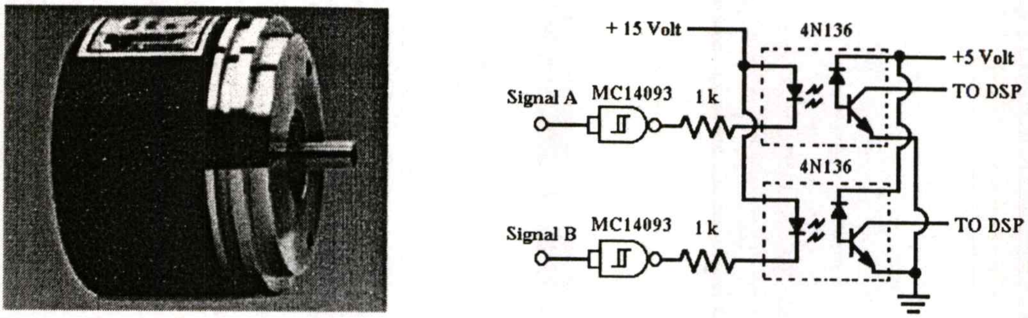


ภาพที่ 5.17 วงจรป้องกันกระแสเกิน

5.8 การออกแบบภาคการควบคุมความเร็วรอบจากอุปกรณ์ตรวจจับความเร็ว

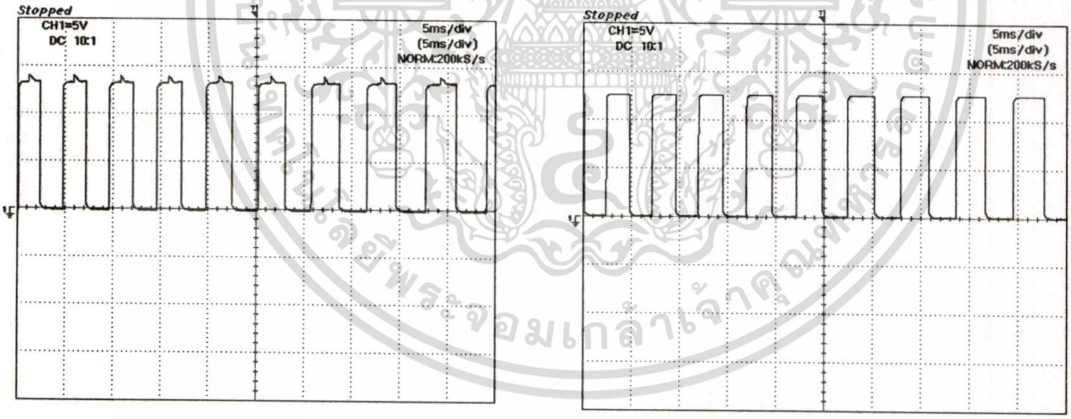
อุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้ในการตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์คือ พัลส์เอ็นโค๊ดเดอร์ (Pulse Encoder) อุปกรณ์จำพวกนี้สามารถแบ่งตามชนิดของแหล่งจ่ายไฟได้ 2 ประเภทคือ ประเภทที่ใช้ไฟเลี้ยงขนาด 5 โวลต์และประเภทที่ใช้ไฟเลี้ยงขนาด 10 – 30 โวลต์ [28] ซึ่งในโครงงานวิจัยนี้ใช้ชนิดของพัลส์เอ็นโค๊ดเดอร์แบบที่สองโดยใช้แรงดันไฟเลี้ยงขนาด 15 โวลต์ ซึ่งการทำงานของตัวเอ็นโค๊ดเดอร์นี้จะสร้างสัญญาณพัลส์ออกมาจำนวนหนึ่งเมื่อโรเตอร์มีการเคลื่อนที่ (หมุน) พัลส์เอ็นโค๊ดเดอร์ที่เลือกใช้ในโครงงานวิจัยคือรุ่น WDG58A-500-AB-G24-S2 สัญญาณพัลส์ที่ได้มี 2 สัญญาณคือสัญญาณ A และสัญญาณ B โดยที่สัญญาณเฟส A จะมีเฟสต่างกับเฟสของสัญญาณ B อยู่ 90 องศา และมีความละเอียดของพัลส์เท่ากับ 500 พัลส์ต่อรอบ ดังแสดงในภาพที่ 5.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.18 อุปกรณ์ตรวจจับความเร็วรอบ (เอ็นโค๊ดเดอร์) และวงจรสำหรับการเชื่อมต่อกับ DSP

จากสัญญาณเอาท์พุตของ A และ B นี้ เมื่อนำไปต่อกับ DSP จะต้องมีการแยกระดับสัญญาณ (Isolate) เนื่องจาก DSP56F805 จะใช้แรงดันในการทำงานจริงเพียง 3.3 โวลต์ แต่ภายในวงจรของบอร์ด DSP56F805EVM ได้มีการต่อความต้านทานไว้ค่าหนึ่ง จึงทำให้สามารถรับสัญญาณเอาท์พุตจากเอ็นโค๊ดเดอร์ได้ไม่เกิน 5 โวลต์ ซึ่งวงจรแยกโดดที่ได้รับการออกแบบนี้จะมีไอซีแบบสมิทริกซ์เกอร์ต่ออยู่ เนื่องจากสัญญาณเอาท์พุต A และ B จากพัลส์เอ็นโค๊ดเดอร์จะมีลักษณะสัญญาณที่ไม่ค่อยเรียบ จึงต้องอาศัยวงจรการทำงานดังกล่าวในการช่วยแต่งระดับสัญญาณให้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้นดังแสดงในภาพที่ 5.19



(ก) รูปสัญญาณจากเอ็นโค๊ดเดอร์ (ข) รูปสัญญาณหลังวงจรสมิททริกซ์เกอร์

ภาพที่ 5.19 ระดับสัญญาณพัลส์เอ็นโค๊ดเดอร์ที่ออกจากขาเอาท์พุต

5.8.1 การคำนวณหาค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จากเอ็นโค๊ดเดอร์

การคำนวณหาค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีวิธีการหาอยู่ 2 แบบคือการใช้ไทม์เมอร์ในการตรวจจับคาบเวลาของพัลส์เอ็นโค๊ดเดอร์ภายใน 1 ลูกคลื่น ส่วนอีกแบบจะเป็นการกำหนดคาบเวลาให้มีค่าคงที่แล้วอาศัยจำนวนพัลส์จากเอ็นโค๊ดเดอร์ที่นับได้ในช่วงเวลาดังกล่าว ซึ่งผลลัพธ์แบบแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะให้ความเที่ยงตรงค่อนข้างสูงในกรณีที่มอเตอร์หมุนที่ความถี่ต่ำๆ (ขณะเริ่มเดิน เป็นต้น) แต่จะมีข้อเสียคือจะเกิดค่าผิดพลาดขึ้นได้ง่ายในกรณีที่มอเตอร์หมุนเร็ว ส่วนการคำนวณหาค่าความเร็วรอบแบบที่สองนั้น ข้อดีคือค่าความเที่ยงตรงของความเร็วรอบจะเป็นลักษณะเชิงเส้น แต่จะอาศัยช่วงเวลาการตรวจจับที่นานกว่า ซึ่งการทำงานทั้งสองแบบนี้จะอาศัยจำนวนของพัลส์เอ็นโค๊คเดอร์, จำนวนลูกของสัญญาณนาฬิกา, คาบเวลาภายใน 1 ลูกของสัญญาณนาฬิกา ซึ่งการคำนวณหาค่าความเร็วรอบจากการตรวจจับคาบเวลาของพัลส์เอ็นโค๊คเดอร์ภายใน 1 ลูกคลื่น สามารถหาได้ดังนี้

$$rpm = \frac{60}{measured\ ticks\ .\ timer\ resolution\ .\ munber\ of\ \ teeth} \tag{5.5}$$

เมื่อ *rpm* คือ จำนวนรอบของมอเตอร์ (รอบต่อนาที)

measured ticks คือ จำนวนลูกของสัญญาณนาฬิกา (0 – 65535 ค่า)

timer resolution คือ คาบเวลาภายใน 1 ลูกของสัญญาณนาฬิกา (25 นาโนวินาที)

munber of teeth คือ จำนวนพัลส์เอ็นโค๊คเดอร์ภายใน 1 รอบ (500 พัลส์ต่อรอบ)

จากสูตรการหาค่าความเร็วมอเตอร์

$$rpm = \frac{120\ f}{pole} \tag{5.6}$$

$$f_r = f = rpm\ .\ \frac{pole}{120} \tag{5.7}$$

เมื่อ f คือ ความถี่ที่ใช้กับมอเตอร์ในการคำนวณหาค่าความเร็วรอบ

f_r คือ ความถี่ที่ได้จากการตรวจจับที่เพลาของมอเตอร์ (เฮิรตซ์)

pole คือ จำนวนโพลของมอเตอร์ (4 โพล)

$$f_r = \frac{\left({pole}/{2} \right)}{measured\ ticks\ .\ timer\ resolution\ .\ munber\ of\ \ teeth} \tag{5.8}$$

จากสมการ (5.8) สามารถหาค่าความเร็วรอบต่ำสุดที่ตรวจจับได้ ยกตัวอย่างเช่น ไทม์เมอร์ที่ใช้ในการตรวจจับมีขนาด 16 บิต (สามารถนับได้ 0 – 65535 ค่า) ทำงานที่ความถี่เท่ากับ 40 เมกะเฮิตรซ์

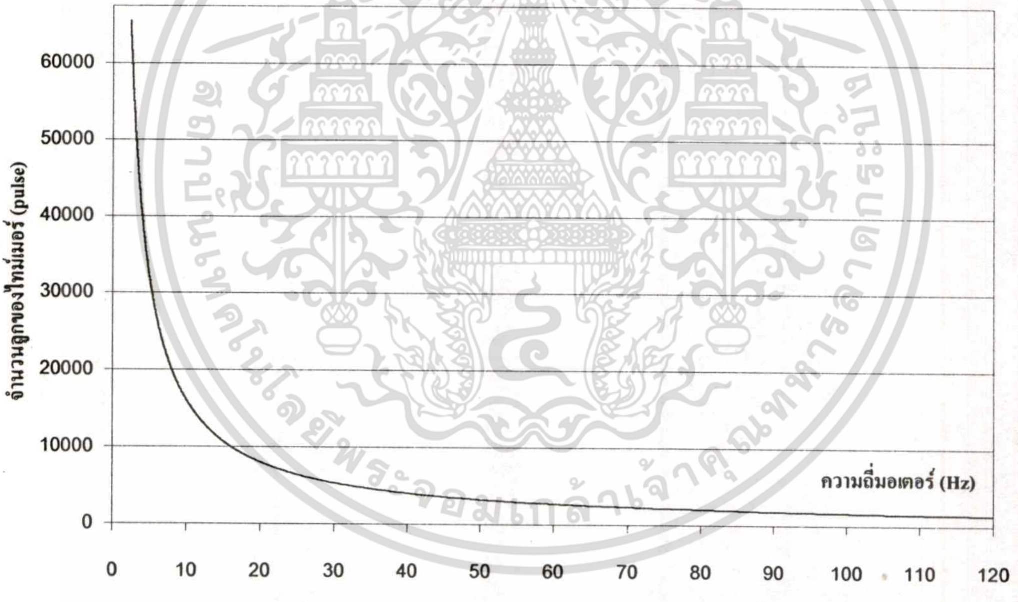
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(25 ns) และมีพัลส์เอ็นโค๊ดเดอร์ภายใน 1 รอบเท่ากับ 500 พัลส์ การคำนวณสามารถทำได้โดยแทนค่าในสมการจะได้ค่าดังนี้

$$f_r = \frac{(4/2)}{65535\,.\,25x10^{-9}\,.\,500} = 2.4414\,Hz.$$

$$rpm = \frac{120\,.\,(2.4414)}{4} = 73.2433 \text{ รอบต่อนาที}$$

จากการคำนวณจะพบว่าความเร็วรอบต่ำสุดที่สามารถตรวจจับได้จะมีค่าเท่ากับ 73.2433 รอบต่อนาที ซึ่งค่าที่ได้นี้สามารถปรับปรุงให้มีความสามารถในการคำนวณหาค่าความเร็วรอบต่ำสุดได้อีกโดยใช้วงจรตัวตรวจจับ (ไทม์เมอร์) ขนาด 32 บิตได้ ซึ่งภายในตัว DSP มีรีจิตเตอร์ขนาด 32 บิตนี้รองรับการทำงานอยู่



ภาพที่ 5.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ได้กับนับจำนวนนับของไทม์เมอร์

จากภาพที่ 5.20 จะเห็นได้ว่าหากเวลาภายใน 1 คาบของลูกคลื่นจากพัลส์จากเอ็นโค๊ดเดอร์นี้มีค่าน้อยเกินไป จะทำให้การคำนวณหาค่าความเร็วรอบนั้นมีค่าผิดพลาด (Error) เกิดขึ้นได้ ดังนั้นหากมอเตอร์มีการทำงานจากสภาวะหยุดนิ่งไปยังความเร็วรอบอ้างอิงในขั้นตอนแรกจะต้องอาศัยการทำงานแบบที่หนึ่งดังที่ได้กล่าวมาแล้วจากนั้นจะมีการเปลี่ยนเข้าสู่โหมดการทำงานในแบบที่สองคือการหาค่าความเร็วรอบโดยการกำหนดคาบเวลาให้มีค่าคงที่แล้วอาศัยจำนวนพัลส์จากเอ็นโค๊ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

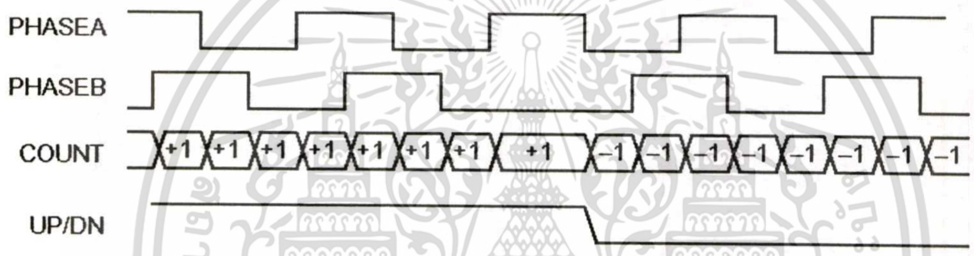
เดอร์ที่นับได้ในช่วงเวลาเป็นตัวบอกค่าความเร็ว (มักถูกใช้ในเชิงพาณิชย์) โดยสามารถหาได้จากสมการ (5.9) และ (5.10)

$$rpm = \frac{60\,.\,measured\ edges}{sample\,timer\ .\ munber\ of\ teeth} \tag{5.9}$$

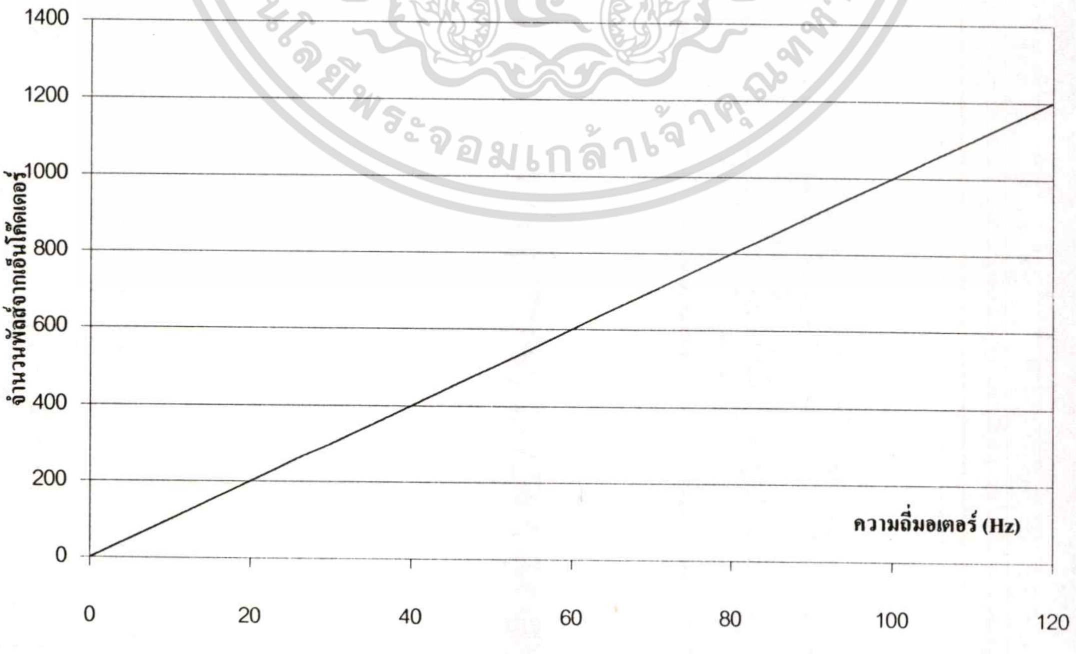
$$f_r = \left(\frac{pole}{2}\right) \cdot \frac{measured\ edges}{sample\,timer\ .\ munber\ of\ teeth} \tag{5.10}$$

เมื่อ *measured edges* คือ จำนวนพัลส์จากเอ็นโค๊คเดอร์ที่ได้จากการตรวจจับ

sample timer คือ คาบเวลาที่ใช้ในการสุ่ม



ภาพที่ 5.21 พัลส์สัญญาณจากเอ็นโค๊ดเดอร์



ภาพที่ 5.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ได้จากการนับพัลส์จากเอ็นโค๊ดเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่ได้กล่าวถึงวิธีการใช้งานของอุปกรณ์เอ็นโค๊ดเดอร์มาแล้วในข้างต้น โครงงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการคำนวณหาค่าความเร็วโดยใช้การหาค่าความเร็วรอบแบบอาศัยจำนวนพัลส์จากเอ็นโค๊ดเดอร์ที่นับได้ในช่วงเวลาเป็นตัวบอกค่าความเร็ว (แบบที่ 2) โดยกำหนดคาบของการสุ่มทุกๆ 10 มิลลิวินาที ซึ่งจะช่วยทำให้กระบวนการทำงานค่อนข้างเร็ว โดยที่พัลส์จากเอ็นโค๊ดเดอร์ของเฟส A และ B เมื่อเข้าสู่ DSP จะสามารถนับได้ทั้งหมด 4 พัลส์ (นับขอบขาขึ้น) ดังแสดงการทำงานในภาพที่ 5.21 จึงทำให้การคำนวณค่า 1 พัลส์ ที่ได้จากการตรวจจับจากเอ็นโค๊ดเดอร์มีค่าเท่ากับ 0.1 เฮิรตซ์ หรือที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 3 รอบต่อนาที ดังแสดงในกราฟความสัมพันธ์ภาพที่ 5.22 ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถพิสูจน์ได้ดังนี้

$$f_r = \left(\frac{4}{2}\right) \cdot \frac{1}{10x10^{-3} \cdot 500 \cdot 4} = 0.1 \text{ เฮิรตซ์}$$

สำหรับการทำงานที่ต้องการความถูกต้องสูงก็สามารถทำได้โดยการปรับค่าแซมปิ้งของเวลาให้มีการทำงานที่ยาวมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวนี้อาจจะมีผลกระทบต่อระบบการควบคุมได้ ในกรณีต้องการความละเอียดสูงก็จำเป็นที่จะต้องใช้เวลาในการแซมปิ้งที่ยาวนานขึ้นซึ่งอาจจะทำกระบวนการอื่นๆ ที่จะต้องทำงานต่อไปมีข้อมูลในการอัพเดตที่ช้าได้ และเนื่องจากในโครงงานวิจัยนี้การคำนวณหาค่าความเร็วรอบของการทำงานส่วนใหญ่มักจะทำงานที่ความเร็วปานกลางจนถึงความเร็วสูงประกอบกับความละเอียดของค่าตรวจจับที่ได้จากพัลส์ค่อนข้างจะมีความละเอียดอยู่แล้ว การเลือกใช้การทำงานเฉพาะรูปแบบวิธีการนับความถี่ที่ได้จากการนับพัลส์จากเอ็นโค๊ดเดอร์โดยตรง (แบบที่ 2) ก็ถือว่ามีความเพียงพอแล้ว นอกจากรูปแบบการนับดังที่กล่าวมาแล้ว ภายในตัวอุปกรณ์ DSP เองยังมีความสามารถในการตรวจจับทิศทางการทำงานได้อย่างอัตโนมัติ โดยสามารถตรวจสอบได้จากรีจิตเตอร์ภายในของ DSP เนื่องจากในตัวของเอ็นโค๊ดเดอร์นี้จะมีการทำงานของพัลส์เฟส A และเฟส B ที่มีความสัมพันธ์กันอยู่ ซึ่งถ้าสัญญาณพัลส์เฟส A มีการนำหน้าสัญญาณพัลส์เฟส B นั้นหมายถึงมอเตอร์มีการหมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา แต่ถ้าหากสัญญาณพัลส์เฟส B มีการนำหน้าสัญญาณพัลส์เฟส A นั้นหมายถึงมอเตอร์มีการหมุนไปในทิศทางที่ทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งรูปแบบการตรวจจับนี้ในโครงงานวิจัยจะใช้ในการตรวจสอบการทำงานของมอเตอร์ในกรณีที่มีการสั่งกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์

5.8.2 การคำนวณหามุมที่ได้จากการวัดค่าความเร็วจากพัลส์เอ็นโค๊ดเดอร์

ค่าความถี่ที่ได้จากการตรวจจับนี้จะถูกนำไปทำการหาค่าของมุม ซึ่งค่าของมุมนี้สามารถทำได้โดยการอินทิเกรตเทียบกับเวลา แต่เนื่องจากตัว DSP เองไม่สามารถทำการอินทิเกรตได้ จึงมีการใช้เทคนิคการบวกสะสมเพื่อใช้ในการหาค่ามุมต่างๆ ที่ได้จากการตรวจจับจากพัลส์เอ็นโค๊ดเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$New_angle = old_angle + increment_value \quad (5.11)$$

เมื่อ New_angle คือ ค่าของมุม (องศา) ล่าสุดที่ได้จากการคำนวณ

old_angle คือ ค่าของมุม (องศา) เดิม

$increment_value$ คือ ค่าของมุม (องศา) ที่ได้จากการตรวจจับจากความถี่ของมอเตอร์

ในการทำงานจำเป็นจะต้องทราบค่าของความถี่ของมอเตอร์ (ได้จากการตรวจจับจากพัลส์เอ็นโค๊ดเดอร์) คาบเวลาของการเกิดอินเตอร์รัพต์สำหรับการอัพเดตมุมและขนาดของค่าองศาที่ทำการเก็บค่าไว้ ซึ่งค่าทั้งหมดจะถูกใช้ในสมการ (5.12)

$$increment_value = f_r \, . \, speed\ sampling \, . \, table_sige \quad (5.12)$$

เมื่อ $speed\ sampling$ คือ คาบเวลาของการเกิดอินเตอร์รัพต์ (200 ไมโครวินาที)

$table_sige$ คือ ขนาดตารางที่ใช้ในการเก็บค่าองศา (50,000 ค่า)

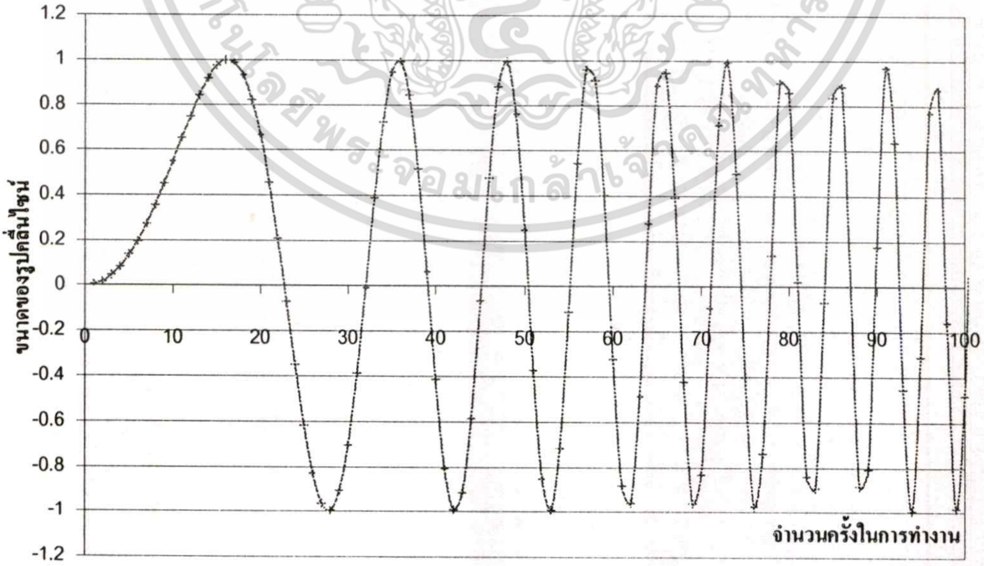
ในวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดค่าวงรอบการทำงานของลูปความเร็วให้มีการแซมปิ้งทุกๆ 10 มิลลิวินาที และมีค่าองศาที่ทำการเก็บค่าแล้วจำนวน 50,000 ค่า ทุกครั้งที่มีการเกิดอินเตอร์รัพต์ขึ้นจะมีการนำค่าความถี่ของมอเตอร์ที่ได้จากการตรวจจับจากพัลส์เอ็นโค๊ดเดอร์ (f_r) มาทำการคูณกับค่าคาบเวลาของการเกิดอินเตอร์รัพต์ ($speed\ sampling$) และขนาดของตาราง (Lookup Table) จะได้ค่าของมุมใหม่ ณ ที่สภาวะนั้น ซึ่งค่าของมุมที่ได้นี้จะต้องมีการจำกัดไม่ให้มีขนาดมุมเกิน 360 องศา หรือ 50,000 ค่า จากนั้นจะนำมุมที่ได้ไปทำการบวกกับค่ามุมเดิมดังสมการ (5.11) จะได้ค่าของมุมที่ใช้ในการชี้ตำแหน่งค่าไซน์ ซึ่งการชี้ตำแหน่งค่าไซน์นี้จะต้องอาศัย Lookup table ในการเลือกค่าต่างๆ เหล่านั้นมาใช้ ซึ่งในโครงงานวิจัยนี้จะเลือกเก็บค่าไซน์ (Sine) และโคไซน์ (Cosine) อย่างละ 50,000 ค่า (ตั้งแต่มุม 0 ถึง 360 องศา) โดยจะใช้เทคนิคการเก็บค่าเพียง 90 องศา หรือเท่ากับ 12,500 ค่า สำหรับข้อมูลของค่าไซน์ (Sine) และจะใช้เทคนิคการเก็บค่าเพียง 90 องศา หรือเท่ากับ 2,500 ค่า สำหรับข้อมูลของค่าโคไซน์ (Cosine) ซึ่งเทคนิคการเก็บข้อมูลเพียง 90 องศาสามารถทำได้โดยเก็บข้อมูลค่าไซน์ตั้งแต่ 0 ถึง 90 องศาไว้ในตารางข้อมูลและในขั้นตอนของการทำงานจะต้องอาศัยกระบวนการเปรียบเทียบเพื่อหาตำแหน่งของข้อมูลที่ใช้ดังที่แสดงตัวอย่างไว้ในรูปแบบของภาษาซีดังนี้

```
if (theta_a < 12,501)          // thata < pi / 2
{     index_a = theta_a;       // Index = thata
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

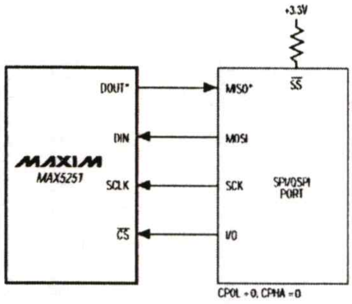
```
        sign_a_sin = 1;    }              // positive
else if (theta_a < 25,001)                // thata < pi
{       index_a = 25,000 - theta_a;       // Index = pi - thata
        sign_a_sin = 1;    }              // positive
else if (theta_a < 37,501)                // thata < 3.pi / 2
{       index_a = theta_a – 25,000;       // Index = thata - pi
        sign_a_sin = -1;   }              // negative
else                                      // thata < 2.pi
{       index_a = 50,000 - theta_a;       // Index = 2.pi - thata
        sign_a_sin = -1;   }              // negative
```

ในการทำงานจะต้องมีการเปรียบเทียบค่ามุมที่ได้กับจำนวนค่าที่อยู่ในตารางแล้วอาศัยตัวชี้ (Index) ตำแหน่งแอดเดรสเป็นตัวนำค่ามุมต่างๆ เหล่านั้นไปใช้งาน ซึ่งจะได้กล่าวถึงโฟร์ชาร์ทการทำงานของกระบวนการต่างๆ อีกครั้งในหัวข้อโครงสร้างทางซอฟต์แวร์และจากภาพที่ 5.23 จะแสดงถึงการจำลองสัญญาณไซน์ที่ได้จากการตรวจจับความถี่ของมอเตอร์โดยใช้เอ็นโค๊ดเดอร์ในการตรวจจับและมีการนับข้ามค่ากระโดดดังที่กล่าวถึงวิธีการในบทที่ 3 แล้ว จะสังเกตได้ว่ารูปคลื่นไซน์ที่กำเนิดออกมานั้นจะเริ่มทำงานที่ความถี่ต่ำและค่อยๆ มีความถี่สูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าความถี่ที่ต้องการ ซึ่งความละเอียดของรูปคลื่นไซน์ที่ได้นี้จะขึ้นอยู่กับคาบเวลาของการสุ่มและจำนวนข้อมูลที่เก็บไว้ในตาราง (Lookup Table)

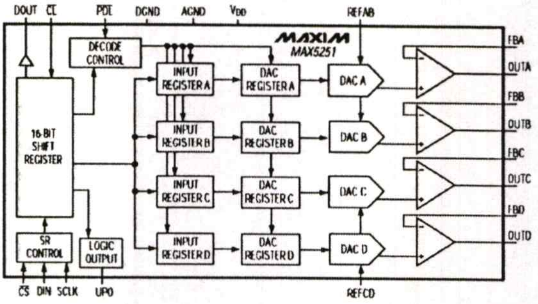


ภาพที่ 5.23 รูปคลื่นสัญญาณไซน์ที่ได้จากจำลองการทำงานตรวจจับความถี่ของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) บล๊อกการเชื่อมต่อกับวงจรภายนอก



(ข) ฟังก์ชั่นภายในของไอซีเบอร์ MAX5251

ภาพที่ 5.24 การเชื่อมต่อระหว่างไอซี MAX5251 กับ DSP และฟังก์ชั่นภายในไอซี MAX5251

5.8.3 การแสดงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์

การแสดงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ในโครงงานวิจัยนี้จะอาศัยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลในการประมวลผลและส่งผลลัพธ์ที่ได้โดยผ่านทางพอร์ต Serial Peripheral Interface เพื่อส่งไปยังอุปกรณ์แปลงจากดิจิตอลไปเป็นแอนะล็อก (D/A) โดยใช้ไอซีเบอร์ MAX5251 ซึ่งการทำงานของไอซีดังกล่าวจะทำงานรับ/ส่งข้อมูลแบบอนุกรมด้วยความเร็วขนาด 10 เมกะเฮิรตซ์ โดยมีความละเอียดของข้อมูลขนาด 12 บิต และมีช่องสัญญาณเอาท์พุตจำนวน 4 ช่องสัญญาณ ดังแสดงในภาพที่ 5.24 และรูปแบบคำสั่งใช้งานในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 รูปแบบคำสั่งที่ใช้ในการรับ/ส่งข้อมูลแบบอนุกรมของไอซี MAX5251

16-BIT SERIAL WORD							
A1	A0	C1	C0	D9.........D0 MSB.........LSB	S1	S0	FUNCTION
0	0	0	1	10-bit DAC data	0	0	Load input register A; DAC registers unchanged.
0	1	0	1	10-bit DAC data	0	0	Load input register B; DAC registers unchanged.
1	0	0	1	10-bit DAC data	0	0	Load input register C; DAC registers unchanged.
1	1	0	1	10-bit DAC data	0	0	Load input register D; DAC registers unchanged.
0	0	1	1	10-bit DAC data	0	0	Load input register A; all DAC registers updated.
0	1	1	1	10-bit DAC data	0	0	Load input register B; all DAC registers updated.
1	0	1	1	10-bit DAC data	0	0	Load input register C; all DAC registers updated.
1	1	1	1	10-bit DAC data	0	0	Load input register D; all DAC registers updated.
0	1	0	0	XXXXXXXXXX	X	X	Update all DAC registers from their respective input registers (also exit shutdown mode).
1	0	0	0	10-bit DAC data	0	0	Load all DAC registers from shift register (also exit shutdown mode).
1	1	0	0	XXXXXXXXXX	X	X	Enter shutdown mode (provided $\overline{PDL}$ = 1).
0	0	1	0	XXXXXXXXXX	X	X	UPO goes low (default).
0	1	1	0	XXXXXXXXXX	X	X	UPO goes high.
0	0	0	0	XXXXXXXXXX	X	X	No operation (NOP) to DAC registers
1	1	1	0	XXXXXXXXXX	X	X	Mode 1, DOUT clocked out on SCLK's rising edge. All DAC registers updated.
1	0	1	0	XXXXXXXXXX	X	X	Mode 0, DOUT clocked out on SCLK's falling edge. All DAC registers updated (default).

"X" = Don't care

5.9 การออกแบบภาคการควบคุมแบบป้อนกลับพีไอของการควบคุมความเร็วรอบ

วงรอบของการควบคุมความเร็วรอบ (Speed loop control) เป็นองค์ประกอบคำคัญในการกำหนดพฤติกรรมของระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ ความเร็วของมอเตอร์จะมีความแม่นยำต่อคำสั่งเพียงใด สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้รวดเร็วเพียงใดหลังจากได้รับคำสั่งหรือได้รับผลกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงใดเมื่อสภาวะโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ล้วนขึ้นอยู่กับสมรรถนะของระบบควบคุมความเร็ว ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกการควบคุมแบบพีไอ (Proportional integral control) ผลลัพธ์ของวงรอบการควบคุมความเร็วจะหมายถึงปริมาณแรงบิด (Torque command) ที่เหมาะสมกับสภาวะโหลดในขณะนั้น อันจะนำไปสู่การกำหนดปริมาณกระแสทางโรเตอร์ (I_r) ที่เหมาะสมและจากโครงสร้างทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสมการ (5.13)

$$T_e = J_m \frac{d\omega_r}{dt} + B_m\omega_r + T_L \qquad (5.13)$$

เมื่อ T_e คือ ค่าแรงบิดของมอเตอร์ (Electromagnetic Torque)

J_m คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ (Inertia)

B_m คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของมอเตอร์ (Viscous Friction Coefficient)

T_L คือ ค่าแรงบิดที่โหลด

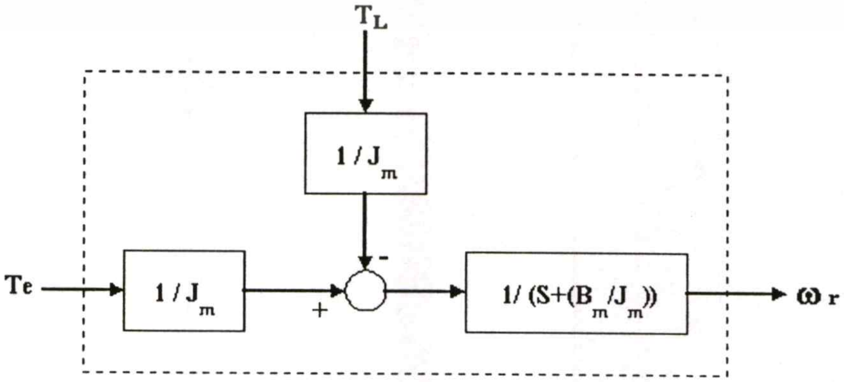
เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e}{J_m} - \frac{B_m\omega_r}{J_m} - \frac{T_L}{J_m} \qquad (5.14)$$

ดังนั้น

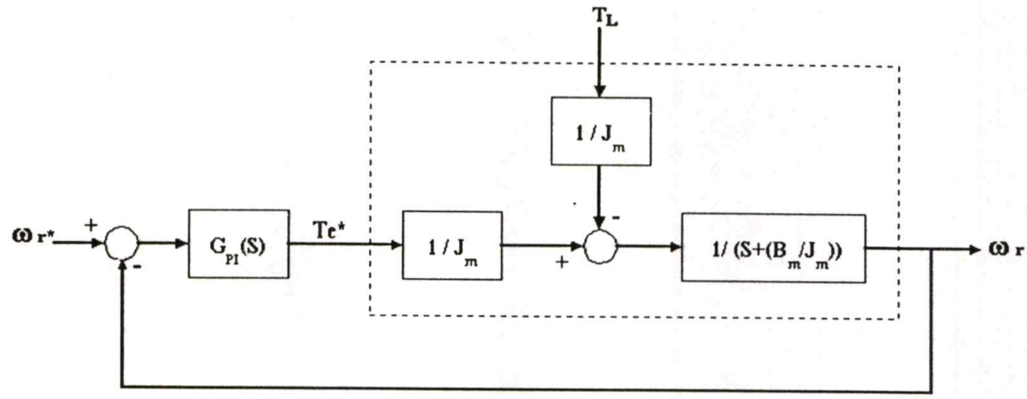
$$\omega_r = \left(\frac{T_e}{J_m} - \frac{T_L}{J_m}\right)\cdot\left(\frac{1}{S + \left(B_m/J_m\right)}\right) \qquad (5.15)$$

จากสมการ (5.15) และภาพที่ 5.25 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำในเทอมของแรงบิดและความเร็วรอบ



ภาพที่ 5.25 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำในเทอมของแรงบิดและความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.26 โครงสร้างวงรอบการควบคุมความเร็วรอบ

จากฟังก์ชันการโอนย้ายของตัวควบคุมแบบพีไอจะได้สมการดังนี้

$$G_{PI}(S) = Kp + \frac{Ki}{S} \tag{5.16}$$

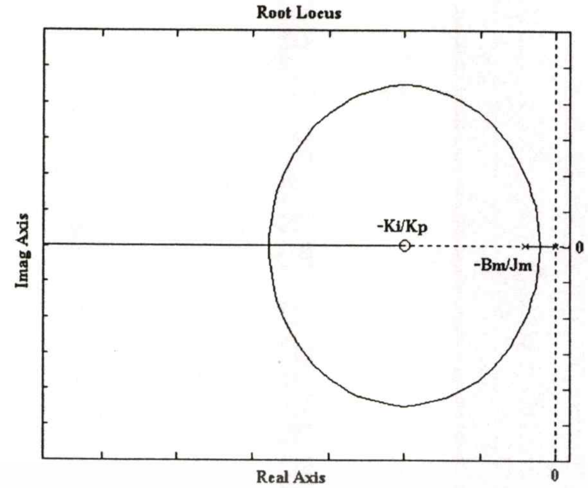
ซึ่งในขั้นตอนของการออกแบบจะพิจารณามอเตอร์ในสภาวะไร้โหลด $(T_L = 0)$ เพื่อการวิเคราะห์ตามหลักการการควบคุมแบบป้อนกลับแบบเชิงเส้น (Feedback linear control) สามารถเขียนฟังก์ชันการโอนย้ายของระบบเปิด (Open loop transfer function) ได้ดังนี้

$$G_c(S) = \left(Kp + \frac{Ki}{S}\right) \cdot \frac{1}{J_m} \cdot \frac{1}{\left(S + {B_m}/{J_m}\right)}$$

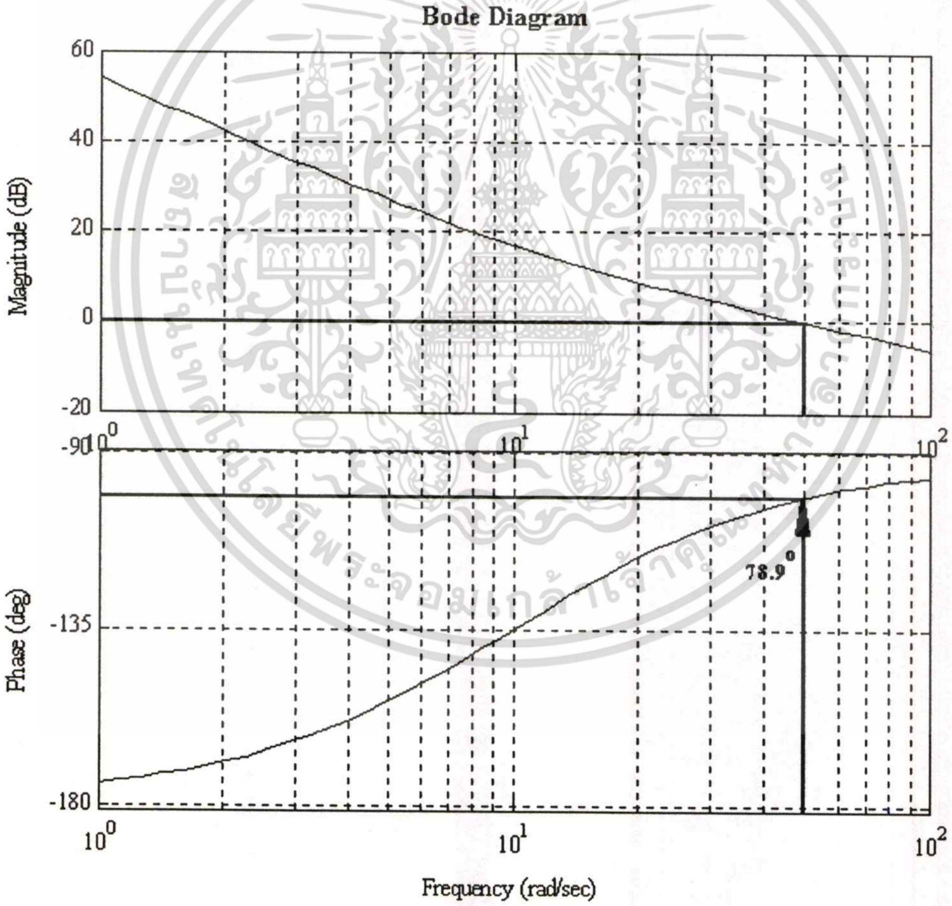
$$= \frac{Kp}{J_m} \cdot \frac{\left(S + {Ki}/{Kp}\right)}{S \cdot \left(S + {B_m}/{J_m}\right)} \tag{5.17}$$

จากฟังก์ชั่นการโอนถ่ายตามสมการ (5.17) จะพบว่าระบบเกิดซีโร่ (Zero) หนึ่งจุดที่ –Ki/Kp และเกิดสองโพล (Pole) ที่จุด 0 และที่ค่า $-B_m$ / J_m โดยปกติแล้วค่าทั้งหมดจะอยู่ทางด้านซ้ายมือของระนาบเอส (S- Plane) โดยที่ซีโร่จะอยู่ทางด้านซ้ายมือของโพลทั้งสองในระนาบ S ทั้งนี้เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (B_m) จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับโมเมนต์ความเฉื่อย (J_m) และค่าอัตราส่วนของ Ki/Kp จากเส้นทางเดินรากของระบบ (Root locus) ดังแสดงในภาพที่ 5.27 ตลอดเวลาทางเดินรากของระบบจะมีแนวอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบ S แสดงว่าระบบมีเสถียรภาพที่ดีตลอดย่านการเลือกใช้ค่า Kp ที่มากกว่า 0 และค่า Ki ที่มากกว่า 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.27 ทางเดินรากของวงรอบการควบคุมความเร็ว



ภาพที่ 5.28 แผนภาพโบดของระบบควบคุมความเร็ววงรอบเปิดที่ได้ทำการออกแบบ

การเลือกอัตราขยาย Ki และ Kp ที่เหมาะสมให้กับระบบสามารถพิจารณาได้จากผลการตอบสนองความถี่ของระบบ (Bode diagram) โดยปกติระบบความคุมมอเต้อร์เหนี่ยวนำซึ่งใช้งานกันอยู่ในอุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาหกรรมจะเลือกความถี่ตัดข้าม (Cross over frequency , ω_{CR}) อยู่ที่ประมาณ 50 rad/sec ซึ่งนับได้ว่าเป็นค่าที่ให้ช่วงปลอดภัยเชิงเฟส (Phase margin) เพียงพอสำหรับเสถียรภาพในการควบคุม [29] เหตุที่เลือกค่าเพียง 50 rad/sec เนื่องจากแบบจำลองอาจจะมีค่าความคาดเคลื่อนได้มาก ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดปัญหาทางด้านเสถียรภาพได้ ถ้าหากค่าของความถี่ตัดข้ามมีค่าสูงกว่านี้ และในการออกแบบเราจะเลือกค่าความถี่หักมุม (Cutoff frequency, ω_{CU}) ประมาณ 1/5 ของค่าความถี่ตัดข้าม ภายใต้การสมมติฐานว่าระบบเป็นระบบอันดับสอง (Second order System) จากภาพที่ 5.28 แสดงแผนภาพโบดของระบบควบคุมความเร็ววงรอบเปิดที่ได้ทำการออกแบบจะต้องมีช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบมากกว่า –180 องศา โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบที่ทำการจำลองนี้ จะมีค่าเหลืออยู่อีก 78.9 องศา ซึ่งเป็นค่าที่เพียงพอสำหรับเสถียรภาพของระบบควบคุมความเร็วรอบ ซึ่งการทำงานโดยทั่วไปเรามักจะให้ระบบมีค่าแมกนิจูดสูงที่ค่าความถี่ต่ำ เพื่อเพิ่มอัตราการตอบสนองต่อโหลดและลดความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นในสภาวะคงตัว และต้องการให้มีค่าแมกนิจูดต่ำที่ค่าความถี่สูง เนื่องมาจากการวัดและความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่อาจเกิดค่าผิดพลาดได้และเพื่อให้ระบบมีลักษณะการตอบสนองที่ดีคือมีการกลับสู่ค่าสภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็วภายหลังการรับโหลด [30] และจากการตรวจสอบค่าอัตราความลาดชันของขนาดที่จุดเกนครอสโอเวอร์ที่ 0 db จะพบว่าระบบยังคงมีเสถียรภาพที่ดี เนื่องจากอัตราความลาดชันมีค่าต่ำกว่าลบ 20 db/decade และหากย้อนกลับไปพิจารณาในภาพที่ 5.27 จะพบว่าผลการตอบสนองความถี่ของระบบโพลทั้งสองของระบบจะอยู่ที่ความถี่ต่ำมากโดยมีซีโร่อยู่ห่างออกไปทางด้านความถี่สูง ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าซีโร่ของระบบ (Ki/Kp) เป็นตัวกำหนดความถี่หักมุมที่เกิดขึ้นในระบบ ดังนั้นการพิจารณาค่าซีโร่ของระบบสามารถทำได้โดยสมการดังนี้

$$\frac{Ki}{Kp} = \omega_{CU} = 10 \tag{5.18}$$

$$\left|G_c(S)\right|_{\omega_{CR}=50\ rad/\sec} = 1 = \frac{Kp\sqrt{\omega_{CR}^{\ 2} + 10^2}}{J_m \cdot \omega_{CR}^{\ 2}} \tag{5.19}$$

เมื่อแทนค่า ω_{CR} = 50 rad/sec ลงในสมการ (5.19) โดยให้ค่าแมกนิจูดของ $\left|G_c(S)\right| = 1$ เพื่อหาจุดตัดของกราฟที่ผ่านค่า 0 db จะได้ค่า $Kp = 49.03 \cdot J_m$ และ $Ki = 490.3 \cdot J_m$ โดยที่ค่า Kp และ Ki ที่ได้จากการคำนวณนี้จะใช้ค่า J_m ที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ขนาดพิกัด 2 แรงม้า ดังที่แสดงไว้ในภาคผนวก ผลลัพธ์ที่ได้จากการควบคุมแบบพีไอหมายถึงปริมาณแรงบิดที่ใช้ในการควบคุมกระแสทางด้านโรเตอร์ซึ่งค่าของแรงบิดนี้จะถูกจำกัดให้มีค่าไม่เกินค่าพิกัดมอเตอร์ที่ทำการทดสอบ และจากการทดสอบค่าสัดส่วนของ Ki และ Kp นี้ หากค่าดังกล่าวมีค่ามากจะทำให้ผลการตอบสนองต่อ

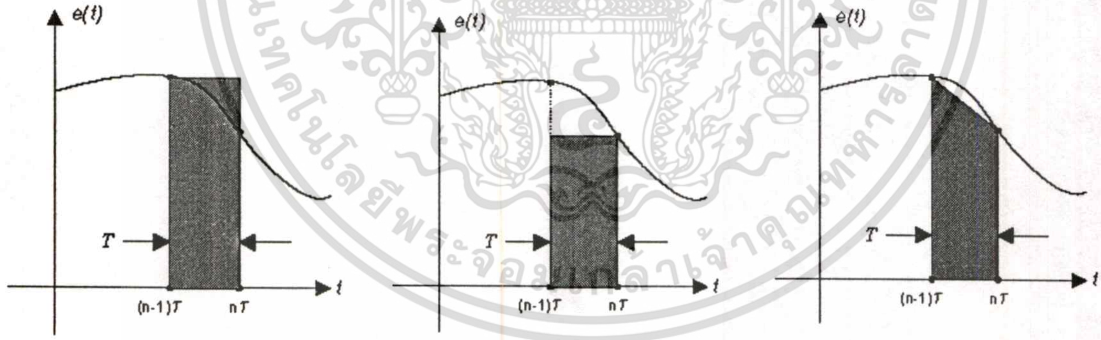
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณยูนิตสเตปมีค่าโอเวอร์ชูตสูง ดังนั้นการแก้ไขการทำงานจริง จะเลือกให้ตำแหน่งของค่าซีโร่อยู่ใกล้จุดออริจิน (Origin) มากที่สุดเพื่อเป็นการลดค่าโอเวอร์ชูตที่จะเกิดขึ้นได้ในระบบ

ในการเขียนโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการตอบสนองแบบพีไอนั้นจะพบว่าค่าทางด้านเอาท์พุตจะประกอบไปด้วยผลรวมของเทอมค่าผิดพลาดคูณกับค่าคงที่ (K_p) บวกด้วยค่าอินทิตเกรตของค่าผิดพลาดเทียบกับเวลาแล้วคูณกับค่าคงที่เกณฑ์ (K_i) ดังสมการ (5.20)

$$u(t) = K_p.e(t) + K_i \int e(t)\,dt \tag{5.20}$$

โดยทั่วไปตัว DSP เองนั้นไม่สามารถกระทำการอินทิเกรตเชิงเส้นเทียบกับเวลาเพื่อหาค่าผลลัพธ์ที่ต้องการได้โดยตรง การทำงานส่วนใหญ่ต้องใช้ระบบดิสกรีตในการทำงานโดยอาศัยวิธีการคำนวณแบบ Trapezoidal Rule หรือ Euler Method ในการคำนวณหาค่า [23, 31] ซึ่งวิธีนี้จะทำให้ DSP หรือไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถทำการประมวลผลที่เกี่ยวกับฟังก์ชั่นต่างๆ ได้ โดยค่าผลลัพธ์ที่ได้นี้จะเป็นค่าที่ได้จากการประมาณ (Approximation) หรืออาจจะเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริงได้ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดจำนวนบิตของหน่วยประมวลผล ซึ่งการประมวลผลของสมการ (5.20) ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วิธีการคำนวณแบบ Trapezoidal ซึ่งจะให้การประมาณค่าใกล้เคียงที่สุดและการคำนวนไม่ได้ซับซ้อนมากจนเกินไปนัก



(ก) Backward Rectangle (ข) Forward Rectangle (ค) Trapezoidal

ภาพที่ 5.29 วิธีการประมาณค่าแบบ Trapezoidal, Forward rectangle และ Backward rectangle

ตารางที่ 5.2 สมการที่ใช้ในการคำนวณกระบวนการควบคุมแบบพีไอจากวิธีการต่างๆ

วิธีการ	สมการ
Backward Rectangle	$u(t) = K_p.e(t) + [K_i.e(t-1)] + i(t-1)$
Forward Rectangle	$u(t) = K_p.e(t) + [K_i.e(t)] + i(t-1)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 (ต่อ) สมการที่ใช้ในการคำนวณกระบวนการควบคุมแบบพีไอจากวิธีการต่างๆ

วิธีการ	สมการ
Trapezoidal	$u(t) = K_p.e(t) + \left[\frac{K_i}{2}.(e(t) + e(t-1)\right] + i(t-1)$
-	$u(t) = K_p.(e(t) - e(t-1)) + K_i.\,e(t) + u(t-1)$

เมื่อ $u(t)$ คือ ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ

$u(t-1)$ คือ ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณก่อนค่าล่าสุด

$e(t)$ คือ ค่าผิดพลาด (Error) ล่าสุดที่ได้จากการลบกันของลูปความเร็ว

$e(t-1)$ คือ ค่าผิดพลาด (Error) ก่อนค่าล่าสุดที่ได้จากการลบกันของลูปความเร็ว

$i(t-1)$ คือ ค่าของเทอมการอินติเกรตก่อนค่าล่าสุด

K_p คือ เกณฑ์ขยายแบบ Proportional

K_i คือ เกณฑ์ขยายแบบ Integral

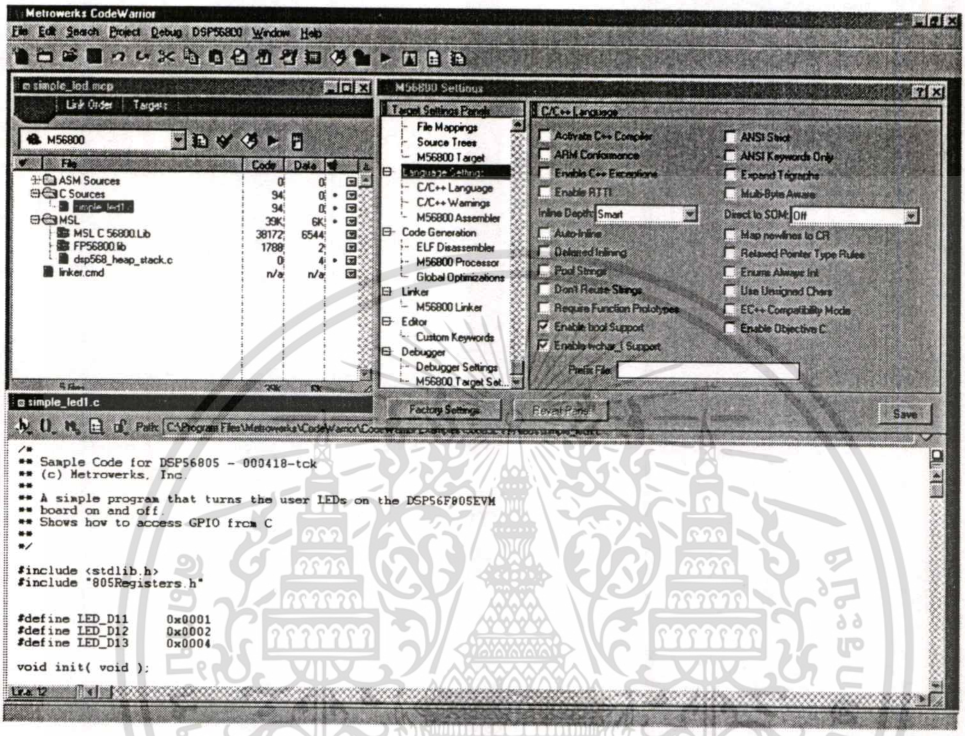
จากตารางที่ 5.2 จะเป็นการแสดงถึงสมการที่ใช้ในการคำนวณหาผลลัพธ์ของกระบวนการควบคุมแบบพีไอ โดยที่เทอมของการอินทิเกรตนั้นจะต้องมีการลิมิตค่าสูงสุดและต่ำสุดในกรณีที่ผลการบวกหรือลบมีค่าสูงหรืออาจจะใช้เทคนิค Anti Windup ในการลดผลการสะสมที่เกิดจากเทอมของการอินทิเกรตก็ได้ ซึ่งขั้นตอนของการเขียนโปรแกรมสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในหัวข้อโครงสร้างทางซอฟต์แวร์

5.10 การออกแบบโครงสร้างทางซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์

จากหัวข้อที่ผ่านมาจะกล่าวถึงการสร้างและประกอบส่วนต่างๆ ทางด้านฮาร์ดแวร์เข้ากับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล ซึ่งส่วนต่างๆ ทางด้านฮาร์ดแวร์นี้จะทำงานได้และทำงานอย่างถูกต้องก็ต่อเมื่อมีการควบคุมที่ดีและมีการตรวจสอบที่ถูกต้อง ซึ่งการควบคุมนี้จะเป็นหัวใจหลักในการทำงานทั้งหมด โดยส่วนใหญ่การควบคุมจะอาศัยการเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงาน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้โปรแกรม Code Wariror ของบริษัท Metro works จำกัด [15,16] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ร่วมกับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DSP) ของบริษัท โมโตโรลา จำกัด ดังที่แสดงในภาพที่ 5.30 โดยที่โปรแกรมนี้สามารถใช้ได้ทั้งภาษาระดับสูง (ภาษาซี) [32,33] และภาษาระดับต่ำ (แอสเซมบลี) ในการเขียนโปรแกรม [34] จึงทำให้ขั้นตอนของการเขียนโปรแกรมนั้นค่อนข้างจะง่าย ซึ่งการเขียนโปรแกรมหากมีความเข้าใจทางด้านฮาร์ดแวร์สูงก็สามารถที่จะระบุตำแหน่งของรีจิตเตอร์หรือแอดแดรสในตัวประมวลตัวได้โดยตรงหรืออาจจะใช้ภาษาระดับสูง (ภาษาซี) ในการเขียนก็ได้ซึ่งจะทำให้การทำงานดังกล่าวเหมือนกัน และในวิทยานิพนธ์นี้ผู้เขียนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความเข้าใจทางด้านฮาร์ดแวร์ค่อนข้างมากจึงทำให้ในส่วนของโปรแกรมที่ใช้จะมีการประสานกันระหว่างภาษาระดับสูงและภาษาระดับต่ำ ซึ่งหากใช้ภาษาระดับสูงอย่างเดียวจะพบว่า หลังจากการแปลง (Compile) โปรแกรมแล้วจะทำให้ขนาดของโปรแกรมที่ได้มีขนาดใหญ่และในบางครั้งช่วงเวลาที่ใช้ในการทำงานจะมีช่วงเวลาการทำงานที่นานกว่าการเขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษาระดับต่ำ

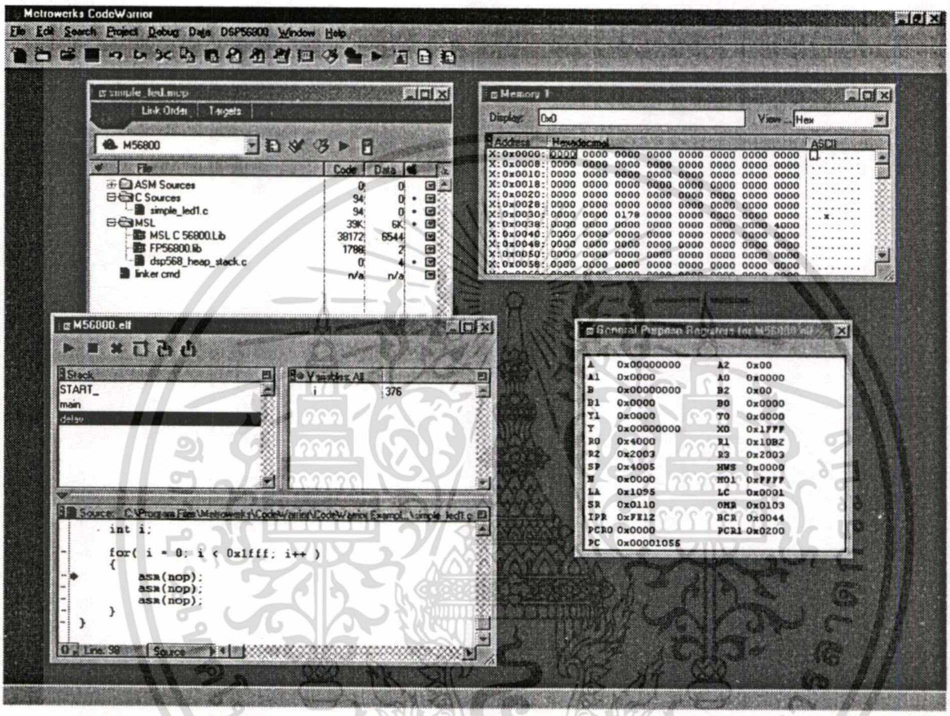


ภาพที่ 5.30 โปรแกรม Code Wariror ของบริษัท Metro works จำกัด

การที่จะทราบว่าโปรแกรมที่เราเขียนนั้นถูกต้องหรือไม่ จำเป็นที่จะต้องมีการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม ซึ่งในโปรแกรม Code Wariror นี้ ได้มีโหมดที่ใช้ในการจำลอง (Simulation) โดยสามารถจำลองหน่วยความจำต่างๆในตัวประมวลตัวสัญญาณดิจิตอลนี้ได้ ซึ่งการทำงานในโหมดนี้ไม่จะเป็นที่จะต้องเชื่อมต่อกับตัวประมวลผล การทำงานสามารถเช็คความถูกต้องได้จากค่าต่างๆในแอดแดรสจำลองของตัวประมวลผลและส่วนที่ดีที่สุดของโปรแกรมนี้ได้แก่การตรวจสอบและหาจุดบกพร่องในการทำงานในขณะที่มีการเชื่อมต่อกับตัวประมวลสัญญาณดิจิตอลได้ โดยสามารถที่จะทำงานทีละบรรทัดหรือทำงานถึงจุดที่ต้องการให้หยุดได้ ซึ่งจุดนี้เองทำให้สามารถตรวจสอบการทำงานของตัวประมวลสัญญาณดิจิตอลที่ใช้ในการควบคุมการขับเคลื่อนนี้ได้ โดยสามารถเช็คได้ว่ามีการทำงานถูกต้องหรือไม่ พร้อมทั้งแสดงสถานะการทำงาน ณ ปัจจุบันว่าอยู่ในกระบวนการส่วนใดของโปรแกรม เช่น โปรแกรมหลัก. โปรแกรมย่อย หรือโปรแกรมการเกิดอินเตอร์รัพต์เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถดูการเปลี่ยนแปลงของแอดแดรส, หน่วยความจำภายใน, ภายนอก, สถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ หรือรีจิตเตอร์ต่างๆ ของตัวประมวลสัญญาณดิจิตอลได้ตลอดที่มีการสั่งหยุด (Pause) โปรแกรม ดังแสดงในภาพที่ 5.31 และในเรื่องของการเขียนโปรแกรมที่ดีและสามารถตรวจสอบการทำงานได้ง่าย จำเป็นที่จะต้องมีการวางโครงสร้างการทำงานของโปรแกรมไว้ ซึ่งโครงสร้างของโปรแกรมที่จะใช้ในการควบคุมการทำงานจะประกอบไปด้วย โครงสร้างของโปรแกรมหลัก(Main Program), โปรแกรมย่อย (Sub Program) และโปรแกรมการเกิดอินเตอร์รัพต์ (Interrupt Program) ซึ่งจะได้อธิบายถึงการทำงานในแต่ละส่วนต่อไป

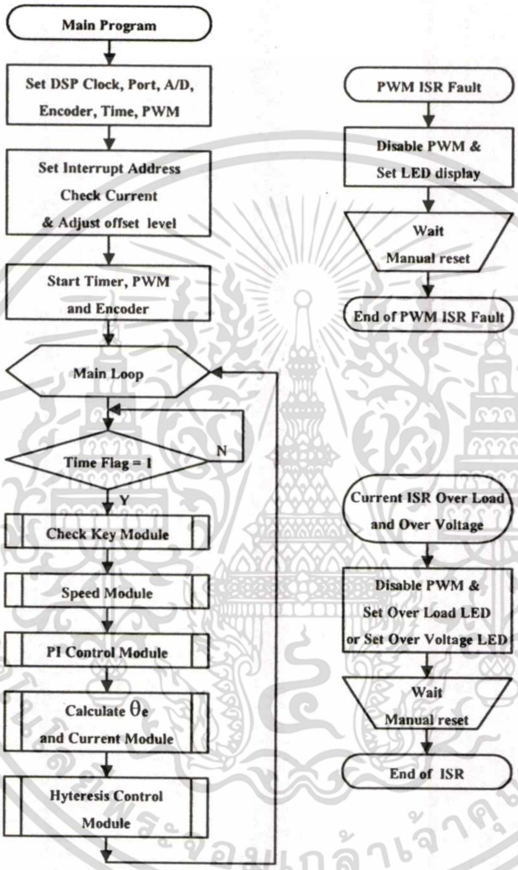


ภาพที่ 5.31 ส่วนของโปรแกรมที่ใช้ในการตรวจสอบและดูค่าสถานะต่างๆ ในตัวประมวล

ภาพที่ 5.32 จะเป็นการแสดงถึงโครงสร้างหลักของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยใช้หลักการควบคุมแบบเฟสเซอร์ ซึ่งในโปรแกรมหลักจะมีการเรียกการทำงานของโปรแกรมย่อยและโปรแกรมการเกิดอินเตอร์รัพต์ การทำงานจะเริ่มจากจุดเริ่มต้นของโปรแกรม (Main Program) เข้าสู่กระบวนการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรและรีจิตเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในโปรแกรมพร้อมกับมีการตรวจสอบความพร้อมของฮาร์ดแวร์ในส่วนต่างๆ และชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ตรวจวัดกระแส (Offset) และเมื่อโปรแกรมจัดเตรียมและตรวจสอบความพร้อมต่างๆ เสร็จสิ้น โปรแกรมจะทำการตรวจสอบค่าตัวแปร (Switch Run/Stop) หากมีการเซต (Run) ก็จะเริ่มทำการคำนวณตามขบวนการของวงรอบการควบคุม ซึ่งวงรอบการควบคุมกระแสและกำเนิดสัญญาณขับนำนี้จะถูกกำหนดโดยตัวจับเวลา (Timer) ทุกๆ 200 ไมโครวินาทีตลอดเวลาการทำงานและทุกๆ 10 มิลลิวินาทีจะมีการรับค่าความเร็วรอบที่ได้จากการตรวจจับจาก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดเอ็นโค็ดเดอร์มาทำการประมวลผลวงรอบลูปปิดของความเร็ว ซึ่งการทำงานทั้งหมดนี้จะต้องมีความสัมพันธ์กัน ขบวนการของวงรอบการควบคุมกระแสและกำเนิดสัญญาณขับนำจะต้องเสร็จสิ้นก่อนการเกิดอินเตอร์รัพต์ทางเวลาในครั้งต่อไปเสมอ ไม่เช่นนั้นคาบเวลาการทำงานของการควบคุมสัญญาณจะมีการยืดออกไป นั้นหมายความถึงค่าฐานเวลาที่ใช้ในการควบคุมทั้งหมดจะมีการคลาดเคลื่อนออกไปอันเป็นผลทำให้การควบคุมที่ได้มีการผิดพลาดและนำไปสู่ความเสียหายได้ในที่สุด



ภาพที่ 5.32 โครงสร้างหลักของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุม

ในระหว่างที่มีการทำงานอยู่นั้นถ้าโปรแกรมถูกอินเตอร์รัพต์ด้วย PWM ISR Fault (กระแสลัดวงจร) หรือ Current ISR Over voltage, Over Load (แรงดันเกิน, กระแสเกิน) โปรแกรมจะหยุดการทำงานของวงจรขับนำสัญญาณอย่างฉับพลับและอยู่ในสภาวะ High Impedance พร้อมทั้งแจ้งผลทาง LED ทันที ซึ่งผลที่ได้นี้จะทำให้ชุดอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวไม่เกิดความเสียหายขึ้น ในส่วนของ PWM ISR Fault นี้จะมีประโยชน์อย่างมากเนื่องจากเป็นขาสัญญาณที่ใช้ในการรับค่าลอจิกการตรวจสอบความผิดพลาดในการทำงานของภาคไฟฟ้ากำลังโดยเฉพาะและจากโครงสร้างหลักในภาพที่ 5.32 จะประกอบโครงสร้างส่วนย่อยดังนี้

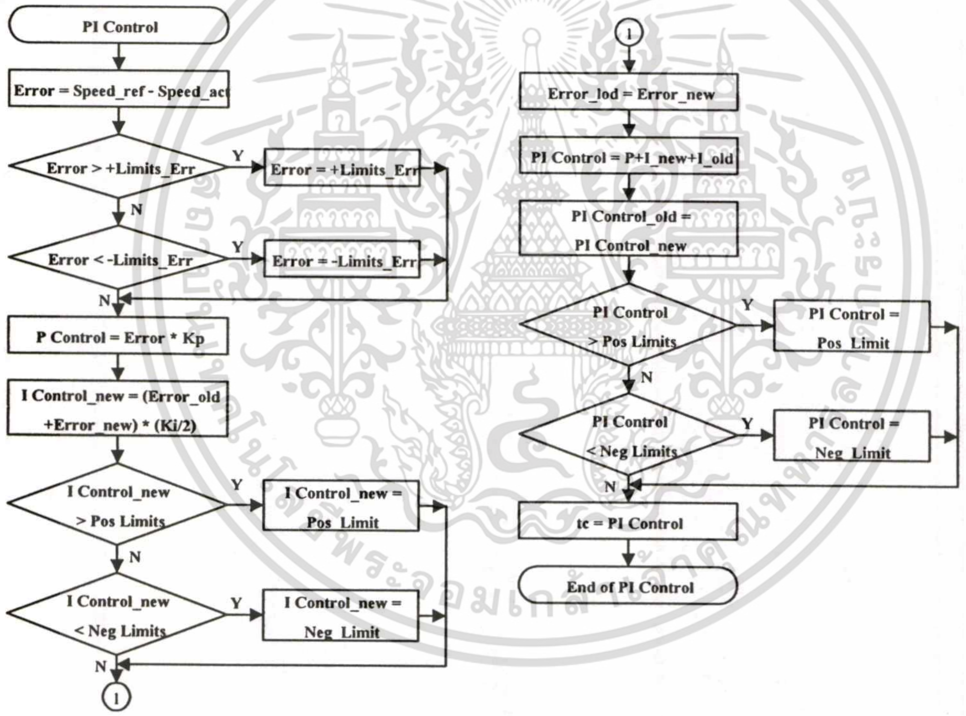
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.10.1 Peripheral hardware and Software initialization

มีหน้าที่หลักคือการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรต่างๆ รวมถึงรีจิตเตอร์ที่จะถูกเรียกใช้ในโปรแกรมเมื่อโปรแกรมเข้าสู่จุดเริ่มต้น นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นหน่วงเวลาเพื่อรอคอยความพร้อมทำงานของฮาร์ดแวร์ส่วนอื่นๆ รวมทั้งการปรับค่าออฟเซตของอุปกรณ์ตรวจจับกระแส

5.10.2 Speed Module

มีหน้าที่ตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ตลอดเวลาที่มอเตอร์มีการหมุน ซึ่งค่าของจำนวนพัลส์เอ็นโค๊ดเดอร์ที่มีการตรวจจับได้จะเป็นค่าความเร็วของโรเตอร์ ณ เวลานั้นๆ การทำงานของโปรแกรมจะมีการอัพเดตค่าความเร็วทุกๆ 10 มิลลิวินาที ดังที่แสดงถึงที่มาไว้ในหัวข้อการออกแบบชุดตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์ ค่าความเร็วที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการควบคุมและแสดงผลต่อไป

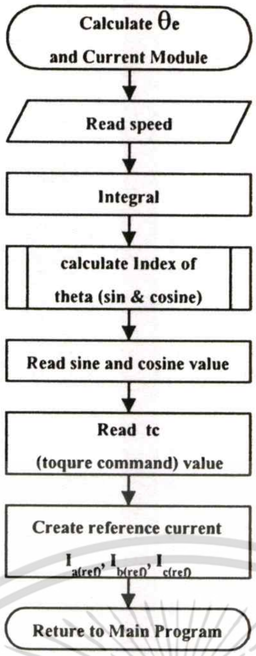


ภาพที่ 5.33 โครงสร้างทางซอฟต์แวร์ของกระบวนการควบคุมแบบพีไอ (PI Control)

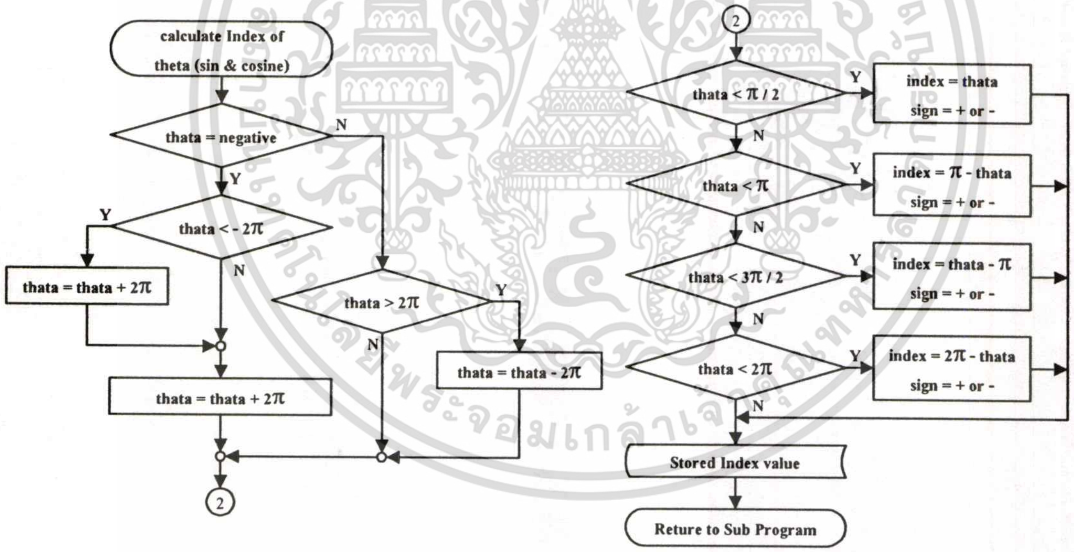
5.10.3 PI Control Module

มีหน้าที่ในการคำนวณหาค่าแรงบิดควบคุม (t_c) ที่ใช้ในการชดเชยและตอบสนองต่อค่าผลต่างของความเร็วรอบของมอเตอร์ในทุกสภาวะ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวในการเขียนโปรแกรมค่อนข้างจะซับซ้อน จากภาพที่ 5.33 จะเห็นได้ว่าจะมีการลิมิตค่าสูงสุดและต่ำสุดที่ใช้ไว้เพื่อเป็นการควบคุมไม่ให้มีการทำงานเกินค่าแรงบิดพิกัดที่ตั้งเอาไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.34 โครงสร้างทางซอฟต์แวร์สำหรับการคำนวณมุมและสร้างกระแสอ้างอิง



ภาพที่ 5.35 โครงสร้างทางซอฟต์แวร์สำหรับตรวจเช็คค่าของมุม (Forward หรือ Reverse) และกำหนดตัวชี้ตำแหน่งมุม (เก็บค่ามุมเพียง 90 องศา)

5.10.4 Calculate θe and Current Module

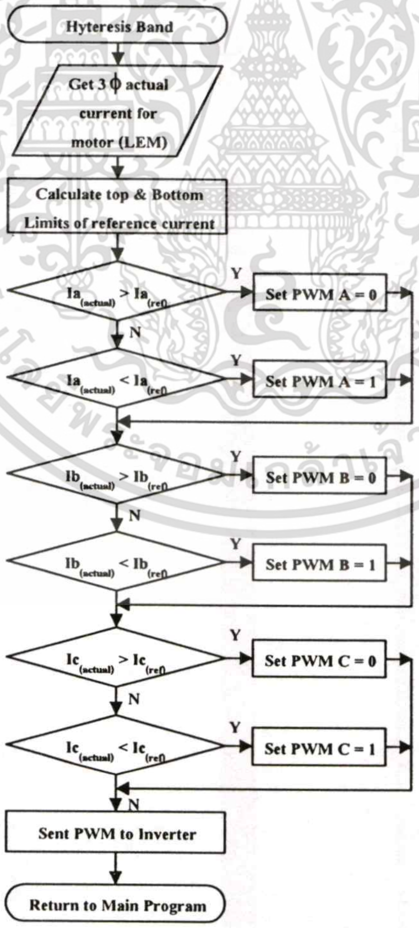
มีหน้าที่ในการคำนวณหาค่าของมุมที่ใช้ในการสร้างสัญญาณกระแสไซน์อ้างอิง ซึ่งค่าของมุมนี้จะได้มาจากการอินทิเกรตค่าของความเร็วรอบ จากนั้นจะนำมาคำนวณเป็นค่าของตำแหน่ง (Index) ที่ใช้เก็บค่ามุมต่างๆ ของค่าไซน์และโคไซน์ไว้ ส่วนค่าแรงบิดคำสั่งที่ได้จากกระบวนการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบพีไอจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าขนาดของรูปคลื่นโคไซน์ (กระแสที่โรเตอร์) และใช้ในการสร้างความถี่ (เฟส) เพื่อที่จะใช้ในการสร้างสัญญาณกระแสไซน์อ้างอิงจำนวน 3 เฟส ต่อไป ดังภาพที่ 5.34 แสดงโครงสร้างทางซอฟต์แวร์สำหรับการคำนวณมุมและสร้างกระแสไซน์อ้างอิง ส่วนในภาพที่ 5.35 จะแสดงถึงโครงสร้างทางซอฟต์แวร์สำหรับตรวจเช็คค่าของมุม (Forward หรือ Reverse)

5.10.5 Hyteresis Control Module

มีหน้าที่ในการสร้างสัญญาณขับนำที่ใช้ในการขับนำสวิตซ์กำลังของชุดอินเวอร์เตอร์ ซึ่งค่าของกระแสไซน์อ้างอิงที่ใช้จะได้มาจากกระบวนการ Calculate θe and Current Module แล้วนำมาบวกค่าแบนด์ (Top & Bottom Limit) จากนั้นจะมีการอ่านค่ากระแสใช้งานจริงของมอเตอร์มาเปรียบเทียบกับค่ากระแสไซน์อ้างอิง ซึ่งการเปรียบเทียบนี้จะต้องมีเปรียบเทียบทั้ง 3 เฟส และเมื่อมีการเปรียบเทียบครบทั้ง 3 เฟสแล้วจะมีการส่งพัลส์ PWM ไปสู่ชุดอินเวอร์เตอร์พร้อมกัน ดังแสดงโครงสร้างทางซอฟต์แวร์ไว้ในภาพที่ 5.36



ภาพที่ 5.36 โครงสร้างทางซอฟต์แวร์สำหรับการขับนำสวิตซ์โดยใช้หลักการฮีสเตอร์รีสซีสแบนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.10.6 Check Switch Module

มีหน้าที่ในการตรวจสอบสถานะของสวิตซ์ (เปิด/ ปิด) หรือเช็คค่าความเร็วรอบที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์จากเป้นคำสั่ง ซึ่งการทำงานจะอาศัยวงรอบการทำงานเดียวกับการรับค่าเอ็นโค๊ดเดอร์ในการรับค่าคำสั่ง และในกรณีที่มีการสั่งหยุดมอเตอร์เพื่อเริ่มขับเคลื่อนใหม่จะต้องมีการรีเซตค่าที่อยู่ในรีจิตเตอร์ทั้งหมดใหม่ โดยการโหลดค่าเริ่มต้นลงในรีจิตเตอร์หรือหน่วยความจำนั้นๆ ใหม่อีกครั้ง

5.11 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบที่ใช้ในงานควบคุมการทำงานของมอเตอร์โดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลในการควบคุมการทำงาน เครื่องต้นแบบที่ได้รับการออกแบบในงานวิจัยนี้ค่อนข้างจะสมบูรณ์เนื่องจากมีการทำงานในส่วนของการควบคุมและป้องกันที่ดี ไม่ว่าจะเป็นในเรื่องของแรงดันเกินและกระแสเกินหรือแม้แต่การลัดวงจรภายในกิ่งของตัวสวิตซ์กำลังเอง ประกอบกับมีการวางโครงสร้างการทำงานที่มีหลักแผน ส่งผลให้กระบวนการทำงานมีความยืดหยุ่นสูงและมีความถูกต้องมากขึ้น ซึ่งข้อมูลการออกแบบในส่วนต่างๆ นี้ได้ถูกนำไปสร้างและทดสอบการทำงานจริง เพื่อใช้เป็นข้อมูลยืนยันได้ว่าระบบที่ได้รับการออกแบบนี้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

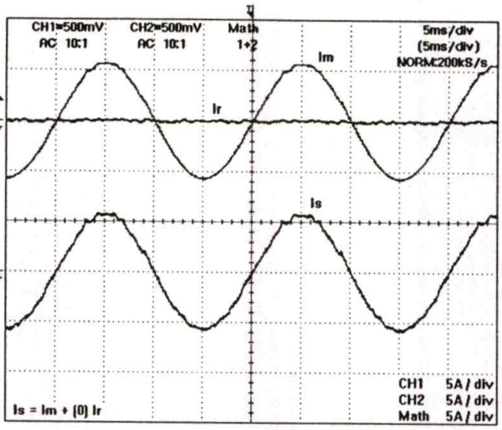
ผลการทดลอง

ในบทนี้จะเป็นการนำเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นมาทำการทดสอบด้วยเงื่อนไขการทำงานต่างๆ เช่น ที่สภาวะคงตัวที่ความเร็วต่างๆ ของมอเตอร์ การกลับทิศความเร็วของมอเตอร์ การใส่โหลดแบบขั้น (สเตปโหลด) เพื่อดูผลการตอบสนองของระบบทั้งในสภาวะอยู่ตัวและสภาวะทรานเซี้ยน สำหรับโหลดที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นโหลดตุ้มน้ำหนักขนาด 0 – 18 กิโลกรัม หรือประมาณ 0 – 9.6 นิวตัน-เมตร นอกจากการทดสอบการทำงานที่สภาวะต่างๆ แล้ว ในวิทยานิพนธ์นี้ยังได้มีการนำเสนอผลการทดสอบรูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่ได้จากหลักการควบคุมแบบเฟสเซอร์ซึ่งใช้หลักการควบคุมกระแส (Voltage Source Current Control) เทียบกับหลักการควบคุมแรงดัน (Voltage Source Voltage Control) ซึ่งในที่นี้จะเปรียบเทียบกับหลักการที่ได้จากการควบคุมแบบ SPWM โดยที่งานวิจัยนี้จะแบ่งการวัดและทดสอบออกเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังนี้

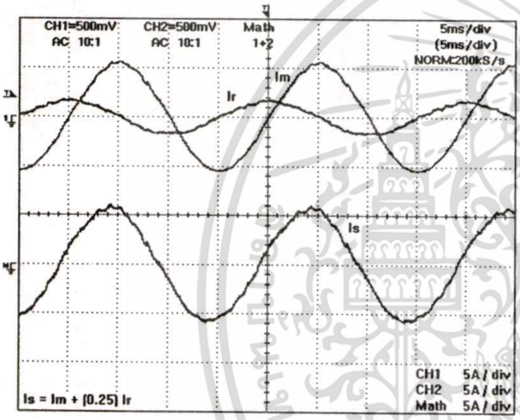
6.1 การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบแพทเทอร์นของกระแสไซน์อ้างอิง

เป็นการทดสอบโดยการวัดรูปคลื่นกระแสไซน์อ้างอิงที่ได้จากการประมวลผลภายในตัว DSP56F805 แล้วส่งข้อมูลดังกล่าวผ่านไอซีเบอร์ MAX5251 ซึ่งเป็นไอซีแปลงสัญญาณดิจิตอลไปเป็นแอนะล็อกโดยส่งทางพอร์ต Serial Peripheral Interface เพื่อแสดงผลทางเครื่องวัดรูปคลื่นทางไฟฟ้า (Digital Oscilloscope) เพื่อเปรียบเทียบกับรูปคลื่นกระแสจริงที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ได้จากหลักการควบคุมแบบเฟสเซอร์ อีกทั้งยังได้แสดงถึงสัญญาณขับนำสวิตซ์กำลังที่ได้จากการเปรียบเทียบของกระแสไซน์อ้างอิงกับกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ รวมถึงการแสดงเส้นทางเดินของกระแส (Tracking) ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ โดยการแปลงแกนจากระบบ 3 แกน (i_a, i_b, i_c) ไปยังระบบ 2 แกน (i_β, i_α) และทำการแสดงผลลัพธ์ที่ได้ในโหมด X-Y ของเครื่องวัดรูปคลื่นทางไฟฟ้า จากภาพที่ 6.1 (ก) ถึง (ฌ) จะเป็นการแสดงรูปคลื่นสัญญาณไซน์อ้างอิงเฟส A ที่ได้จากการประมวลผลภายใน DSP รูปคลื่นสัญญาณไซน์อ้างอิงที่ได้มานี้จะได้มาจากค่าของกระแสแมกนิไตซิ้งที่พิกัดและค่าของกระแสที่โรเตอร์ที่ค่าคำสั่งแรงบิดควบคุม (t_c) ต่างๆ ดังที่ได้อธิบายหลักการทำงานไว้ในบทที่ 4 จากภาพจะเห็นได้ว่าค่าของแรงบิดควบคุมจะเป็นตัวควบคุมค่าแอมปิจูดของกระแสที่โรเตอร์ ซึ่งค่าดังกล่าวจะทำให้ค่าภายในรูปคลื่นสัญญาณไซน์อ้างอิงที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง รูปคลื่นที่นำมาแสดงนี้จะเป็นการแสดงที่ค่าแรงบิดควบคุมเท่ากับ 0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 เปอร์ยูนิต ทั้งในกรณีที่คำสั่งแรงบิดควบคุมเป็นบวกและลบ

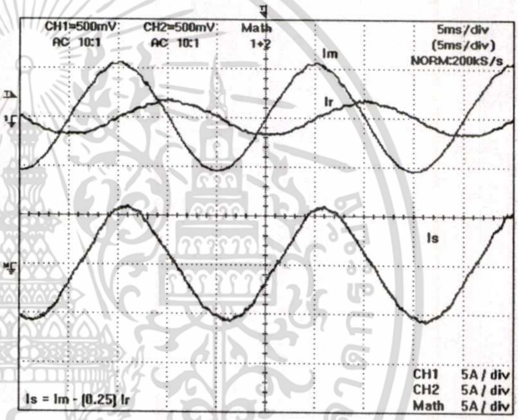
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



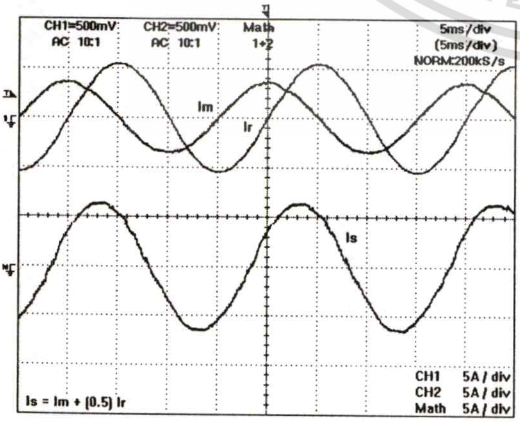
(ก) ที่แรงบิดควบคุมเท่ากับ 0 เปอร์ยูนิต



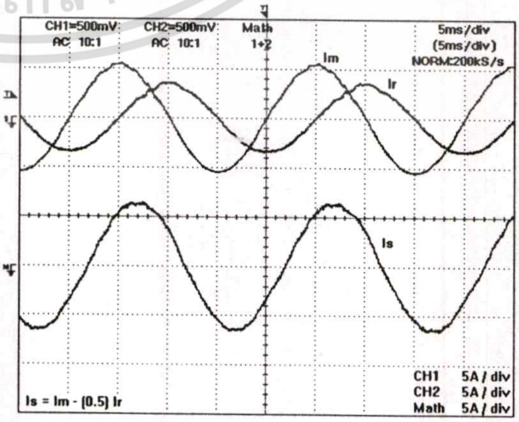
(ข) ที่แรงบิดควบคุมเท่ากับ 0.25 เปอร์ยูนิต



(ค) ที่แรงบิดควบคุมเท่ากับ -0.25 เปอร์ยูนิต

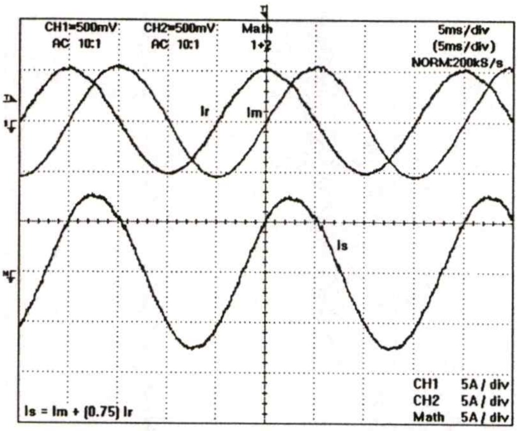


(ง) ที่แรงบิดควบคุมเท่ากับ 0.5 เปอร์ยูนิต

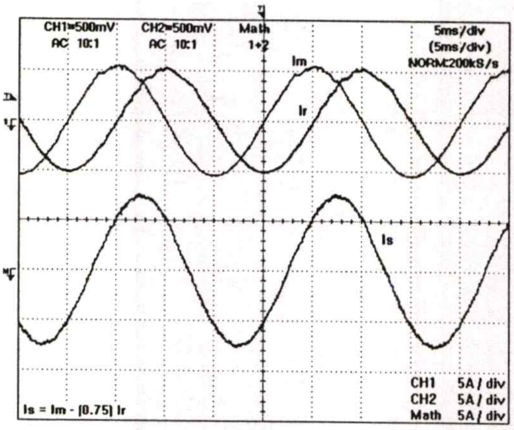


(จ) ที่แรงบิดควบคุมเท่ากับ -0.5 เปอร์ยูนิต

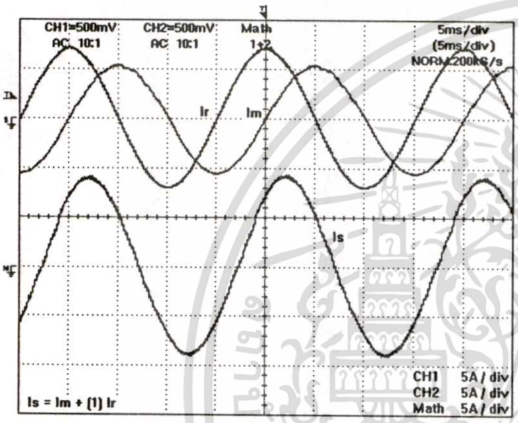
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



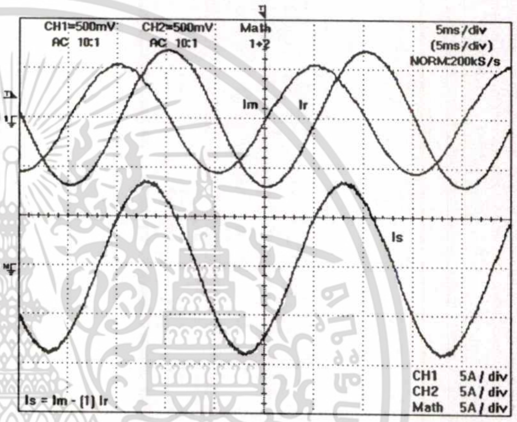
(ฉ) ที่แรงบิดควบคุมเท่ากับ 0.75 เปอร์ยูนิต



(ช) ที่แรงบิดควบคุมเท่ากับ -0.75 เปอร์ยูนิต

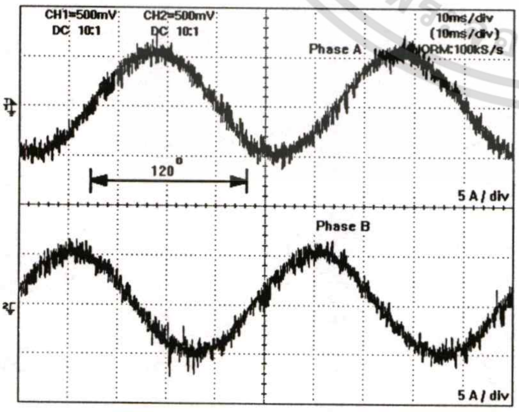


(ซ) ที่แรงบิดควบคุมเท่ากับ 1 เปอร์ยูนิต

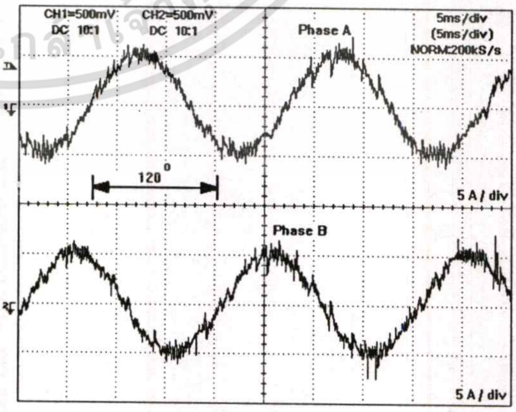


(ฌ) ที่แรงบิดควบคุมเท่ากับ -1 เปอร์ยูนิต

ภาพที่ 6.1 รูปคลื่นแสดงพฤติกรรมกระแสไซน์อ้างอิงที่ได้จากการประมวลผลภายในตัว DSP



(ก) ที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์

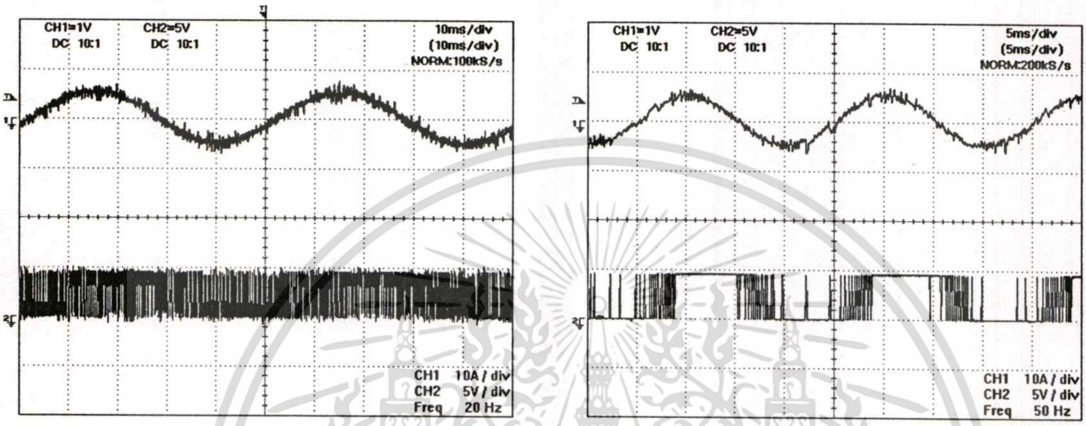


(ข) ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์

ภาพที่ 6.2 รูปคลื่นกระแสเฟส A และเฟส B ที่ได้จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะไร้ภาระ

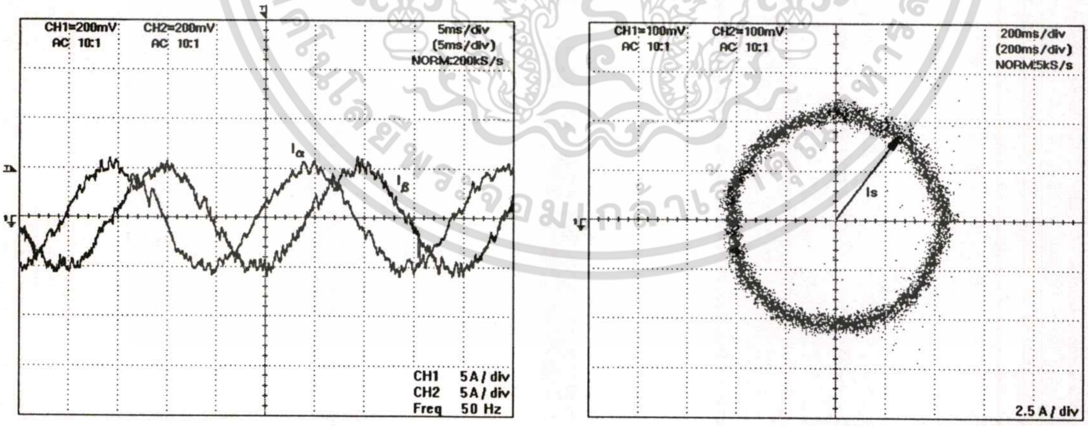
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 6.2 จะแสดงถึงรูปคลื่นกระแสเฟส A และเฟส B ที่ได้จากหลักการควบคุมแบบเฟสเซอร์ จะเห็นได้ว่ากระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีการทำงานตามกระแสไซน์อ้างอิงที่ได้จากการประมวลผล โดย DSP โดยมีการทำงานอยู่ในแบนด์ที่กำหนดและในภาพที่ 6.3 จะเป็นแสดงถึงรูปคลื่นกระแส เฟส A และสัญญาณขับนำสวิตซ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างกระแสไซน์อ้างอิงกับกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งการเปรียบเทียบดังกล่าวจะกระทำภายในตัวประมวลสัญญาณทางดิจิตอลแล้ว ส่งเอาท์พุตที่ได้ออกมาทางขาสัญญาณพีดับบิวเอ็มของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล



(ก) ที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ (ข) ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์

ภาพที่ 6.3 รูปคลื่นกระแสเฟส A และสัญญาณขับนำสวิตซ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบ



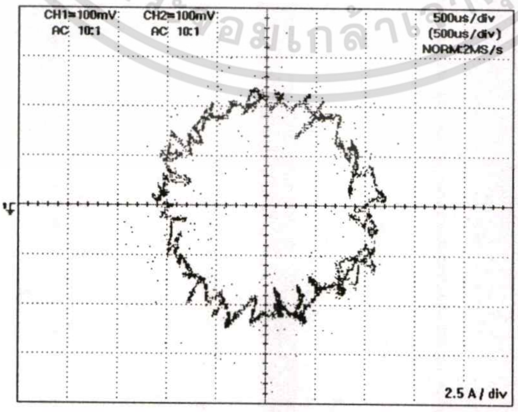
(ก) กระแส i_β, i_α ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ (ข) กระแส i_β, i_α ในโหมด X-Y

ภาพที่ 6.4 รูปคลื่นกระแสที่ได้จากการแปลงจาก 3 แกน (i_a, i_b, i_c) ไปเป็น 2 แกน (i_β, i_α)

จากภาพที่ 6.4 (ก) จะเป็นแสดงถึงรูปคลื่นกระแสที่ได้จากการแปลงจาก 3 แกน (i_a, i_b, i_c) ไปเป็น 2 แกน (i_β, i_α) เพื่อตรวจสอบดูว่าการทำงานของกระแสทั้งสามเฟสว่ามีขนาดแอมปิจูดของแต่ละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟสเท่ากันหรือไม่ ถ้าหากค่าของกระแสทั้ง 3 เฟสดังกล่าวมีขนาดไม่เท่ากันและมีมุมเฟสที่ห่างกันไม่เท่ากับ 120 องศา จะทำให้รูปคลื่นของกระแสอัลฟ่าและกระแสเบต้ามีขนาดไม่เท่ากัน หลังจากการแปลงให้อยู่ในรูปแบบ 2 แกนแล้วค่ากระแสอัลฟ่าและกระแสเบต้าจะต้องมีค่าขนาดแอมป์จูดเท่ากันกับค่าแอมป์จูดของกระแสเฟส A, B และ C และมีมุมเฟสระหว่างกระแสอัลฟ่าและกระแสเบต้าห่างกัน 90 องศา ซึ่งรูปคลื่นของกระแสอัลฟ่าและกระแสเบต้าที่นำเสนอนี้จะได้จากการประมวลผลภายใน DSP56F805 แล้วส่งค่าออกมาทาง D/A เพื่อแสดงผลทางเครื่องวัดรูปคลื่นทางไฟฟ้า โดยแสดงผลในโหมด X-Y ซึ่งจะทำให้ได้รูปคลื่นที่เป็นลักษณะวงกลมที่มีค่าขนาดเท่ากับค่าของกระแสอัลฟ่าและกระแสเบต้า รูปคลื่นที่แสดงถึงนี้จะมีความหมายในตัวเอง เช่น หากรูปที่ได้มีลักษณะวงกลมนั้นหมายถึงเส้นทางเดินของกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ค่อนข้างเรียบอันเป็นการบ่งบอกถึงค่าแรงบิดที่ได้จากเพลาของมอเตอร์ด้วย [35] แต่ถ้าหากรูปที่ได้มีลักษณะเป็นรูป 6 เหลี่ยมนั้นหมายถึงกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์นี้มีผลกระทบของฮาร์โมนิกส์อันดับต่ำอยู่ เป็นต้น จากภาพที่ 6.4 (ก) หากนำมาแสดงผลในโหมด X-Y จะได้ผลลัพธ์ดังภาพที่ 6.4 (ข) ซึ่งขนาดแอมป์จูดของวงกลมจะมีค่าเท่ากับค่าแอมป์จูดของกระแสอัลฟ่าและกระแสเบต้า ส่วนความกลมจะบอกถึงค่ากระแสอัลฟ่าและกระแสเบต้าที่ได้จากการแปลงแกนมานั้นมีขนาดที่เท่ากันและมีมุมห่างกัน 90 องศา และความหนาของวงกลมที่สามารถสังเกตได้จากภาพที่ 6.4 (ข) จะแสดงถึงเส้นทางเดินของกระแส (Tracking) ในแบนด์ที่ได้ทำการควบคุมไว้ หากค่าแบนด์ที่ได้มีค่าเล็กมากเท่าใดนั้นหมายถึงแรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเรียบมากเท่านั้น และจากภาพที่ 6.5 จะเป็นการแสดงถึงเส้นทางเดินของกระแสที่มีลักษณะเป็นแทร็กวิ่งชนแบนด์บน (Top Limit) และแบนด์ล่าง (Bottom Limit) โดยจะวิ่งเป็นวงกลมไปเรื่อยๆ หากมีการวิ่งครบ 1 วงรอบนั้นหมายถึงรูปคลื่นของกระแสอัลฟ่าและกระแสเบต้านี้ได้มีการวิ่งครบ 360 องศาทางไฟฟ้าแล้ว

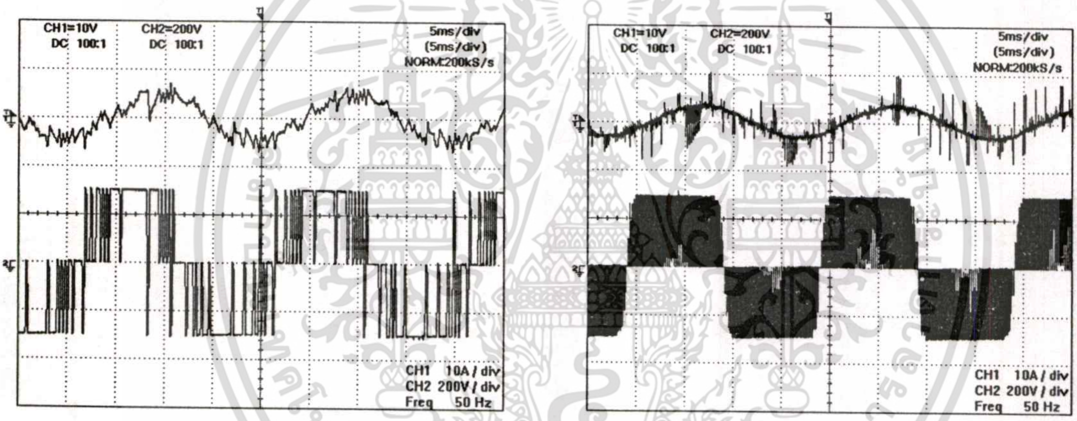


ภาพที่ 6.5 เส้นทางเดินของแทร็กกระแสที่ได้จากการแปลงค่ากระแสจากระบบ 3 แกนมา 2 แกน

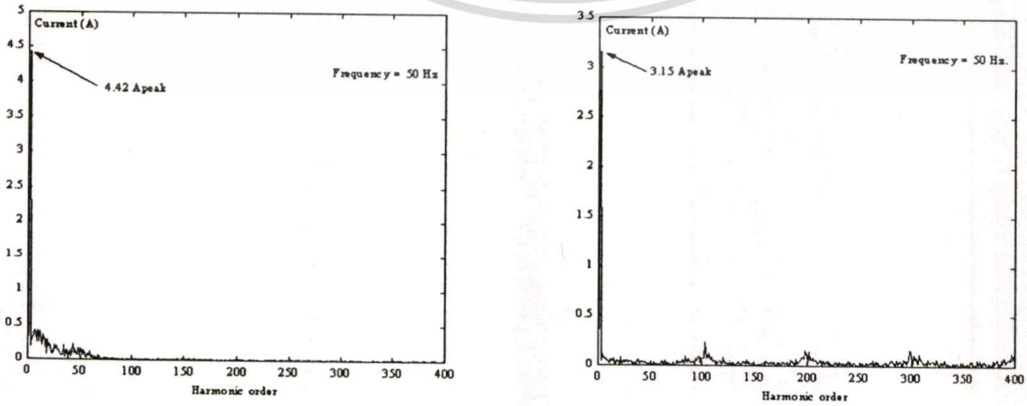
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 การทดสอบวัดรูปคลื่นจากหลักการควบคุมกระแสเทียบกับแบบควบคุมแรงดัน

ในหัวข้อนี้จะเป็นการวัดรูปคลื่นที่ได้จากหลักการควบคุมกระแส (Voltage Source Current Control) ซึ่งถูกเลือกใช้ในโครงงานวิจัยนี้กับหลักการควบคุมแบบแรงดัน (Voltage Source Voltage Control) ซึ่งในที่นี้จะใช้หลักการควบคุมแบบ SPWM สำหรับการเปรียบเทียบ โดยกำหนดค่าความถี่สวิตชิ่งใช้งานเท่ากับ 5 กิโลเฮิรตซ์ จากภาพที่ 6.6 ถึง 6.13 จะเป็นการแสดงถึงลักษณะของแรงดันทางด้านอินพุตของมอเตอร์, กระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์, แรงดันและกระแสที่ดีซีบัสและในเอซีไลน์ พร้อมภาพการแตกค่าสเปคตราฮาร์โมนิกส์เพื่อหาค่าแรงดันและกระแสมูลฐาน (Fundamental) การแสดงผลจากภาพที่ 6.6 ถึง 6.13 จะมีการนำเสนอการเปรียบเทียบเป็นส่วนๆ โดยภาพทางด้านซ้ายมือจะเป็นรูปคลื่นและค่าสเปคตราฮาร์โมนิกส์ที่ได้จากหลักการควบคุมกระแส (Current Control) ส่วนภาพทางด้านขวามือจะเป็นรูปคลื่นและค่าสเปคตราฮาร์โมนิกส์ที่ได้จากหลักการควบคุมแบบแรงดัน (Voltage Control)



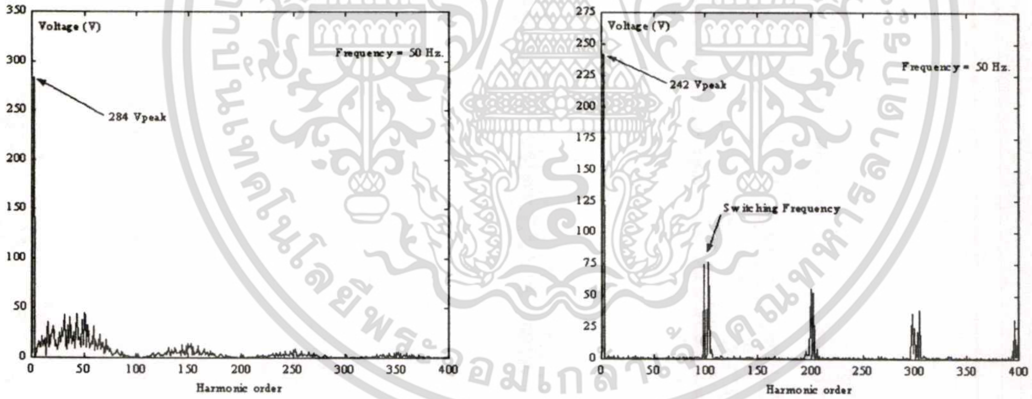
ภาพที่ 6.6 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ



ภาพที่ 6.7 สเปคตราฮาร์โมนิกส์ของกระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

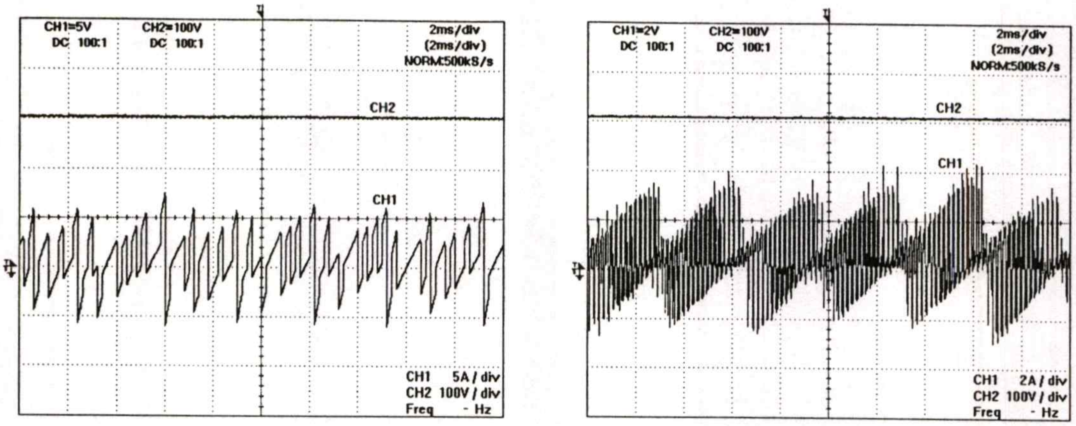
จากภาพที่ 6.6 จะเป็นการแสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ได้จากหลักการควบคุมกระแส (ซ้าย) และ SPWM (ขวา) โดยจะเห็นได้ว่าค่าแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ที่ได้จากหลักการควบคุมกระแสเทียบกับค่าแรงดันที่ได้จากการควบคุมแบบแรงดัน (SPWM) จะมีความแตกต่างกันอยู่อันเนื่องมาจากการควบคุม ซึ่งหลักการควบคุมกระแสจะอาศัยการควบคุมกระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์ในการขับเคลื่อน ค่าความถี่สวิตชิ่งจะมีค่าไม่คงที่ แต่สามารถกำหนดค่าความถี่สวิตชิ่งสูงสุดและต่ำสุดได้โดยกำหนดค่าแบนด์ [20] ส่วนหลักการควบคุมแบบแรงดัน (SPWM) จะอาศัยการควบคุมค่าของแรงดันควบคุม ($V_{control}$) ค่าความถี่สวิตซ์ที่ได้จะมีค่าเท่ากับค่าความถี่สวิตชิ่งที่กำหนดไว้ในตอนออกแบบ และในภาพที่ 6.7 จะเป็นการแสดงถึงสเปคตราฮาร์โมนิกส์ของกระแสที่ได้จากหลักการควบคุมทั้งสอง จากภาพจะสังเกตได้อีกว่าในกรณีที่การควบคุมแบบมีขอบเขต (แบนด์) หากมีการกำหนดขนาดของแบนด์ที่กว้างเกินไปจะส่งผลทำให้ค่าของแรงบิดที่ได้มีการกระเพื่อมได้ [36] ดังดูได้ในสเปคตราฮาร์โมนิกส์ของกระแสที่ได้จากการควบคุมกระแส ส่วนในภาพที่ 6.8 จะเป็นแสดงถึงสเปคตราฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน จากภาพจะสังเกตได้ว่าค่าความถี่การสวิตซ์จะมีค่าคงที่อยู่ที่ 5 กิโลเฮิรตซ์ ในขณะที่ความถี่สวิตชิ่งที่ได้จากหลักการควบคุมแบบกระแส (Current Control) จะมีค่ากระจายอยู่ในช่วงตั้งแต่แรงดันมูลฐานจนถึง 5 กิโลเฮิรตซ์



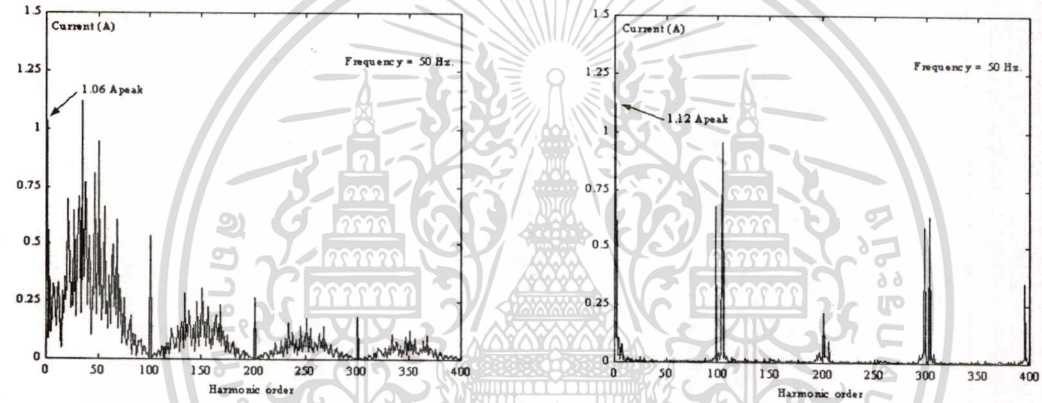
ภาพที่ 6.8 สเปคตราฮาร์โมนิกส์ของแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากภาพที่ 6.9 และ 6.10 จะแสดงถึงรูปคลื่นและสเปคตราฮาร์โมนิกส์ของกระแสที่ดีซีบัส หากสังเกตสเปคตราฮาร์โมนิกส์ของกระแสในดีซีบัสจะพบว่าการควบคุมแบบแรงดัน (SPWM) นี้สามารถที่จะออกแบบตัวกรอง (Noise Filter) กระแสหรืออุปกรณ์ปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ได้ง่ายกว่าหลักการควบคุมกระแส (Current Control) เนื่องจากค่าความถี่สวิตชิ่งมีการเกาะกลุ่มกันอยู่ทำให้การออกแบบวงจรดังกล่าวทำได้ง่าย

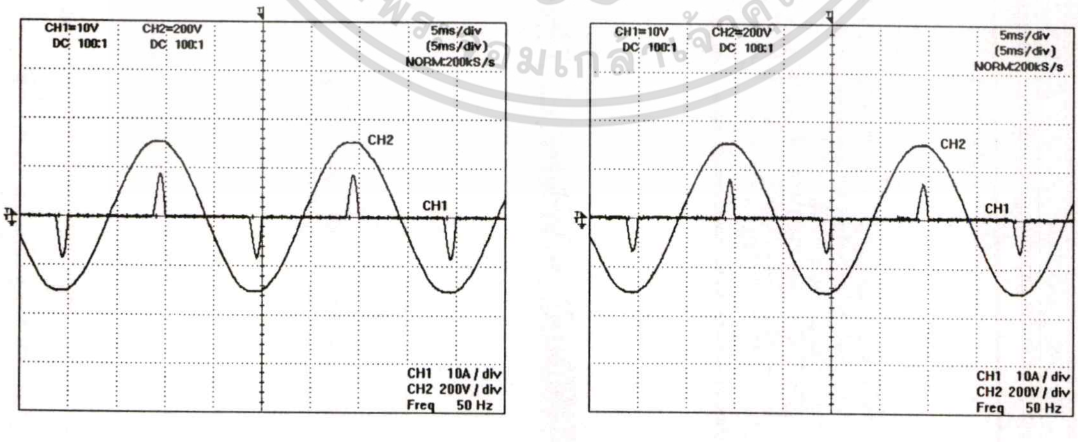
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.9 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ดีซีบัส



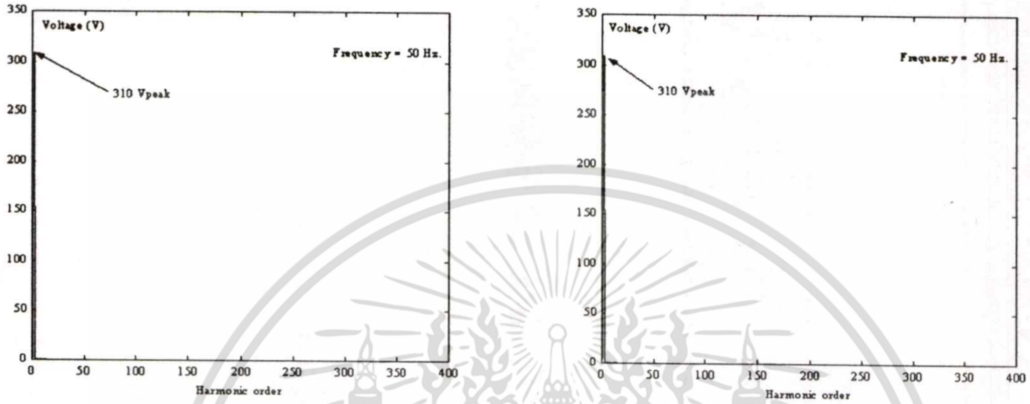
ภาพที่ 6.10 สเปคตราฮาร์โมนิกส์ของกระแสที่ดีซีบัส



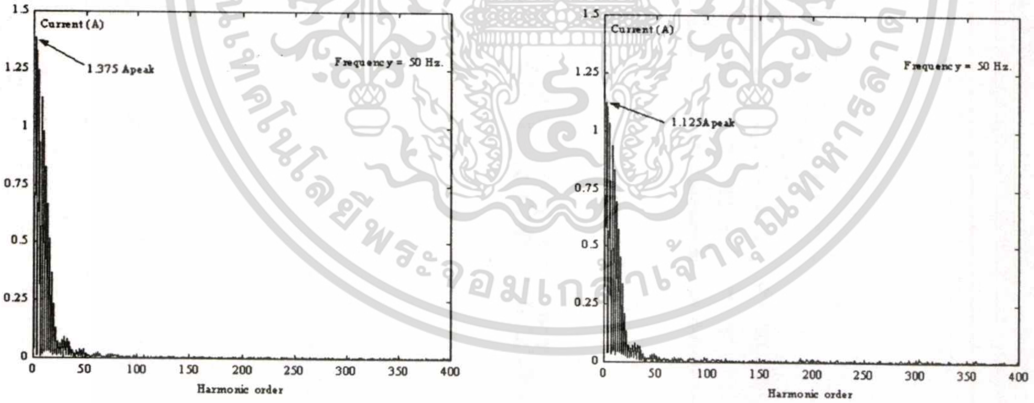
ภาพที่ 6.11 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ป้อนเข้าวงจรทางด้านเอซีไลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 6.11 ถึง 6.13 จะเป็นการแสดงถึงรูปคลื่นและสเปคตราฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสที่เอซีไลน์ จะสังเกตได้ว่าค่าแรงดันที่เอซีไลน์จะไม่มีผลของฮาร์โมนิกส์อยู่เลย แต่ที่กระแสในไลน์เอซีนี้เองจะมีค่าฮาร์โมนิกส์ของกระแสอันดับต่ำอยู่และมีขนาดค่อนข้างสูงด้วยกันทั้งสองหลักการควบคุม เนื่องจากการควบคุมการทำงานนี้ไม่ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ร่วมอยู่ในวงจร



ภาพที่ 6.12 สเปคตราฮาร์โมนิกส์ของแรงดันที่ป้อนเข้าวงจรทางด้านเอซีไลน์



ภาพที่ 6.13 สเปคตราฮาร์โมนิกส์ของกระแสที่ป้อนเข้าวงจรทางด้านเอซีไลน์

จากการทดสอบในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างที่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้หลักการควบคุมกระแสกับหลักการควบคุมแรงดัน ซึ่งหากสังเกตจะเห็นได้ว่าการทำงานค่อนข้างจะใกล้เคียงกันหากเพียงแต่ความถี่ที่เกิดจากการสวิตซ์ที่ได้จากหลักการควบคุมกระแสนี้จะขึ้นอยู่กับแบนด์ที่ตั้งไว้ หากแบนด์มีค่าสูงจะทำให้ความถี่สวิตชิ่งมีค่าต่ำอาจจะส่งผลทำให้มีฮาร์โมนิกส์อันดับต่ำแต่ถ้าแบนด์มีค่าน้อยจะทำให้ความถี่สวิตชิ่งมีค่าสูงซึ่งอาจเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์สวิตซ์

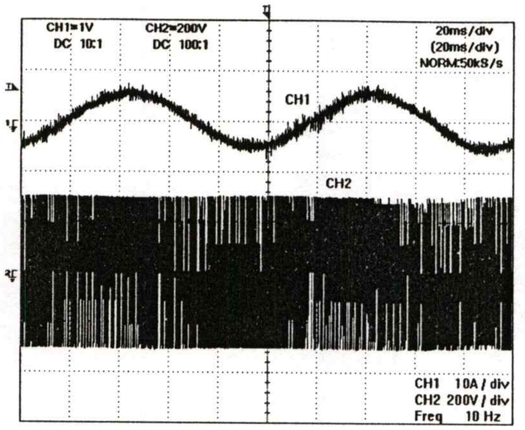
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังได้ และจากที่ได้กล่าวถึงในภาพที่ 6.7 ค่ากระแสที่ได้จากหลักการควบคุมกระแสจะมีผลกระทบของฮาร์โมนิกส์อันดับต่ำร่วมอยู่ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากค่าแบนด์ที่กำหนดมีค่ามากเกินไป การแก้ไขสามารถทำได้โดยการปรับแบนด์ให้มีค่าน้อย (แคบ) ลง แต่ในทางปฏิบัติแล้ววงรอบการทำงานของ DSP จะต้องมีการคอยวงรอบการทำงานทุกๆ 200 ไมโครวินาทีจึงจะเกิดการเปรียบเทียบระหว่างกระแสไซน์อ้างอิงกับกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งในบางช่วงเวลาของ 200 ไมโครวินาที อาจจะทำให้กระแสใช้งานมีค่าเกินแบนด์ (Limits) ออกไปได้ การแก้ปัญหาในจุดนี้สามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนครั้งในการเปรียบเทียบ (Compare) ให้มีค่ามากขึ้นในช่วงเวลาการรอคอยภายในวงรอบการทำงานของคำสั่ง (200 ไมโครวินาที) ซึ่งจะทำให้การควบคุมแบนด์เป็นไปยังมีประสิทธิภาพในลักษณะการทำงานเชิงดิจิตอล

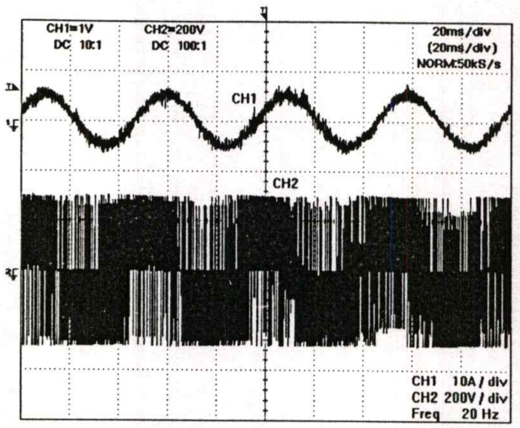
6.3 การทดสอบสภาวะคงตัวของการควบคุมแบบเฟสเซอร์

เป็นการทดสอบระบบควบคุมกระแสและอัตราขยายป้อนกลับ ณ ความเร็วมอเตอร์ 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2100 รอบต่อนาที ในขณะไม่มีภาระโดยมีค่าพีคของกระแสไซน์อ้างอิงเท่ากับ 5.38 แอมแปร์ ซึ่งการทดสอบนี้ต้องการนำเสนอถึงค่าของแรงดันที่เกิดขึ้นจากการควบคุมการทำงานของกระแสไซน์อ้างอิง โดยทำการแตกค่าสเปคตราฮาร์โมนิกส์ของกระแสและแรงดันเพื่อดูค่าของกระแสและแรงดันมูลฐาน อีกทั้งยังเป็นการดูถึงพฤติกรรมของกระแสที่ได้จากการควบคุมที่ความถี่สูงกว่าพิกัดมอเตอร์ จากภาพที่ 6.14 ถึง 6.17 จะพบว่าในกรณีที่ใช้ค่ากระแสไซน์อ้างอิงที่ค่า 5.38 แอมแปร์ ในสภาวะไร้ภาระโหลดแต่มีการทำงานที่คนละความถี่นั้น ค่าของแรงดันมูลฐานที่ได้จะมีขนาดที่ไม่เท่ากัน เนื่องมาจากจากผลของอินดักแตนซ์ที่ใช้ในการสร้างฟลักซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ซึ่งค่าของอินดักแตนซ์ที่เปลี่ยนแปลงนี้จะทำให้กระแสที่ไหลเข้าสู่ตัวมอเตอร์มีค่าสูงในกรณีทำงานที่ความถี่ต่ำและในทางกลับกันจะมีค่าของกระแสต่ำที่การทำงานที่ความถี่สูง ในกรณีที่ทำงานที่ความถี่ต่ำค่าของอินดักแตนซ์จะมีค่าน้อย ในขณะที่แรงดันที่ดีซีบัสมีค่าเท่ากับ 310 โวลต์ กระแสจะไหลเข้าสู่มอเตอร์เป็นจำนวนมาก แต่การควบคุมที่ใช้เป็นการควบคุมกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ดังนั้นเมื่อกระแสเข้าสู่มอเตอร์มากกว่ากระแสไซน์อ้างอิงที่มีการกำหนดแบนด์จะทำให้สวิตซ์กำลังในวงจรอินเวอร์เตอร์มีการสลับสภาวะการทำงาน (ตัวบนหยุดทำงาน, ตัวล่างทำงาน) จึงทำให้กระแสที่จะเข้าสู่มอเตอร์มีการลดลงจนกระทั่งถึงขอบแบนด์ล่างก็จะทำให้สวิตซ์กำลังในวงจรอินเวอร์เตอร์มีการสลับสภาวะการทำงานอีกครั้ง (ตัวบนทำงาน, ตัวล่างหยุดทำงาน) ซึ่งการทำงานจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ส่งผลทำให้แรงดันที่ได้ทางด้านเอาท์พุตจากการทำงานของสวิตซ์ในวงจรอินเวอร์เตอร์มีการสับเนื้อของรูปคลื่นแรงดันเป็นลักษณะพัลส์ถี่ๆ นั่นหมายถึงหากสวิตซ์กำลังมีความถี่ในการทำงานสูงจะทำให้ค่าของแรงดัน (เนื้อของแรงดัน) มีค่าน้อยตามลงไป

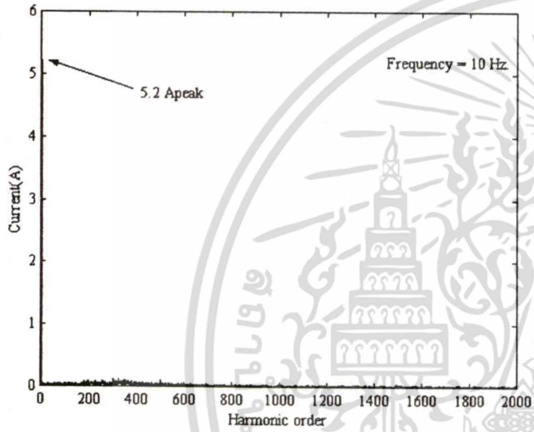
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



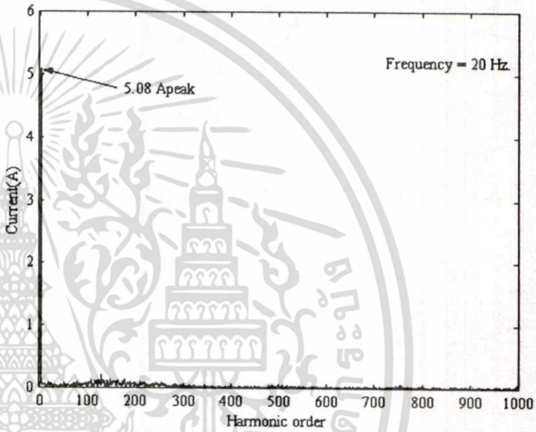
(ก) รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 10 Hz



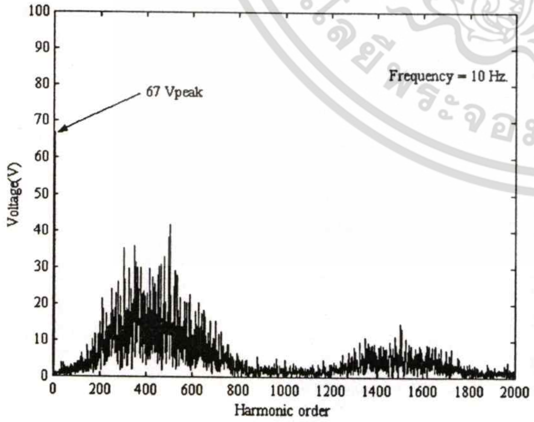
(ง) รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 20 Hz



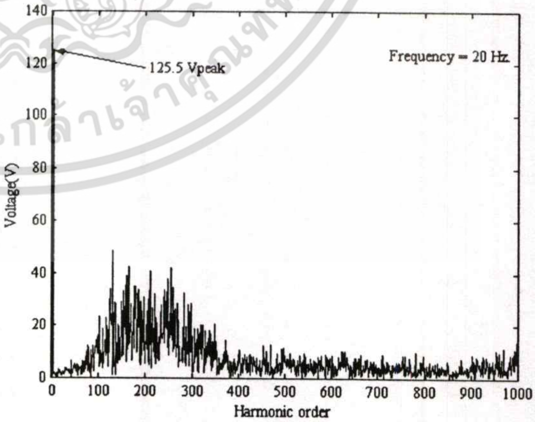
(ข) สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของกระแส (10 Hz)



(จ) สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของกระแส (20 Hz)



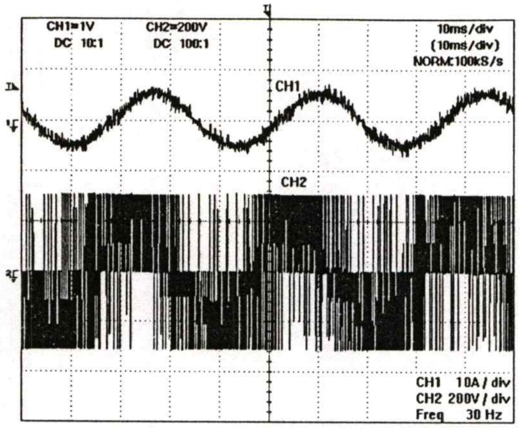
(ค) สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของแรงดัน (10 Hz)



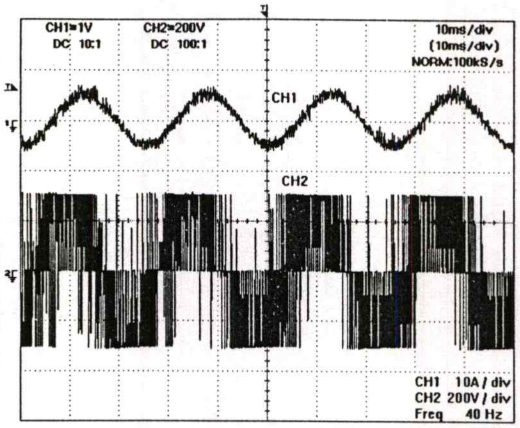
(ฉ) สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของแรงดัน (20 Hz)

ภาพที่ 6.14 รูปคลื่น, สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของกระแสและแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ที่ความถี่ 10 เฮิรตซ์ และ 20 เฮิรตซ์

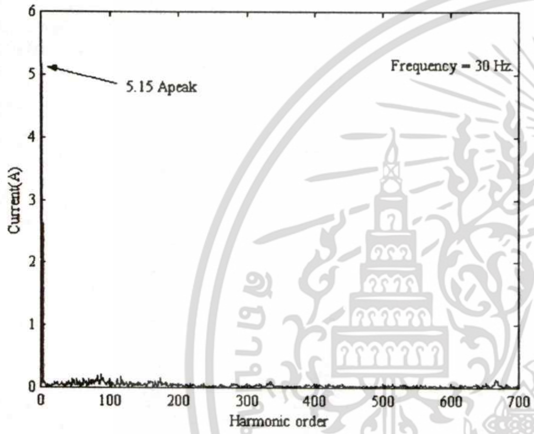
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



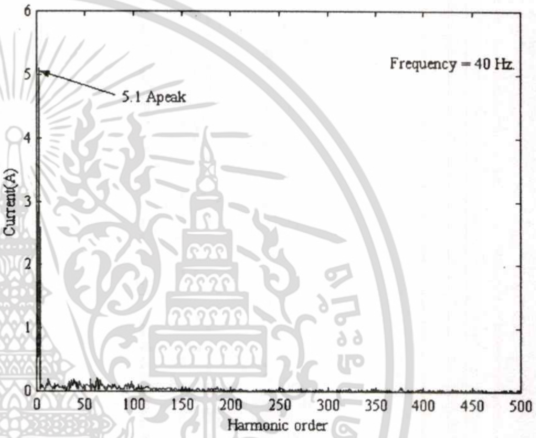
(ก) รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 30 Hz



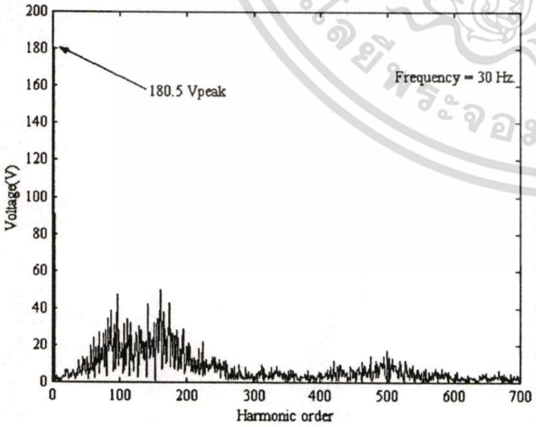
(ง) รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 40 Hz



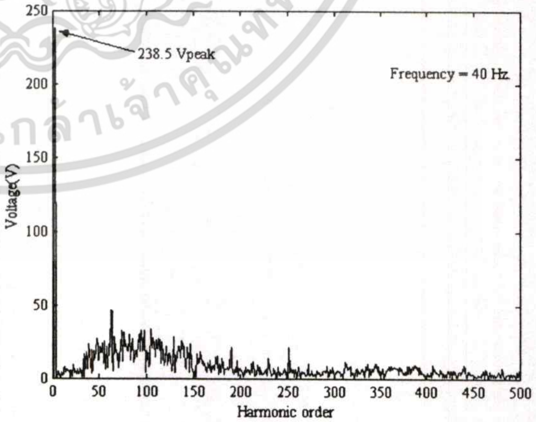
(ข) สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของกระแส (30 Hz)



(จ) สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของกระแส (40 Hz)



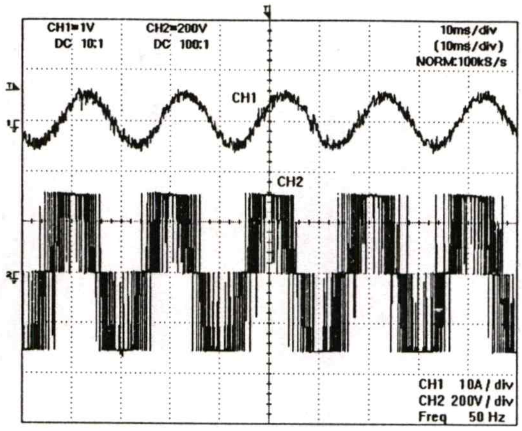
(ค) สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของแรงดัน (30 Hz)



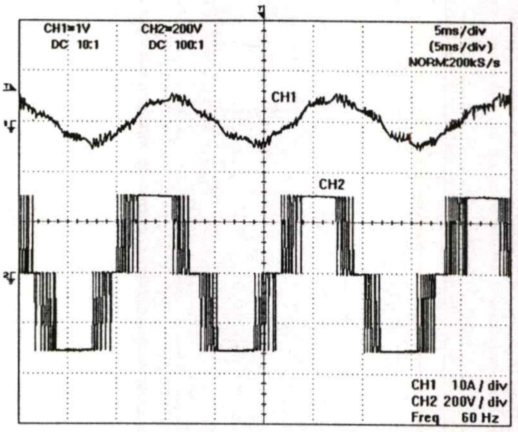
(ฉ) สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของแรงดัน (40 Hz)

ภาพที่ 6.15 รูปคลื่น, สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของกระแสและแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ที่ความถี่ 30 เฮิรตซ์ และ 40 เฮิรตซ์

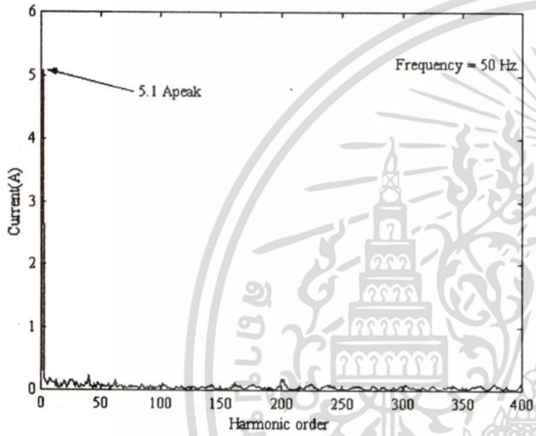
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



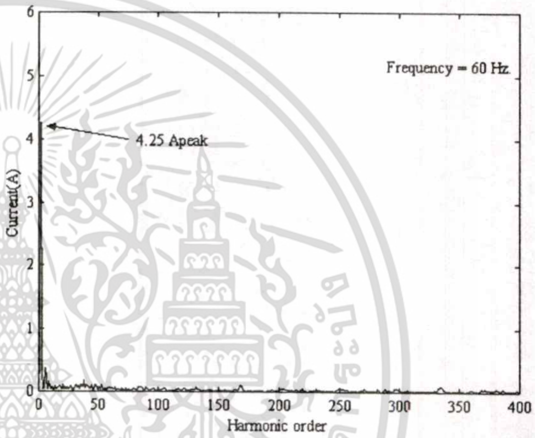
(ก) รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 50 Hz



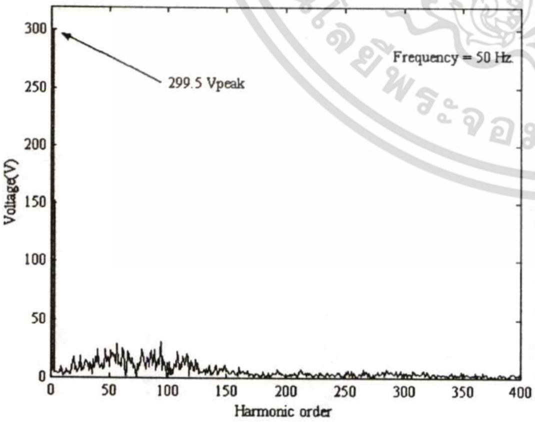
(ง) รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 60 Hz



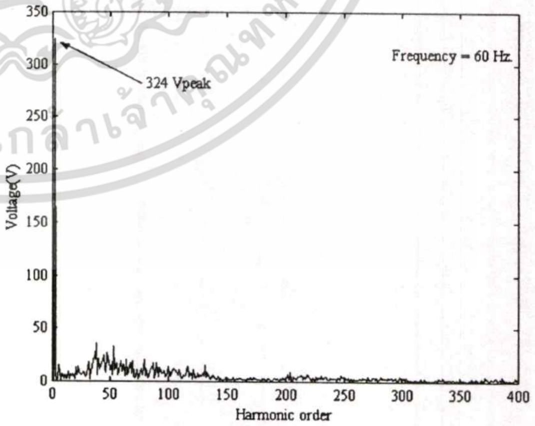
(ข) สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของกระแส (50 Hz)



(จ) สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของกระแส (60 Hz)



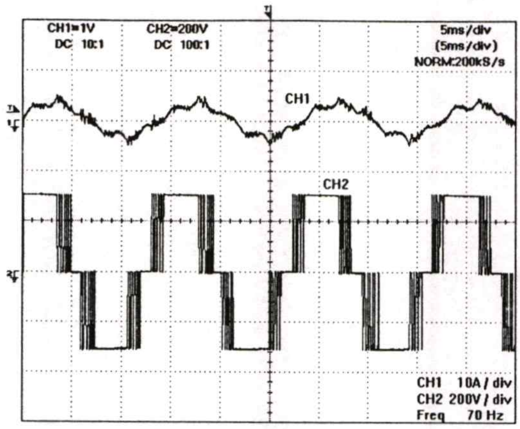
(ค) สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของแรงดัน (50 Hz)



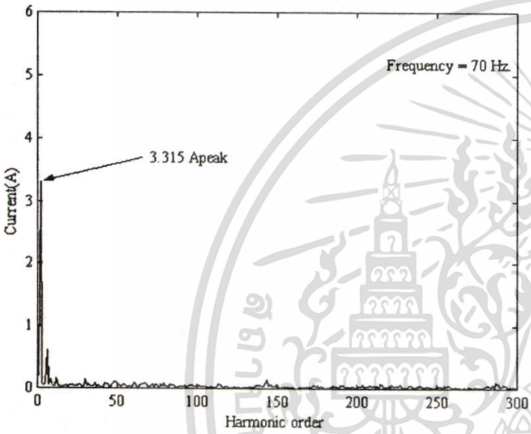
(ฉ) สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของแรงดัน (60 Hz)

ภาพที่ 6.16 รูปคลื่น, สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของกระแสและแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ และ 60 เฮิรตซ์

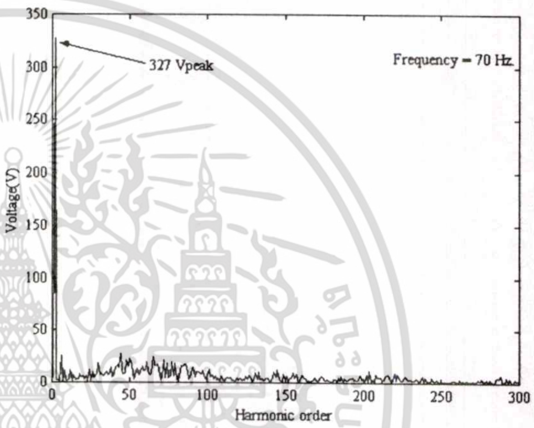
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 70 Hz



(ข) สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของกระแส (70 Hz)



(ค) สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของแรงดัน (70 Hz)

ภาพที่ 6.17 รูปคลื่น, สเปคตราฮาร์โมนิคส์ของกระแสและแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ที่ความถี่ 70 เฮิรตซ์

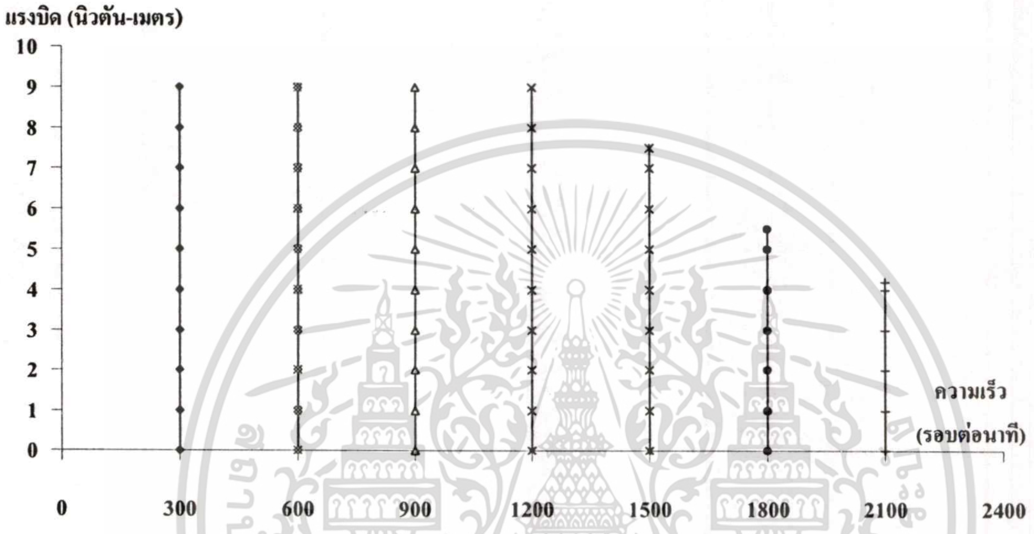
ในกรณีที่มอเตอร์ทำงานที่ความถี่สูงกว่าค่าความถี่พิกัด ค่าของอินดักแตนซ์ก็จะมีค่าสูงซึ่งจะทำให้กระแสที่ไหลเข้าสู่ตัวมอเตอร์มีค่าต่ำ ดังนั้นหากต้องการให้กระแสไหลเข้าสู่ตัวมอเตอร์ให้ได้เท่ากับกระแสไซน์อ้างอิงสามารถทำได้โดยการเพิ่มขนาดของแรงดันที่ดีซีบัสขึ้น ซึ่งจะทำให้แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์มีค่าสูงขึ้น ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้เนื่องจากจะมีผลเสียหายต่อค่าความเป็นฉนวนของมอเตอร์ได้ ซึ่งพฤติกรรม ณ จุดนี้จะเป็นการบ่งบอกถึงค่าแรงบิดพิกัดที่มอเตอร์สามารถให้ได้จะมีค่าลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น

6.4 การทดสอบสภาวะการรับภาระโหลด

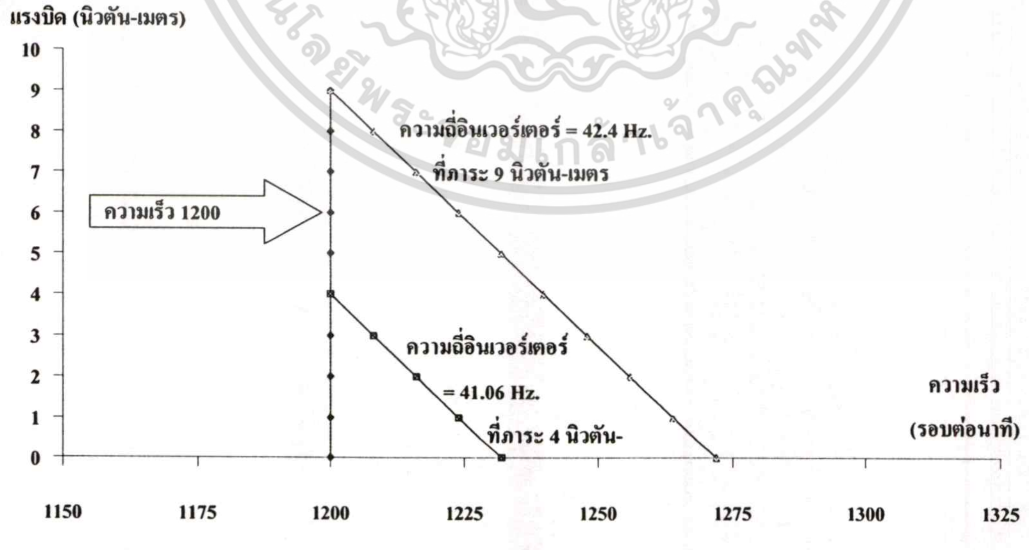
ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบสภาวะการรับภาระโหลด ซึ่งโหลดที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นลูกตุ้มน้ำหนัก โดยการทดสอบจะควบคุมให้มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วต่างๆ โดยมีสเตปคำสั่งการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานทีละ 10 เฮิรตซ์ จากนั้นใส่ภาระเพิ่มให้กับมอเตอร์เรื่อยๆ จนถึงค่าที่พิกัดหรือที่ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เริ่มลดลง จากนั้นทำการบันทึกค่าของภาระโหลดและความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากการควบคุมแบบเฟสเซอร์ เพื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็ว และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความถี่อินเวอร์เตอร์ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ รวมทั้งเก็บผลของรูปคลื่นแรงดัน,กระแส และพฤติกรรมของความเร็ว (Speed) ที่ภาระโหลดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถรับได้

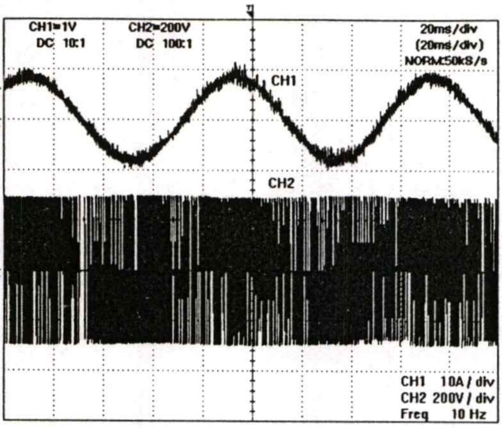


ภาพที่ 6.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงบิดที่ได้จากการควบคุมที่ความถี่ต่างๆ

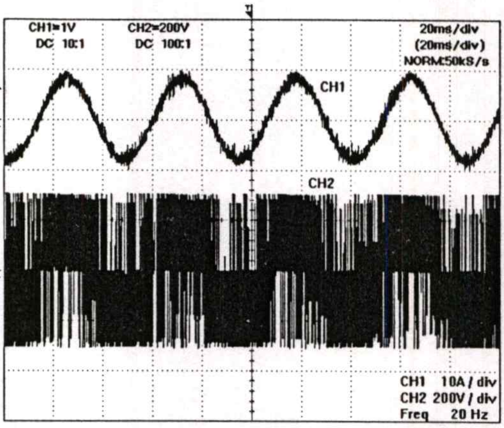


ภาพที่ 6.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความถี่อินเวอร์เตอร์ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ที่ความเร็วคำสั่งเท่ากับ 1200 รอบต่อนาที

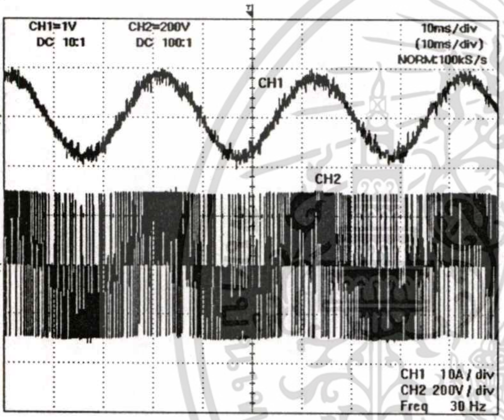
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



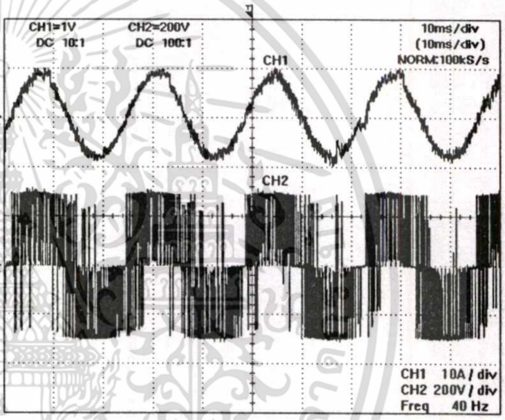
(ก) ความถี่ 10 Hz ที่โหลด 9 นิวตัน-เมตร



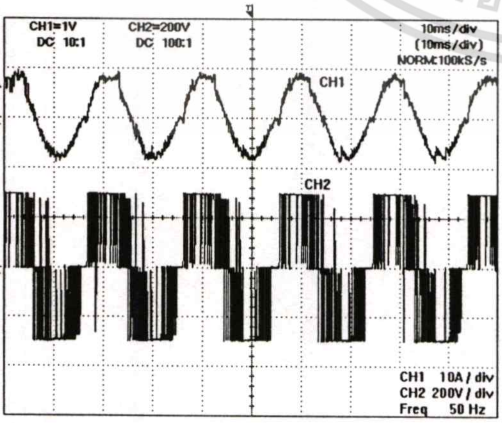
(ข) ความถี่ 20 Hz ที่โหลด 9 นิวตัน-เมตร



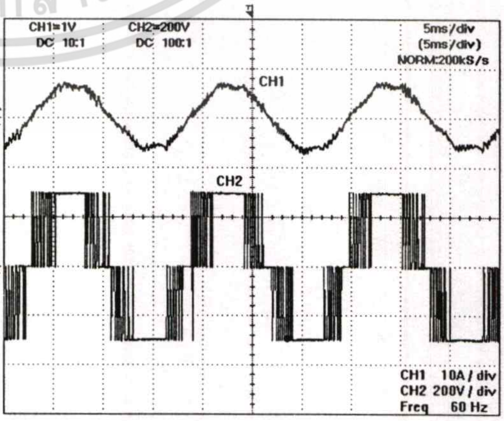
(ค) ความถี่ 30 Hz ที่โหลด 9 นิวตัน-เมตร



(ง) ความถี่ 40 Hz ที่โหลด 9 นิวตัน-เมตร

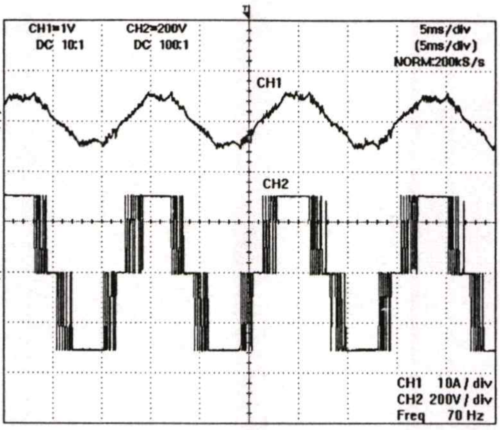


(จ) ความถี่ 50 Hz ที่โหลด 7.5 นิวตัน-เมตร



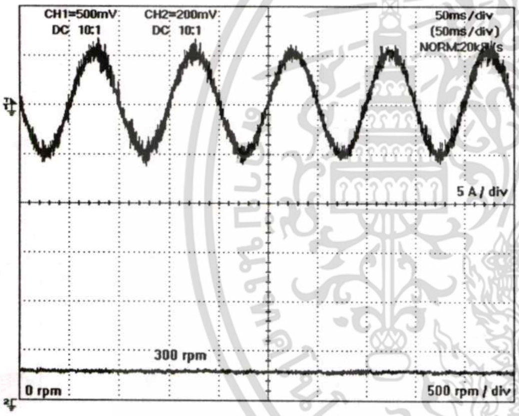
(ฉ) ความถี่ 60 Hz ที่โหลด 5.5 นิวตัน-เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

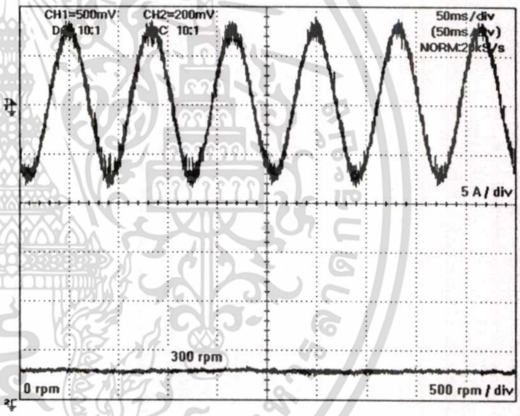


(ช) ความถี่ 70 Hz ที่โหลด 4.2 นิวตัน-เมตร

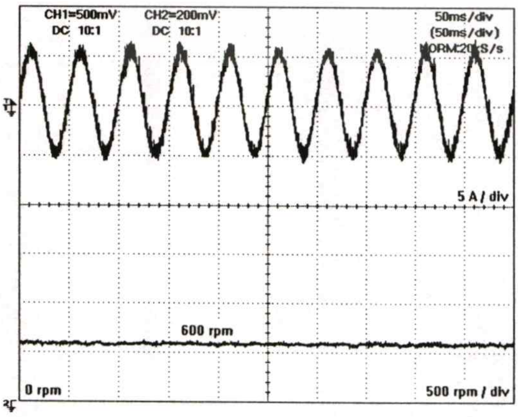
ภาพที่ 6.20 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ได้จากการทดสอบการรับภาระโหลดที่ความถี่ต่างๆ



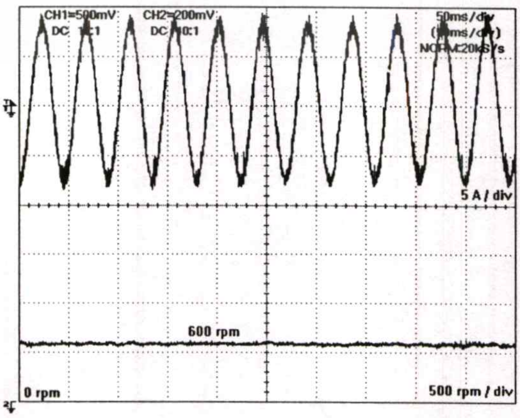
(ก) ที่คำสั่ง 10 Hz ขณะไม่ต่อโหลด



(ข) ขณะรับภาระโหลด 9 นิวตัน-เมตร

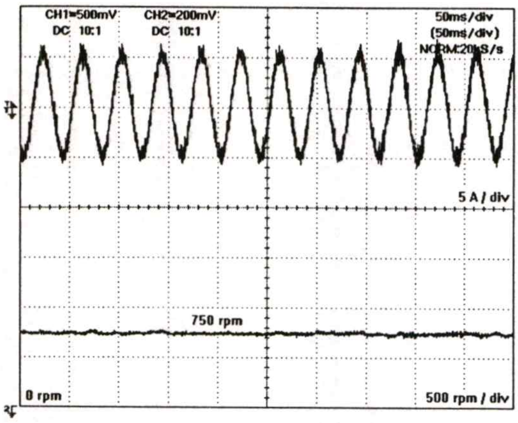


(ค) ที่คำสั่ง 20 Hz ขณะไม่ต่อโหลด

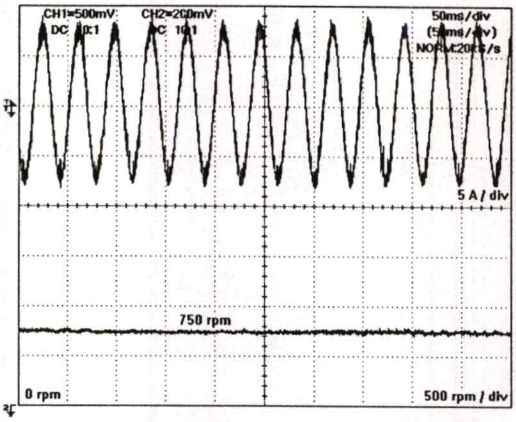


(ง) ขณะรับภาระโหลด 9 นิวตัน-เมตร

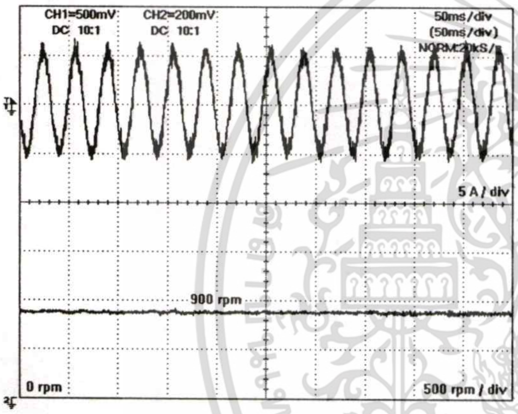
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



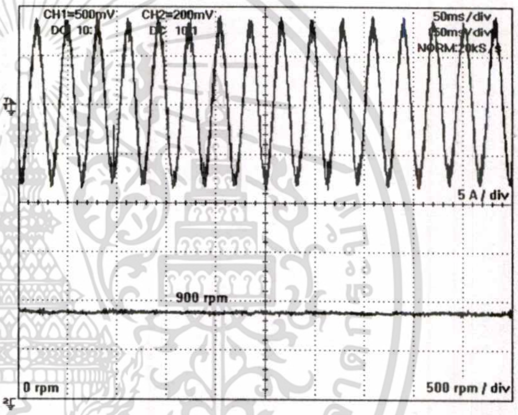
(จ) ที่คำสั่ง 25 Hz ขณะไม่ต่อโหลด



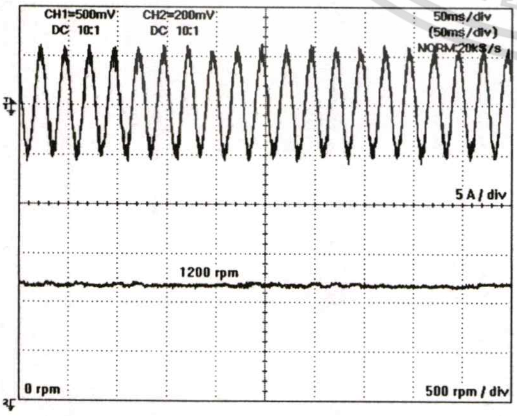
(ฉ) ขณะรับภาระโหลด 9 นิวตัน-เมตร



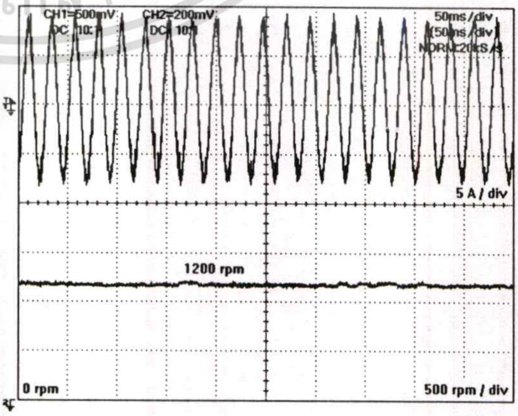
(ช) ที่คำสั่ง 30 Hz ขณะไม่ต่อโหลด



(ซ) ขณะรับภาระโหลด 9 นิวตัน-เมตร

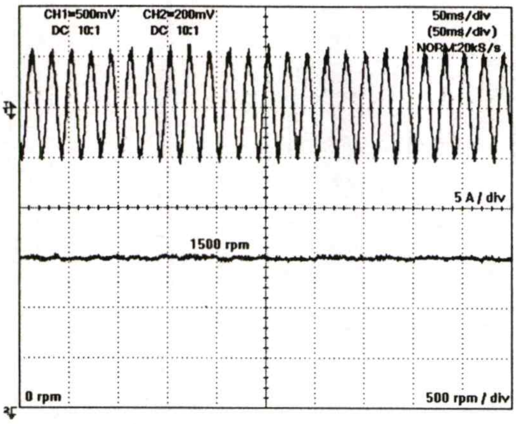


(ฌ) ที่คำสั่ง 40 Hz ขณะไม่ต่อโหลด

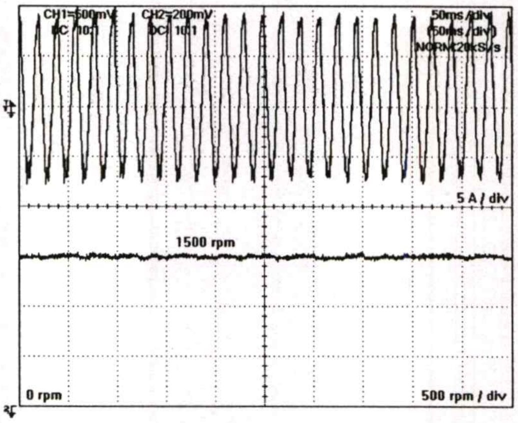


(ญ) ขณะรับภาระโหลด 9 นิวตัน-เมตร

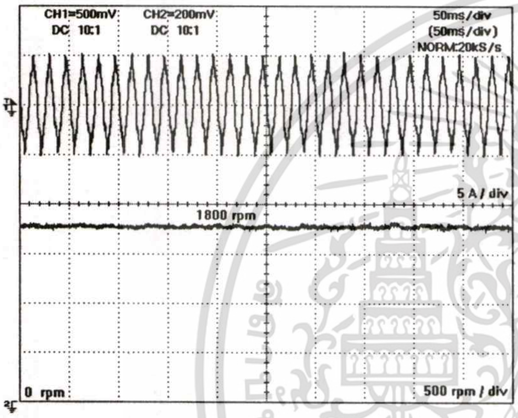
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



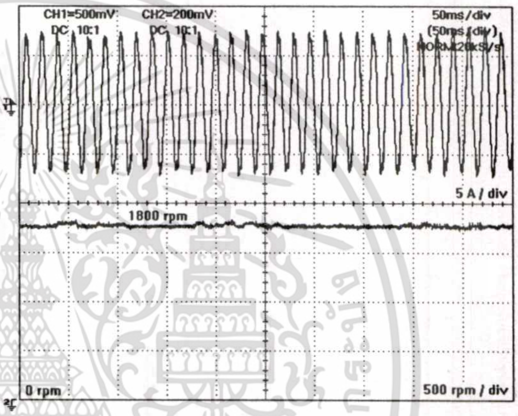
(ฎ) ที่คำสั่ง 50 Hz ขณะไม่ต่อโหลด



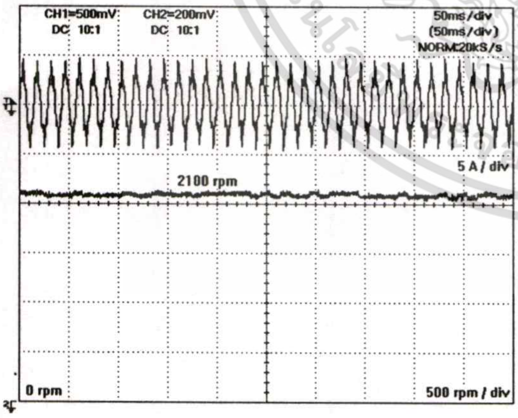
(ฏ) ขณะรับภาระโหลด 7.5 นิวตัน-เมตร



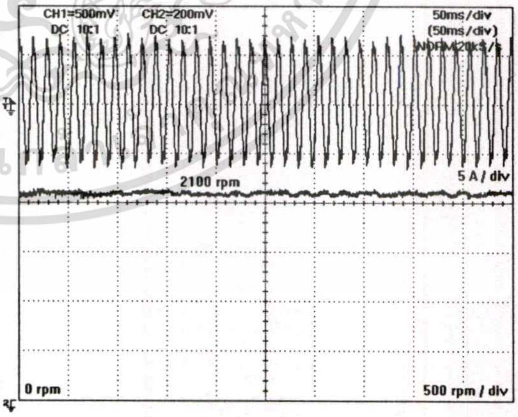
(ฒ) ที่คำสั่ง 60 Hz ขณะไม่ต่อโหลด



(ณ) ขณะรับภาระโหลด 5.5 นิวตัน-เมตร



(ด) ที่คำสั่ง 70 Hz ขณะไม่ต่อโหลด



(ต) ขณะรับภาระโหลด 4.2 นิวตัน-เมตร

ภาพที่ 6.21 รูปคลื่นกระแสและความเร็วมอเตอร์ขณะไร้ภาระ (ซีกซ้าย) และขณะต่อภาระ (ซีกขวา) ที่คำสั่งความถี่ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นถึงค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงบิดที่ได้จากการควบคุมที่ความถี่ต่างๆ และความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความถี่อินเวอร์เตอร์ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ที่ความเร็วต่างๆ จากภาพที่ 6.18 ที่ความเร็วคำสั่งที่มากกว่าค่าพิกัดความเร็วมอเตอร์จะสังเกตได้ว่าค่าแรงบิดที่ได้มีค่าลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นซึ่งตรงกับหลักการในทฤษฎี ถึงแม้ว่าการควบคุมดังกล่าวจะมีวงรอบปิดของความเร็วแล้วก็ตาม ดังสาเหตุที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 6.3 และจากภาพที่ 6.19 จะเห็นได้ว่าถ้าต้องการควบคุมค่าความเร็วรอบให้มีค่าคงที่ จะต้องอาศัยค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่สลิปและค่ากระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์เป็นตัวการในการชดเชยค่าความเร็วรอบที่หายไปเพื่อให้มอเตอร์สามารถรองรับแรงบิดที่เพิ่มขึ้นได้โดยยังคงค่าความเร็วรอบเท่าเดิม ซึ่งตรงกับหลักการที่ได้กล่าวถึงมาแล้วในบทที่ 4 และจากภาพที่ 6.21 จะแสดงถึงค่ากระแสและความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะไร้ภาระและต่อภาระที่สภาวะการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เท่ากับ 300, 600, 750, 900, 1200, 1500, 1800 และ 2100 รอบต่อนาที จากภาพจะเห็นได้ว่าค่าของความเร็วที่ได้จากการตรวจจับจากเอ็นโค็ดเดอร์โดย DSP และส่งผลออกมาแสดงยังเครื่องมือวัดรูปคลื่นทางไฟฟ้าจะมีค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ค่อนข้างเรียบ นั่นหมายถึงค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากการควบคุมมีความเร็วที่คงที่ (ไม่มีการกระเพื่อมของความเร็ว) อันเป็นการบอกถึงค่าของกระบวนการควบคุมของวงรอบปิดแบบพีไอ (PI Control) ได้รับการออกแบบอย่างถูกต้อง

6.5 การทดสอบสภาวะการทำงานแบบสเตปคำสั่ง

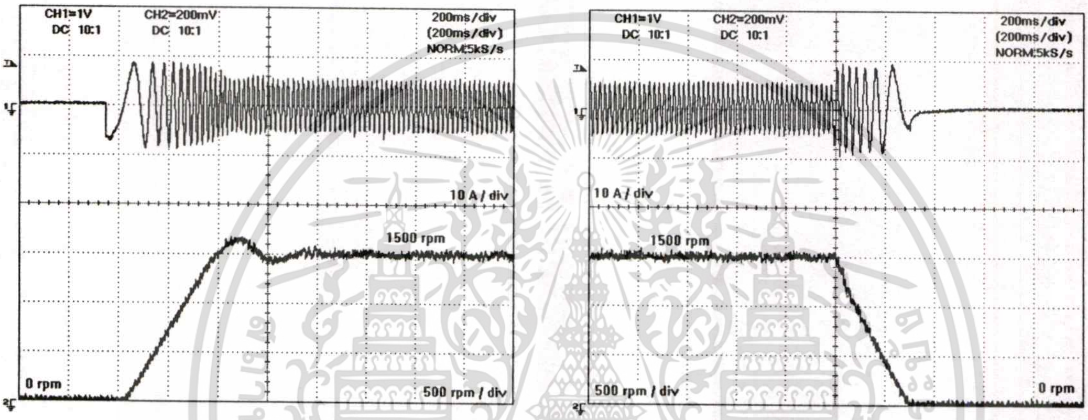
ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบการทำงานของมอเตอร์ในกรณีที่มีการสเตปคำสั่ง เพื่อดูพฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นตลอดจนผลการตอบสนองความเร็วรอบ ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวจะเป็นการวัดรูปคลื่นกระแสและความเร็วมอเตอร์, กระแสและแรงดันที่มอเตอร์, กระแสและแรงดันที่ดีซีบัส, กระแสอินพุตที่เอซีไลน์ ในสภาวะไร้โหลดโดยสามารถแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบ คือ

6.5.1 การทดสอบแบบสเตปคำสั่งความเร็วจากจุดหยุดนิ่งไป 1500 รอบต่อนาที

การทดสอบแบบสเตปคำสั่งนี้จะเริ่มจากสภาวะที่มอเตอร์มีค่าความเร็วรอบเท่ากับ 0 รอบต่อนาที จากนั้นจะใส่คำสั่งความเร็วแบบสเตป เช่น 1500 รอบต่อนาที เพื่อดูการตอบสนองและการเข้าสู่ตลอดจนการออสซิลเลตของระบบควบคุมวงรอบปิดของความเร็ว จากภาพที่ 6.22(ก) เป็นการแสดงถึงรูปคลื่นกระแสและค่าความเร็วรอบที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน จะสังเกตได้ว่ากระแสจะมีการเริ่มไต่จากค่าความถี่ต่ำไปยังความถี่ที่สูงขึ้นในขณะเดียวกันขนาดของกระแสในช่วงออกตัวก็จะมีค่าสูงเพื่อต้องการสร้างแรงบิดให้ชนะค่าแรงเฉื่อยและเมื่อมอเตอร์มีการชนะแรงเฉื่อยออกตัวเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ค่ากระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะมีค่าเท่ากับค่ากระแสที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก ในจุดนี้ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีค่าเท่ากับค่าความเร็วรอบคำสั่ง ซึ่งการทำงานจะตรงกับหลักการทำงานดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 จากรูปคลื่นความเร็วในภาพที่ 6.22(ก)

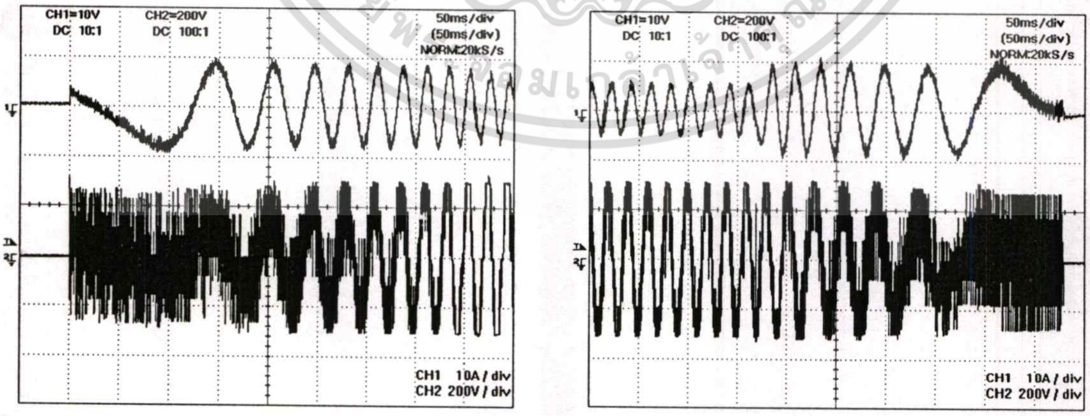
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าระบบเกิดโอเวอร์ชูต (Over Shoot) เล็กน้อยและใช้เวลาในการทำงานประมาณ 800 มิล-ลิวินาที ในการตอบสนองต่อคำสั่งเพื่อเร่งความเร็วรอบให้อยู่ในสภาวะอยู่ตัว ส่วนภาพที่ 6.22(ข) จะเป็นการแสดงถึงการสเตปคำสั่งจาก 1500 รอบต่อนาที ไปยัง 0 รอบต่อนาที ซึ่งการทำงาน ณ จุดนี้จะอาศัยการตรวจจับสัญญาณจากเอ็นโค็ดเดอร์ในการสั่งหยุดสัญญาณขับนำเมื่อมอเตอร์มีความเร็วต่ำกว่า 15 รอบต่อนาที ที่ต้องทำเช่นนี้เพราะหากมอเตอร์หยุดที่ 0 รอบต่อนาที มอเตอร์จะมีการล็อกเนื่องจากมีแรงดันดีซีจ่ายคร่อมขดลวดมอเตอร์ (กระแสจะไหลมาก) อาจจะทำให้มอเตอร์เกิดการเสียหายได้ และที่คำสั่ง 0 รอบต่อนาทีนี้เองมอเตอร์จะใช้เวลาประมาณ 300 มิลลิวินาที ในการเปลี่ยนแปลงจากค่าความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที ไปยัง 0 รอบ (มอเตอร์หยุดหมุน)



(ก) สเตปคำสั่งจาก 0 ไป 1500 รอบต่อนาที (ข) สเตปคำสั่งจาก 1500 ไป 0 รอบต่อนาที

ภาพที่ 6.22 รูปคลื่นกระแสและความเร็วมอเตอร์ขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่ง 1500 รอบต่อนาที

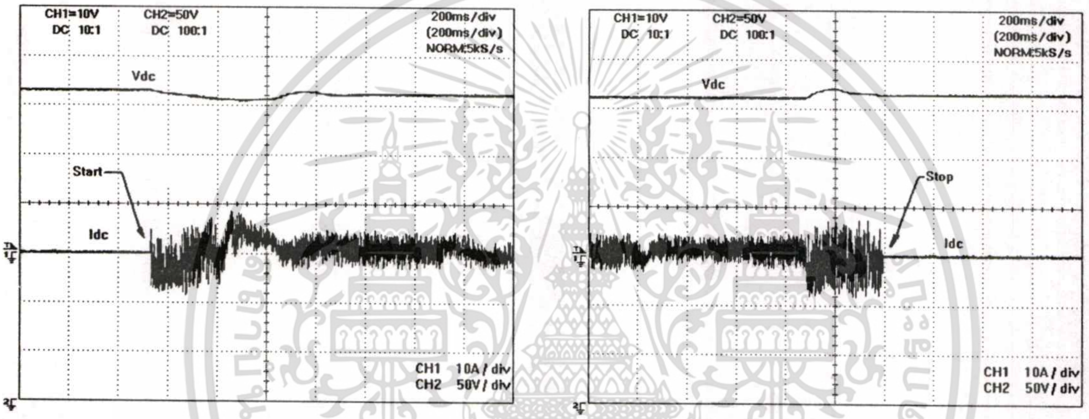


(ก) สเตปคำสั่งจาก 0 ไป 1500 รอบต่อนาที (ข) สเตปคำสั่งจาก 1500 ไป 0 รอบต่อนาที

ภาพที่ 6.23 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่มอเตอร์ขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่ง 1500 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 6.23(ก) เป็นการแสดงถึงกระแสและแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในสภาวะที่มีการสเตปคำสั่งความเร็วโดยจะเห็นได้ว่ากระแสจะเริ่มไต่จากความถี่ต่ำไปยังความถี่คำสั่งในขณะเดียวกันรูปคลื่นแรงดันที่ได้ก็จะมาจากขบวนการเปรียบเทียบกระแสไซน์อ้างอิงกับกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ผลที่ได้ก็คือจะทำให้ค่าฟลักซ์ที่ได้มีค่าคงที่ที่พิกัดตลอดเวลา จึงทำให้มอเตอร์สามารถให้แรงบิดที่พิกัดได้ตลอดย่านการเพิ่มความเร็วและย่านการทำงานที่ไม่เกินค่าพิกัดความเร็วของมอเตอร์ ส่วนในภาพที่ 6.23(ข) เป็นการแสดงการสเตปคำสั่งจาก 1500 รอบต่อนาที ไปยัง 0 รอบต่อนาที ซึ่งพฤติกรรม ณ จุดนี้จะเหมือนกับสภาวะเริ่มไต่เพียงแต่ค่าของแรงดันที่ได้จะมีค่าลดลงตามความถี่ของกระแสไซน์อ้างอิงที่มีค่าลดลง เพื่อรักษาค่าฟลักซ์ที่ได้ให้มีค่าที่พิกัดตลอดย่านการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นมอเตอร์สามารถที่จะให้ค่าแรงบิดที่พิกัดได้คงที่ตลอดย่านการลดความเร็วนั้นเอง



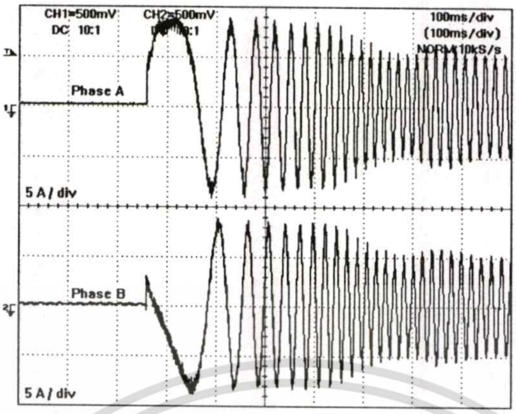
(ก) สเตปคำสั่งจาก 0 ไป 1500 รอบต่อนาที (ข) สเตปคำสั่งจาก 1500 ไป 0 รอบต่อนาที

ภาพที่ 6.24 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ดีซีบัสขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่ง 1500 รอบต่อนาที

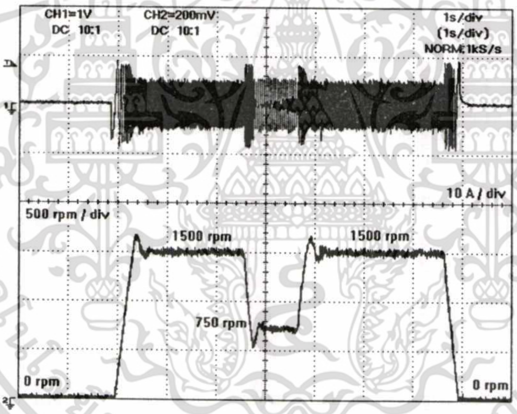
จากภาพที่ 6.24(ก) เป็นการแสดงถึงกระแสและแรงดันที่ดีซีบัสในสภาวะที่มีการสเตปคำสั่งความเร็วโดยจะเห็นได้ว่าแรงดันดีซีจะมีการตกไปเล็กน้อยเนื่องมาจากการออกตัวของมอเตอร์ที่จะต้องใช้กระแสเพื่อฉุดให้มอเตอร์หมุน เมื่อมอเตอร์เร่งความเร็วรอบให้อยู่ในสภาวะอยู่ตัวแล้วค่าของแรงดันจะฟื้นกลับขึ้นมา ทั้งนี้ค่าของแรงดันที่ตกไปเพียงเล็กน้อยสืบเนื่องมาจากโครงงานต้นแบบได้มีการออกแบบและใช้ค่าตัวเก็บประจุที่มากพอนั้นเอง ส่วนภาพที่ 6.24(ข) จะแสดงสภาวะการสเตปคำสั่ง 0 รอบต่อนาที จะเห็นได้ว่าที่แรงดันดีซีจะมีการเพิ่มขึ้นของแรงดันอันเนื่องมากจากการคืนพลังงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยผ่านไดโอดที่คร่อมตัวสวิตซ์กำลัง ซึ่งพลังงานที่คืนมานี้ไม่สามารถคืนกลับสู่แหล่งจ่ายไฟของการไฟฟ้าได้เนื่องจากถูกปิดกั้นด้วยไดโอดของวงจรเร็กติไฟเออร์จึงทำให้แรงดันที่ดีซีบัสมีค่าสูง อย่างไรก็ตามในโครงงานต้นแบบนี้ได้มีการออกแบบระบบเบรกในกรณีที่มอเตอร์มีการรีเจนเนอร์เรทีฟอยู่แล้วจึงทำให้การทดสอบมอเตอร์แบบสเตปคำสั่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือการทดสอบเปลี่ยนทิศทางหมุนของมอเตอร์ทำได้โดยไม่ต้องกังวลถึงความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับตัวโครงงานตามมา



ภาพที่ 6.25 รูปคลื่นกระแสเฟส A และกระแสเฟส B ขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่ง



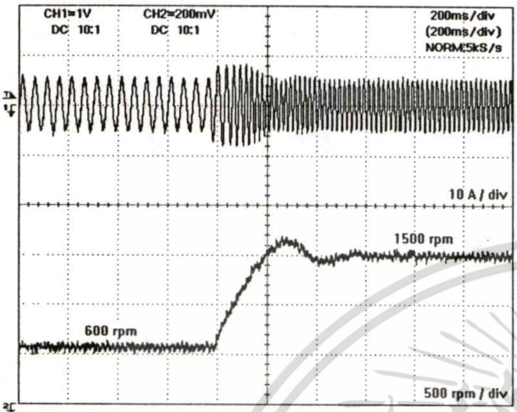
ภาพที่ 6.26 รูปคลื่นกระแสและความเร็วมอเตอร์ขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่งจาก 0 ไป 1500 ไป 750 ไป 1500 และไปยัง 0 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 6.25 จะเป็นการแสดงถึงกระแสเฟส A และเฟส B ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ จากภาพจะเห็นได้ว่าจุดที่เริ่มสตาร์ทของกระแสนี้จะมีมุม (ตำแหน่ง) ต่างกันอยู่ 120 องศา ส่วนในภาพที่ 6.26 จะเป็นการทดสอบการทำงานโดยรวมจากสภาวะหยุดนิ่งไปยังความเร็ว 1500 รอบต่อนาที จากนั้นอีก 2 วินาที จะสั่งให้มีการทำงานที่ความเร็ว 750 รอบต่อนาที และอีก 1 วินาที ต่อมาจะมีการสั่งให้กลับไปทำงานที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที และต่อมาอีก 3 วินาทีให้กลับมาที่ 0 รอบต่อนาที (หยุดหมุนมอเตอร์) ซึ่งหากมองระบบการทำงานในภาพนี้แล้วจะเห็นว่าผลการตอบสนองการทำงานค่อนข้างจะรวดเร็วและมีความแม่นยำค่อนข้างสูง

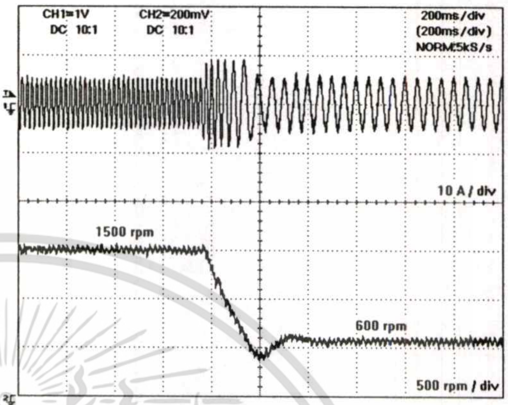
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5.2 การทดสอบแบบสเตปคำสั่งความเร็วจาก 600 รอบต่อนาทีไป 1500 รอบต่อนาที

การทดสอบที่จะกล่าวถึงนี้จะเป็นการเน้นถึงพฤติกรรมของความเร็วที่มีผลต่อระบบโดยรวม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเร็วมอเตอร์แบบสเตปคำสั่งจากค่าความเร็วค่าๆ หนึ่งไปยังความเร็วอีกค่าหนึ่งจะทำให้ระบบทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลงชั่วครู่

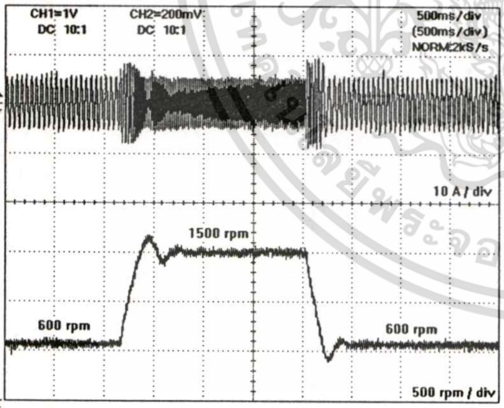


(ก) สเตปความเร็วจาก 600 rpm ไป 1500 rpm

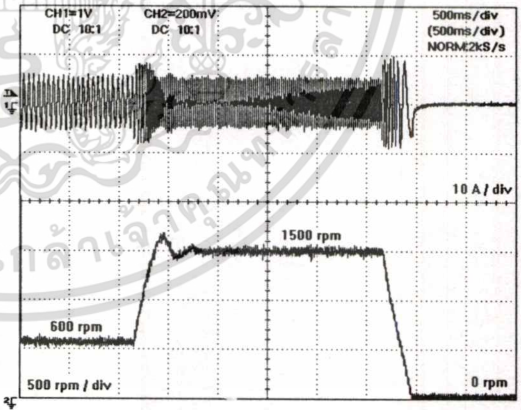


(ข) สเตปความเร็วจาก 1500 rpm ไป 600 rpm

ภาพที่ 6.27 รูปคลื่นกระแสและความเร็วมอเตอร์ขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่งระหว่างความเร็ว 600 รอบต่อนาทีกับความเร็ว 1500 รอบต่อนาที



(ก) ความเร็วจาก 600 ไป 1500 ไป 600 rpm



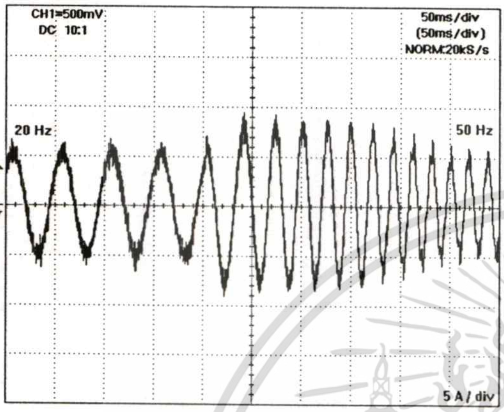
(ข) ความเร็วจาก 600 ไป 1500 ไป 0 rpm

ภาพที่ 6.28 รูปคลื่นกระแสและความเร็วมอเตอร์ขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่ง 600 รอบต่อนาทีไปยังความเร็ว 1500 รอบต่อนาที

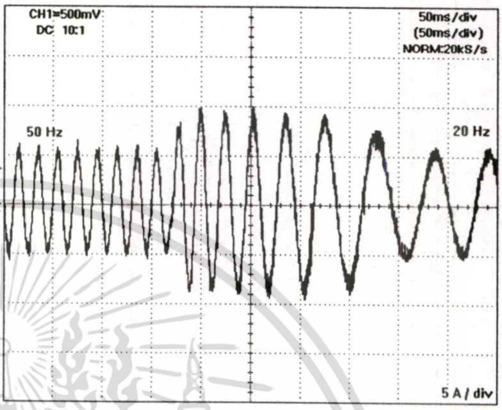
จากภาพที่ 6.27 และภาพที่ 6.28 จะเป็นการแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วระหว่างค่าความเร็ว 600 และ 1500 รอบต่อนาที จะเห็นได้ว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงไปยังความเร็วที่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่า มอเตอร์จะมีการดึงกระแส (i_{motor}) เพิ่มขึ้นพร้อมกับปรับความถี่เพื่อเร่งความเร็วรอบให้เข้าสู่ภาวะคงตัวที่ความเร็วคำสั่งใหม่ซึ่งจะส่งผลทำให้กระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะ ส่วนในกรณีที่การเปลี่ยนแปลงจากความเร็วสูงไปยังความเร็วต่ำ มอเตอร์ก็จะมีการคืนพลังงานในรูปของกระแส (i_{motor}) พร้อมกับปรับความถี่เพื่อลดความเร็วรอบลงให้เข้าสู่ภาวะคงตัวที่ค่าความเร็วคำสั่งใหม่อีกครั้ง ดังแสดงรูปคลื่นกระแสการทดสอบในภาพที่ 6.29

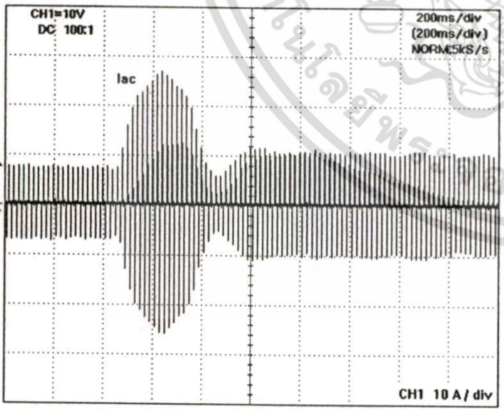


(ก) i_{motor} จากความเร็ว 600 ไป 1500 rpm

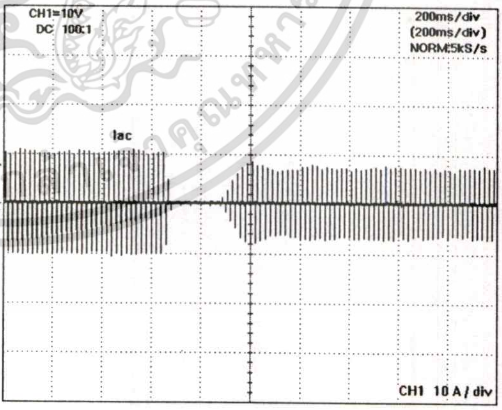


(ข) i_{motor} จากความเร็ว1500 ไป 600 rpm

ภาพที่ 6.29 รูปคลื่นกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่งระหว่างความเร็ว 600 รอบต่อนาทีกับความเร็ว 1500 รอบต่อนาที



(ก) i_{ac} จากความเร็ว 600 ไป 1500 rpm

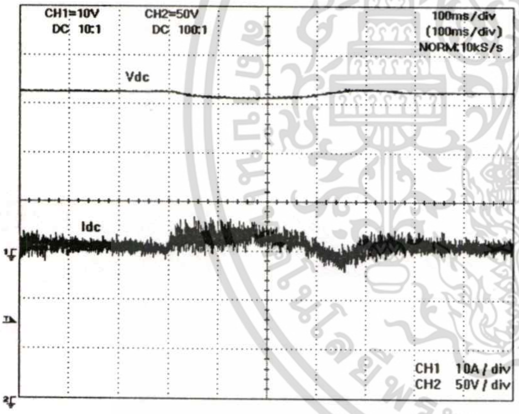


(ข) i_{ac} จากความเร็ว 1500 ไป 600 rpm

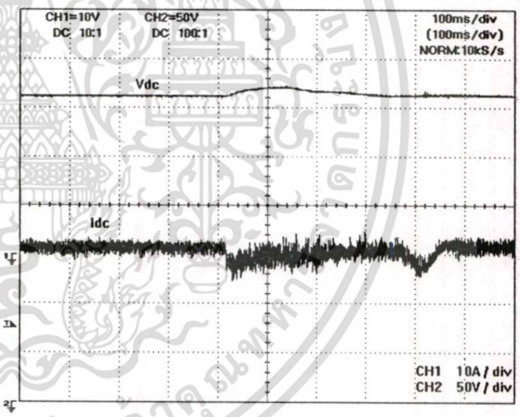
ภาพที่ 6.30 รูปคลื่นกระแสที่เอซีไลน์ขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่งระหว่างความเร็ว 600 รอบต่อนาทีกับความเร็ว 1500 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 6.30 จะแสดงถึงกระแสทางด้านเอซีไลน์ (i_{ac}) ที่ป้อนให้กับชุดต้นกำลังในสภาวะการทดสอบแบบสเตปคำสั่งระหว่างความเร็ว 600 รอบต่อนาทีกับความเร็ว1500 รอบต่อนาที จะเห็นได้ว่าค่ากระแสในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วจากค่าความเร็วต่ำไปยังความเร็วสูงมอเตอร์จะต้องมีการดึงกระแสที่ป้อนให้กับตัวมอเตอร์เองเพื่อทำการเร่งความเร็ว ซึ่งการดึงกระแสที่ป้อนให้กับตัวมอเตอร์นี้จะส่งผลทำให้แรงดันที่ดีซีบัสตกลงเล็กน้อยเนื่องจากมีการกระชากของกระแสทางด้านดีซีส่งผลทำให้กระแสทางด้านเอซีไลน์ (i_{ac}) มีการดึงกระแสมากขึ้นด้วยเช่นกันซึ่งคาบเวลาและค่าขนาดของกระแสที่ถูกดึงมาใช้งานนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการเร่งของมอเตอร์นั้นเอง ในทางกลับกันหากมอเตอร์ตัวดังกล่าวนี้มีการลดความเร็วรอบลงแบบทันทีทันใด ผลที่ได้ทางด้านเอซีไลน์ก็คือจะไม่มีการนำกระแสเอซีไลน์ (i_{ac}) ชั่วขณะ เนื่องจากในขณะที่มอเตอร์ลดความเร็วลงนี้จะเกิดการรีเจนเนอร์เรทีฟของกระแส (ความเร็วมอเตอร์สูงกว่าความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน) ในสภาวะนี้เองกระแสจะไหลกลับมายังภาคของดีซีลิงค์ทำให้แรงดันที่ดีซีบัสมีค่าสูงขึ้นและเมื่อมอเตอร์หมุนเข้าสู่ความเร็วที่กำหนดแล้วก็จะทำให้มอเตอร์มีการใช้งานของกระแสที่อยู่ในสภาวะคงตัวอีกครั้งหนึ่งดังแสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันในภาคดีซีลิงค์ได้ในภาพที่ 6.31



(ก) ที่ความเร็ว 600 ไป 1500 rpm



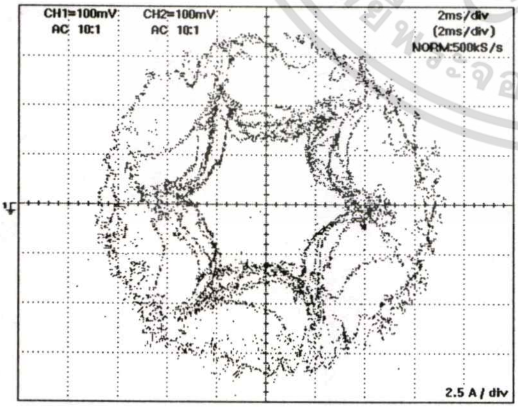
(ข) ที่ความเร็ว 1500 ไป 600 rpm

ภาพที่ 6.31 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ดีซีบัสขณะทดสอบแบบสเตปคำสั่งระหว่างความเร็ว 600 รอบต่อนาทีกับความเร็ว1500 รอบต่อนาที

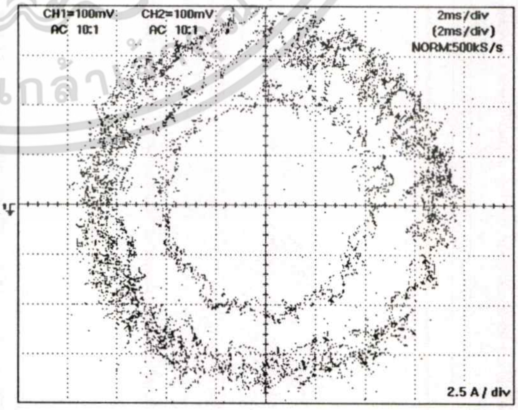
ในรูปที่ 6.32 จะแสดงถึงรูปคลื่นกระแสที่ได้จากการแปลงแกนจาก 3 แกนไป 2 แกน ในช่วงสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วจาก 600 รอบต่อนาทีไปยัง 1500 รอบต่อนาที โดยพล๊อตในโหมด X-Y ของเครื่องวัดรูปคลื่นทางไฟฟ้า จากภาพที่ 6.32 (ก) จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสแบบฉับพลับในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วคำสั่ง ที่เป็นเช่นนี้เพราะในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่ง จะทำให้ผลลัพธ์ที่เกิดจากการลบกันระหว่างลูปความเร็วมีค่าสูงขึ้น ส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลทำให้ค่าผิดพลาด (error) เมื่อผ่านกระบวนการพีไอมีค่าสูงตาม ซึ่งค่าดังกล่าวนี้เองจะทำให้กระแสไซน์อ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงไป (มีการเพิ่มขนาดของกระแสไซน์อ้างอิง) ส่งผลทำให้แรงดันทางด้านเอาท์พุตมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเบ่งเนื้อพัลส์ของแรงดันออก (คล้ายลักษณะรูปคลื่นแบบ 6 สเตป) ที่เป็นเช่นนี้เพราะมอเตอร์ต้องการดึงกระแสมากขึ้นเพื่อเร่งความเร็วรอบของมอเตอร์ กระแสมอเตอร์ที่ได้จะมีลักษณะของกระแสคล้ายกับกระแสในโหมดการทำงานแบบ 6 สเตป เนื่องมาจากเนื้อของแรงดันที่มีการเบ่งตัวออกและค่ากระแสของมอเตอร์นี้เองจะต้องมีการอแดปทีป (Adaptive) ซึ่งมีลักษณะติดตามกระแสไซน์อ้างอิง กระแสมอเตอร์ที่อยู่ในโหมดการทำงานนี้จะคล้ายกับโหมดการทำงานแบบ 6 สเตป และจะเริ่มมีการกลับเข้ามาเกาะติดตามกระแสไซน์อ้างอิงอีกครั้ง ในภาพที่ 6.32(ข) จะเป็นการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วมอเตอร์ โดยที่เส้นทางเดินของกระแสวงเล็กนี้จะเป็นกระแสในสภาวะปกติก่อนที่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนเส้นทางเดินของกระแสวงใหญ่จะเป็นกระแสในสภาวะที่มีการเร่งความเร็วรอบ หลังจากที่มอเตอร์มีการเร่งความเร็วสำเร็จจะทำให้เส้นทางเดินของกระแสที่ได้มีการกลับลงมาที่ค่าสภาวะคงตัวอีกครั้งหนึ่งซึ่งก็คือเส้นทางของกระแสวงเล็กนั้นเอง ส่วนในภาพที่ 6.33 จะเป็นการแสดงถึงการทดสอบหยุดการทำงานแบบสเตปคำสั่งที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0 รอบต่อนาที จะสังเกตเห็นได้ว่าเส้นทางเดินของกระแสอัลฟาและกระแสเบต้าจะมีการลดความถี่ลงจนกระทั่งเหลือ 0 เฮิรตซ์ โดยมีการสั่งหยุดการทำงานของสัญญาณขับนำเมื่อค่าความเร็วรอบมอเตอร์ต่ำกว่า 15 รอบต่อนาที ผลลัพธ์ที่ได้นี้จะทำให้เส้นทางเดินของกระแสมอเตอร์มีการแสดงผลการเกิดรีเจนเนอร์เรทีฟขึ้นโดยสังเกตได้จากเส้นทางของกระแสวงใหญ่และจะมีค่าลงลดสู่ศูนย์ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมนั้นเองดังแสดงในภาพที่ 6.33(ข)



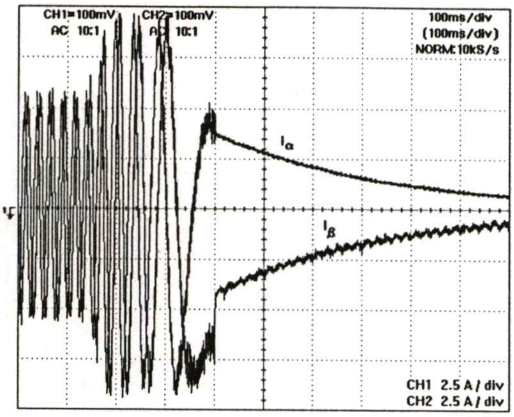
(ก) เส้นทางเดินกระแสขณะสเตปคำสั่ง



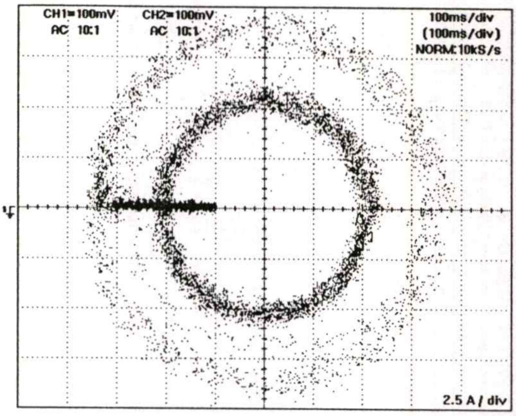
(ข) เส้นทางเดินกระแสขณะเร่งความเร็ว

ภาพที่ 6.32 รูปคลื่นกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในช่วงสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กระแส i_β, i_α ที่ความถี่ 50 ไปยัง 0 เฮิรตซ์

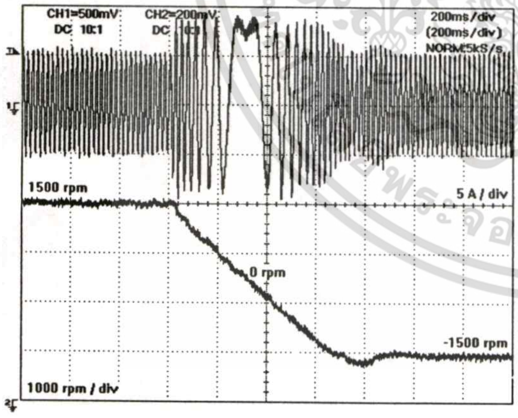


(ข) เส้นทางเดินกระแสขณะหยุด

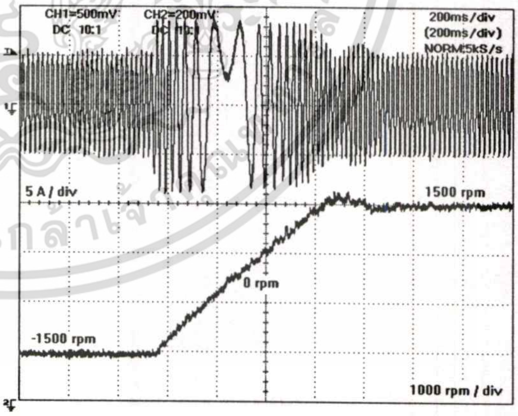
ภาพที่ 6.33 รูปคลื่นกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในช่วงสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วแบบสเตปคำสั่งที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0 รอบต่อนาที

6.6 การทดสอบกลับทิศความเร็วของมอเตอร์แบบสเตปคำสั่ง

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบการกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์ซึ่งการทดสอบนี้จะทำการทดสอบในลักษณะสเตปคำสั่งระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์เท่ากับ 1500 และ -1500 รอบต่อนาที เพื่อดูผลการตอบสนองต่อความเร็วที่เกิดขึ้น



(ก) จาก 1500 rpm ไปยัง –1500 rpm



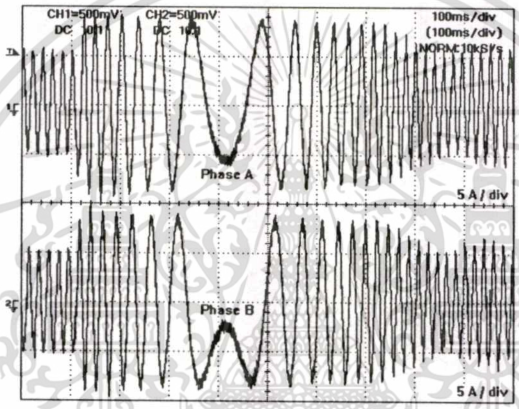
(ข) จาก -1500 rpm ไปยัง 1500 rpm

ภาพที่ 6.34 รูปคลื่นกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์และความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงสภาวะที่มีการทดสอบการกลับทางหมุนของมอเตอร์

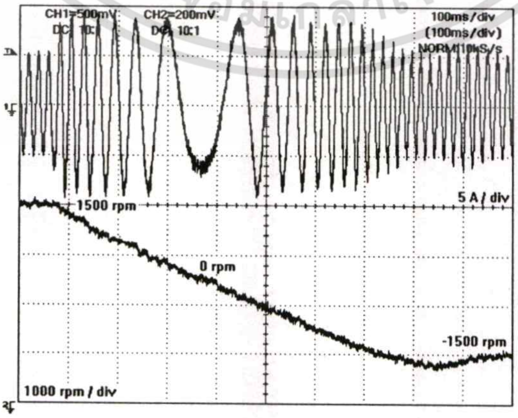
จากภาพที่ 6.34 จะเป็นการทดสอบการทำงานขณะกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์ระหว่าง 1500 และ -1500 รอบต่อนาที โดยที่ระบบมีวงรอบการทำงานของความเร็วเป็นตัวควบคุมอยู่ จะเห็นได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์มีการทำงานโดยใช้เวลาประมาณ 800 มิลลิวินาที ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ความเร็วรอบคำสั่งอีกครั้งหนึ่ง การทำงาน ณ จุดนี้จะเป็นการบ่งบอกถึงการทำงานของกระบวนการควบคุมแบบพีไอเชิงดิจิตอลว่ากระบวนดังกล่าวมีการทำงานได้อย่างถูกต้องและแม่นยำจะสังเกตได้จากการทดสอบจากค่าความเร็วรอบในทิศทางหนึ่งไปยังค่าความเร็วรอบอีกทิศทางหนึ่งแล้วทำการกลับมายังค่าความเร็วรอบเดิมจะมีการใช้เวลาการทำงานที่เท่ากัน จากการทำงานจะสังเกตได้ว่าในช่วงที่มอเตอร์มีการหมุนผ่านจุดศูนย์ กระแสจะเริ่มมีการเปลี่ยนทิศทางของเฟส เช่นกระแสเฟส B เคยล้าหลังกระแสเฟส A อยู่ 120 องศา ก็จะเริ่มมีการเลื่อนของเฟสในช่วงที่ความเร็วมอเตอร์มีการหมุนผ่านจุดศูนย์ ซึ่งจะทำให้กระแสเฟส B กลับมานำหน้ากระแสเฟส A แทน ดังแสดงได้ในภาพที่ 6.35 และภาพที่ 6.36

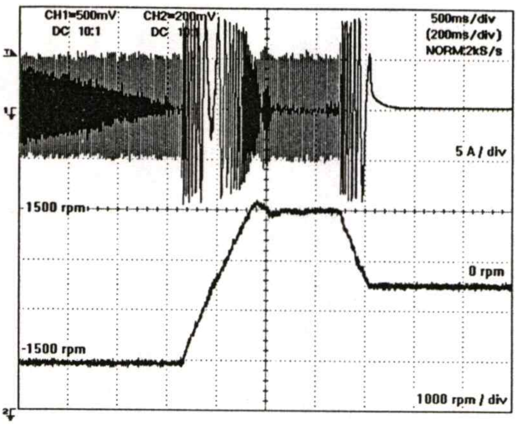


ภาพที่ 6.35 รูปคลื่นกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์เฟส A และเฟส B ขณะกลับทิศทางหมุนจากความเร็ว 1500 ไปยัง -1500 rpm

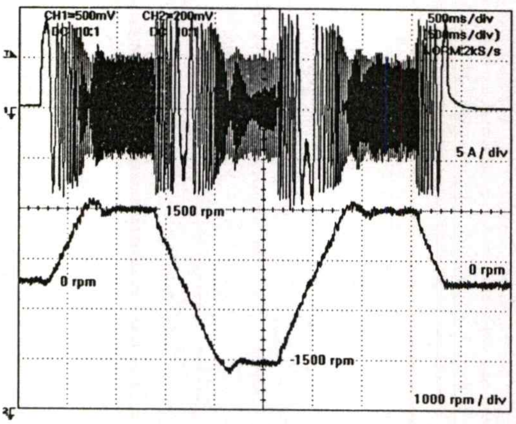


ภาพที่ 6.36 รูปคลื่นกระแสมอเตอร์และความเร็วรอบมอเตอร์ขณะกลับทิศทางหมุน (100 ms/div) จากความเร็ว 1500 ไปยัง -1500 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

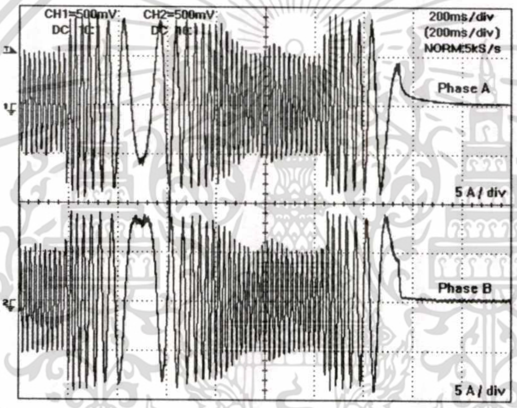


(ก) จาก –1500 ไป 1500 ไป 0 rpm

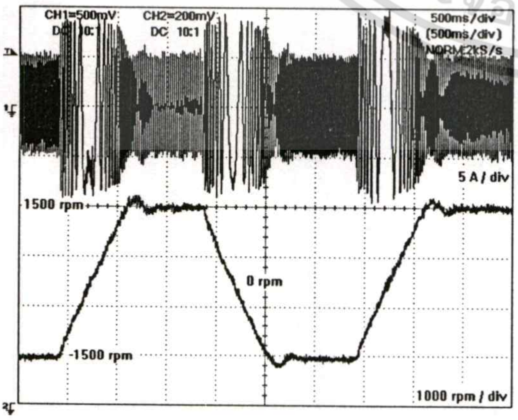


(ข) จาก 0 ไป 1500 ไป -1500 ไป 1500 ไป 0 rpm

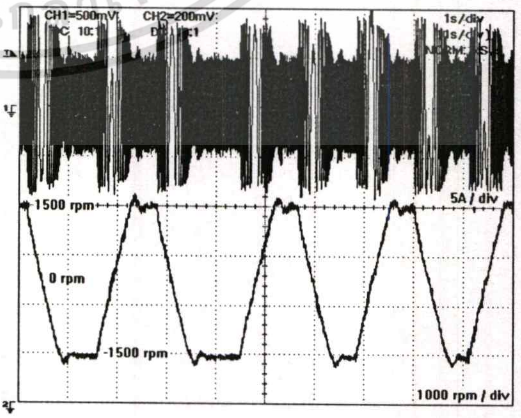
ภาพที่ 6.37 รูปคลื่นกระแสมอเตอร์และความเร็วรอบมอเตอร์ขณะทดสอบกลับทางหมุนแล้วหยุด



ภาพที่ 6.38 รูปคลื่นกระแสมอเตอร์เฟส A และเฟส B ขณะทดสอบกลับทางหมุนแล้วหยุด



(ก) กลับทางหมุนไป-กลับทุกๆ 1 วินาที



(ข) กลับทางหมุนไป-กลับตามคำสั่งที่แป้น

ภาพที่ 6.39 รูปคลื่นกระแสมอเตอร์และความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ

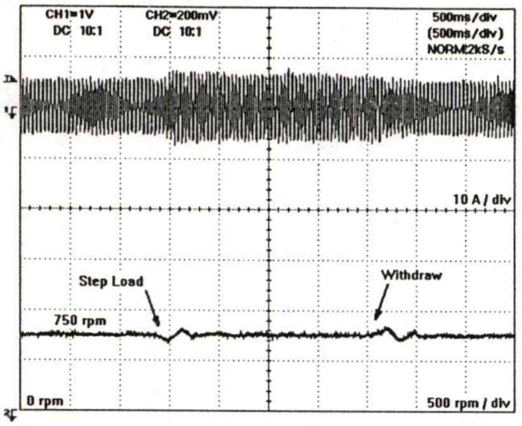
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 6.37 ถึงภาพที่ 6.39 จะเป็นการแสดงถึงการทดสอบการกลับทางหมุนของมอเตอร์เพื่อดูพฤติกรรมของการตอบสนองต่อคำสั่งที่ได้รับ โดยการทดสอบจะมีการทดสอบจากสภาวะหยุดนิ่งไปยังความเร็วรอบที่ตั้งไว้แล้วกลับทางหมุนไป/กลับแล้วหยุด และการทดสอบกลับทิศทางหมุนไปและให้มีการหมุนกลับตามคำสั่งจากแป้นควบคุมการทำงาน ซึ่งผลการตอบสนองต่อเวลาที่ได้รับอยู่ในเกณฑ์การทำงานที่แม่นยำ

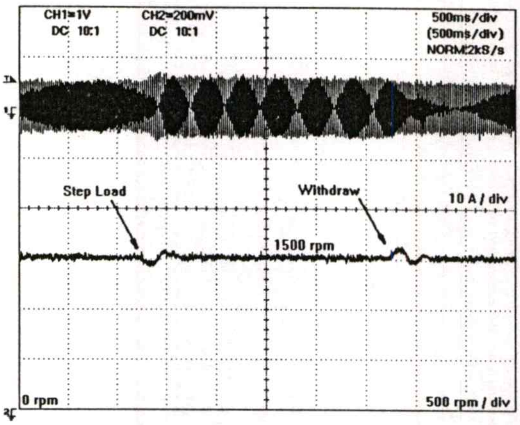
6.7 การทดสอบรับภาระแบบสเตปโหลดและแบบคงสภาวะโหลด

การทดสอบรับภาระแบบสเตปโหลดจะอาศัยลูกตุ้มน้ำหนักในการทำตัวเป็นภาระเพื่อทำการทดสอบหาค่าการตอบสนองความเร็วต่อโหลด ซึ่งการทดลองจะทดลองที่ความเร็วคำสั่งเท่ากับ 750 และ 1500 รอบต่อนาที จากภาพที่ 6.40 (ก) ถึง 6.40 (ฉ) จะเป็นการแสดงถึงผลการตอบสนองความเร็วต่อเวลาในขณะที่มีการใส่ภาระโหลดขนาด 1, 2 และ 3.5 นิวตัน-เมตร จากภาพจะสังเกตได้ว่าในช่วงที่มีการต่อโหลดแบบทันทีทันใดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จะตกลง ทำให้ค่าผิดพลาดที่เกิดจากวงรอบความเร็วเมื่อผ่านกระบวนการควบคุมพีไอแล้วมีค่าเปลี่ยนแปลงส่งผลทำให้กระแสไซน์อ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลง กระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นเพื่อต้องการดึงค่าความเร็วรอบที่ตกไปกลับเข้าสู่ความเร็วรอบเดิม ซึ่งจากการใส่ค่าภาระไม่เกินประมาณ 4 นิวตัน-เมตร จะได้การตอบสนองเวลาต่อความเร็วที่ใช้ค่อนข้างไวเนื่องจากภาระที่ใส่ให้นี้มีค่าประมาณเพียง 41 เปอร์เซ็นต์ของแรงบิดที่พิกัดเท่านั้นเอง ส่วนในภาพที่ 6.40 (ช) ถึง 6.40 (ญ) จะเป็นการแสดงถึงผลการตอบสนองความเร็วต่อเวลาในขณะที่มีการใส่ภาระโหลดขนาด 5.5 และ 6.5 นิวตัน-เมตร จะเห็นได้ว่าที่ค่าภาระต่างๆ เหล่านี้จะใช้เวลาค่อนข้างช้าในการตอบสนองต่อความเร็ว ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากสาเหตุ 2 ประการได้แก่ ค่าที่ใช้ในกระบวนควบคุมแบบพีไอมีค่าต่ำเกินไป ซึ่งการแก้ไขสามารถทำได้โดยการปรับค่า Kp ให้มีค่ามากขึ้นเพื่อต้องการการตอบสนองที่ไวมากขึ้น แต่ก็จะส่งผลเสียต่อระบบในช่วงสภาวะคงตัวได้เนื่องจากเกณฑ์ที่ใช้มีค่าสูง ส่วนสาเหตุที่สองได้แก่การทำงานของหลักการควบคุมแบบเฟสเซอร์จะอาศัยการทำงานตรวจจับจากค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มาทำการประมวลผลและสั่งการ ดังนั้นหากชุดตรวจจับความเร็วรอบที่ได้นี้มีวงรอบเวลาการตรวจจับที่ช้าก็จะส่งผลทำให้ผลการตอบสนองต่อการสั่งงานช้าตามไปด้วย เนื่องจากในโครงงานนี้ใช้ตัวตรวจจับสัญญาณขนาด 500 พัลส์ต่อรอบในการทำงาน จึงทำให้การโปรแกรมที่ได้มีค่าวงรอบการทำงานของชุดตรวจจับความเร็วเท่ากับ 10 มิลลิวินาที (1 กิโลเฮิรตซ์) ซึ่งเป็นวงรอบการตรวจจับที่ช้าเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ ซึ่งการแก้ไขส่วนใหญ่เพื่อลดช่วงเวลาจุดนี้จะนิยมใช้วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน (Frequency to Voltage) และนำแรงค่าแรงดันที่ได้นี้ไปเข้าขาสัญญาณ A/D ของตัวประมวลผล ซึ่งจะทำให้สามารถใช้เกณฑ์ของค่ากระบวนการควบคุมแบบพีไอมีค่าน้อยๆ ได้ ในขณะที่การตรวจจับนี้อาจจะเรียกได้ว่า ค่าที่อ่านได้เป็นค่า ณ เวลาจริง

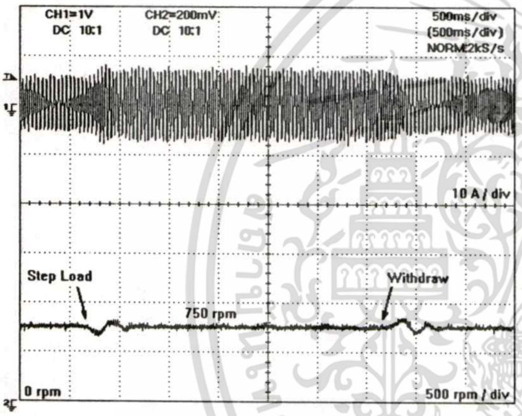
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



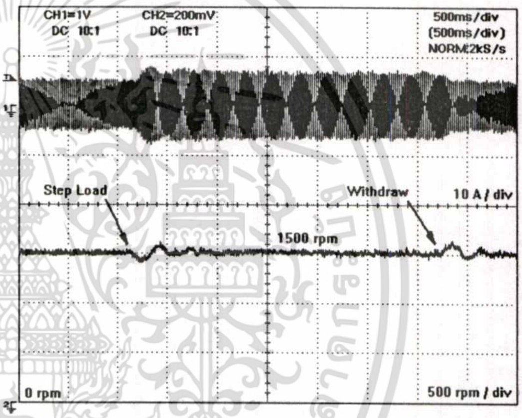
(ก) ภาระโหลดขนาด 1 N-m ที่ 750 rpm



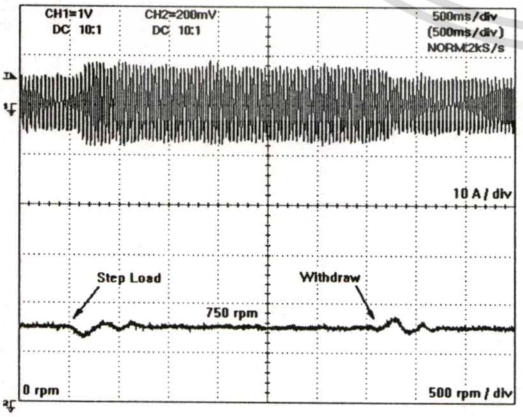
(ข) ภาระโหลดขนาด 1 N-m ที่ 1500 rpm



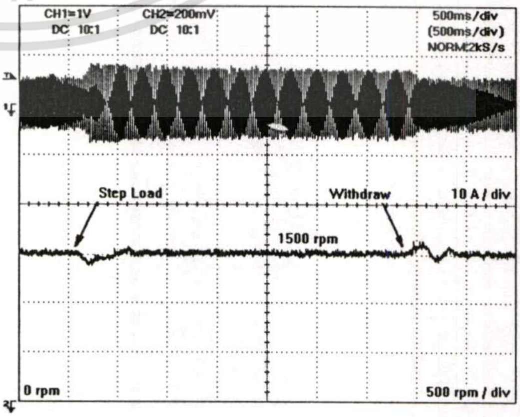
(ค) ภาระโหลดขนาด 2 N-m ที่ 750 rpm



(ง) ภาระโหลดขนาด 2 N-m ที่ 1500 rpm

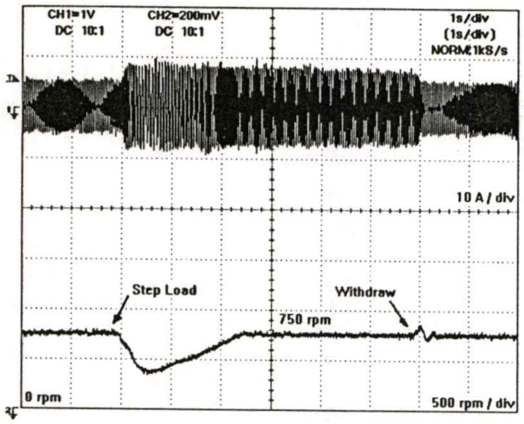


(จ) ภาระโหลดขนาด 3.5 N-m ที่ 750 rpm

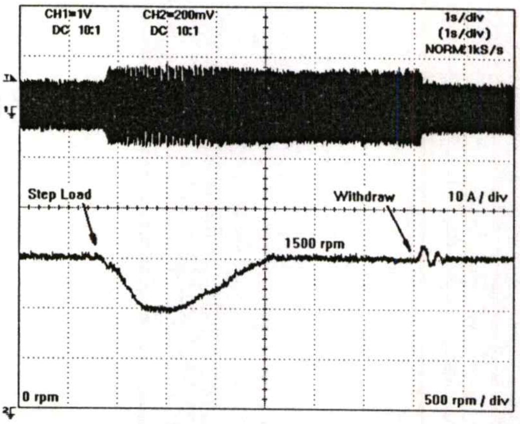


(ฉ) ภาระโหลดขนาด 3.5 N-m ที่ 1500 rpm

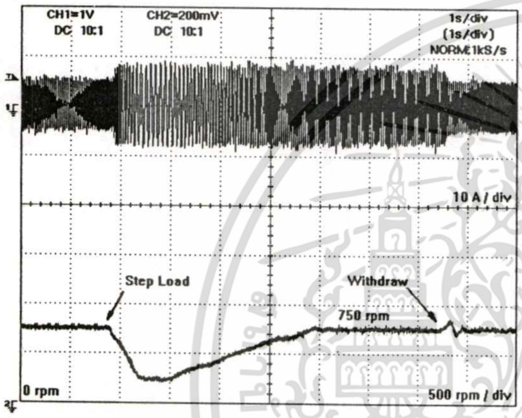
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



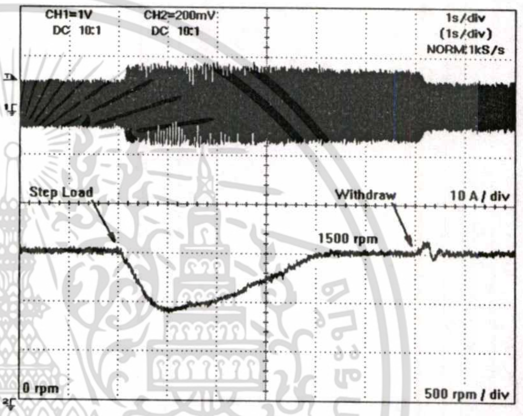
(ช) ภาระโหลดขนาด 5.5 N-m ที่ 750 rpm



(ซ) ภาระโหลดขนาด 5.5 N-m ที่ 1500 rpm



(ฌ) ภาระโหลดขนาด 6.5 N-m ที่ 750 rpm

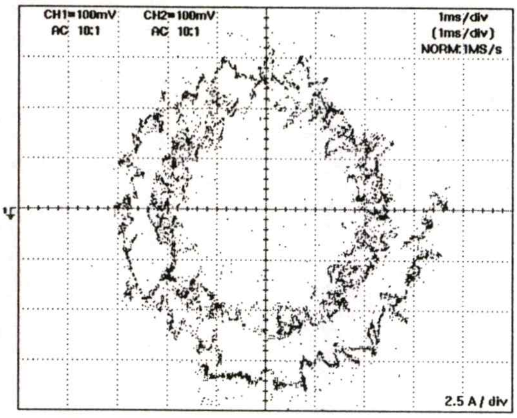


(ญ) ภาระโหลดขนาด 6.5 N-m ที่ 1500 rpm

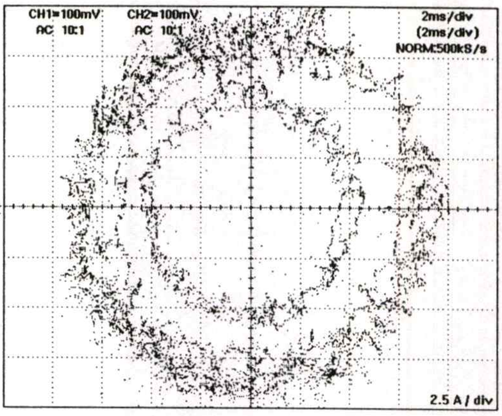
ภาพที่ 6.40 รูปคลื่นแสดงผลการตอบสนองของกระแสมอเตอร์และความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการใส่ภาระที่พิกัดโหลดต่างๆ ที่ความเร็ว 750 และ 1500 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 6.41 (ก) แสดงถึงเส้นทางเดินของกระแส (Tracking) ตอนใส่ภาระ โดยจะเห็นได้ว่ากระแสมอเตอร์จะมีการเกาะติดตามกระแสไซน์อ้างอิงที่มีขนาดแอมปิจูดที่มากขึ้นจึงทำให้เส้นทางเดินของกระแสที่ได้มีการวิ่งออกจากวงกลมวงเล็กซึ่งหมายถึงมีการใช้กระแสมากกว่าเดิมจนกระทั่งกระแสมีขนาดเท่ากับค่ากระแสไซน์อ้างอิงที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ได้รูปวงกลมวงใหญ่ดังภาพที่ 6.41 (ข) ซึ่งวงกลมวงในจะเป็นค่ากระแสก่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงภาระของโหลด และในภาพที่ 6.42 จะแสดงถึงสภาวะตอนปลดโหลดแบบทันทีทันใด จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าความเร็วที่ได้มีการสวิงขึ้นไปเล็กน้อยและมีการกลับเข้าสู่ภาวะคงตัวอีกครั้งเนื่องจากผลของกระบวนการทำงานของตัวควบคุมแบบพีไอในตอนสภาวะปลดโหลดจะเกิดค่าผลต่างความเร็วขึ้น โดยผลต่างที่เกิดขึ้นนี้หมายถึงค่าความเร็วรอบที่เกินออกไป เพื่อต้องการให้ระบบกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสไซน์อ้างอิงดังที่ได้กล่าวถึงหลักการทำงานแล้วในบทที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

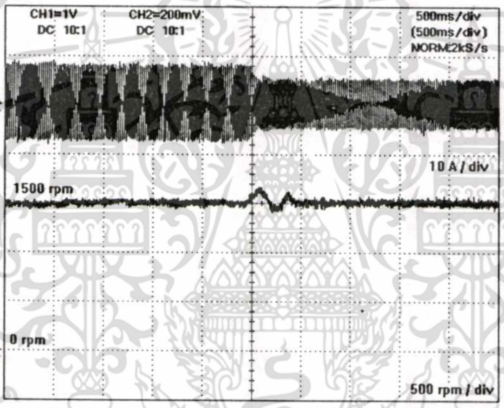


(ก) เส้นทางเดินของกระแสตอนใส่ภาระ

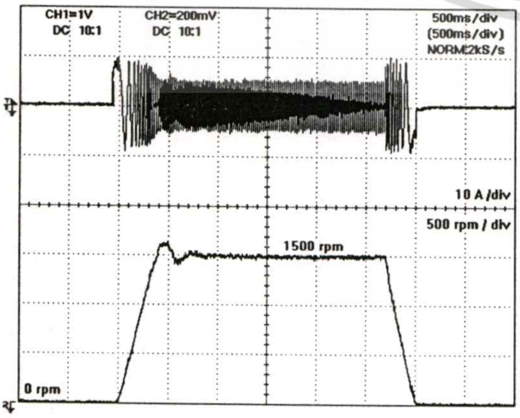


(ข) เส้นทางเดินของกระแสก่อน/หลังใส่ภาระ

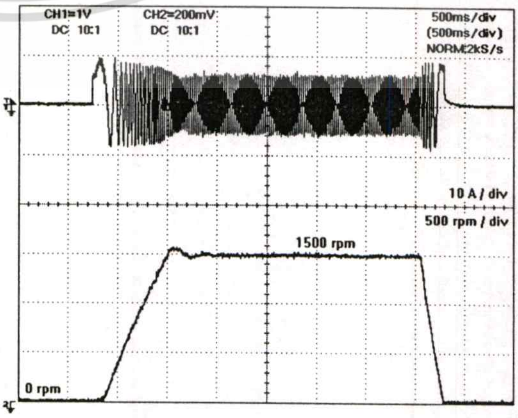
ภาพที่ 6.41 รูปคลื่นกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในช่วงสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าภาระ



ภาพที่ 6.42 ผลการตอบสนองความเร็วรอบเมื่อปลดภาระโหลดแบบทันทีทันใด

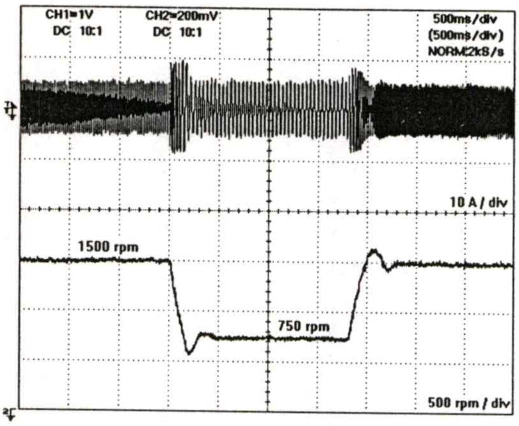


(ก) จาก 0 ถึง 1500 rpm (No-load)

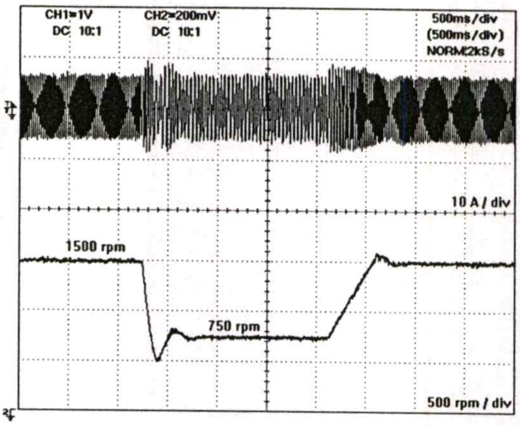


(ข) จาก 0 ถึง 1500 rpm (5 N-m)

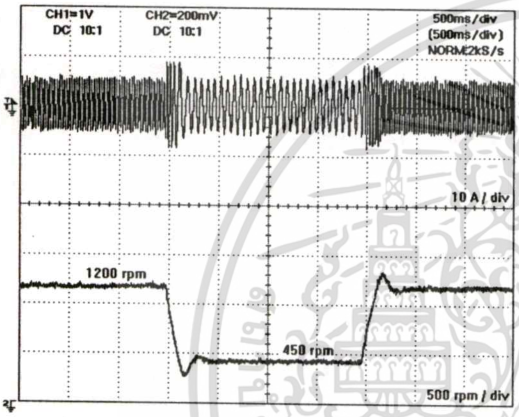
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



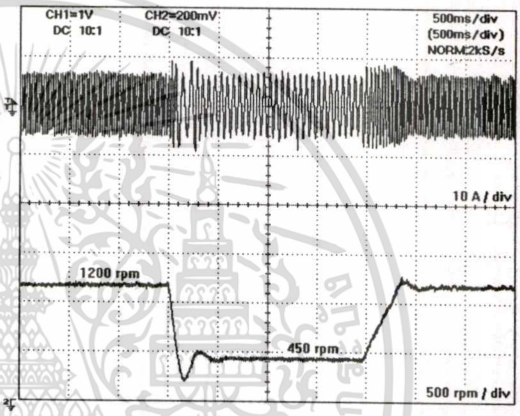
(ค) จาก 1500 ไป 750 ไป 1500 rpm (No-load)



(ง) จาก 1500 ไป 750 ไป 1500 rpm (5 N-m)



(จ) จาก 1200 ไป 450 ไป 1200 rpm (No-load)



(ฉ) จาก 1200 ไป 450 ไป 1200 rpm (5 N-m)

ภาพที่ 6.43 ผลการตอบสนองความเร็วรอบเมื่อคงสภาวะโหลดขนาด 5 นิวตัน-เมตร

จากภาพที่ 6.43 จะเป็นการทดสอบมอเตอร์เพื่อดูผลการตอบสนองความเร็วรอบเมื่อคงสภาวะโหลดขนาด 5 นิวตัน-เมตรไว้ตลอดเวลาและมีการรับคำสั่งการเปลี่ยนแปลงแบบสเตปความเร็ว จะเห็นได้ว่าการทำงานของมอเตอร์ในการรับภาระขนาด 5 นิวตัน-เมตร (ซีกขวา) เมื่อเทียบกับในสภาวะไร้ภาระ (ซีกซ้าย) จะมีผลการตอบสนองต่อความเร็วรอบที่ช้ากว่ากันเล็กน้อย เนื่องมาจากกระบวนการทำงานของการสร้างแรงบิดที่ใช้ในการควบคุมจะมีการทำงานที่สัมพันธ์กับค่าความเร็วรอบและค่าแรงบิดของโหลด จึงทำให้ช่วงเวลาการเข้าสู่ความเร็วรอบคำสั่งที่ใช้มีค่าช้ากว่าเล็กน้อย ดังที่กล่าวถึงหลักการไว้ในบทที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

7.1 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ใช้หลักการควบคุมแบบเฟสเซอร์ เครื่องต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นเพื่อใช้ในขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ได้ผลเป็นที่น่าพอใจและให้ผลที่สอดคล้องกับผลทางทฤษฎีที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งจากการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบแพทเทอร์นของกระแสระหว่างกระแสไซน์อ้างอิงและกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะพบกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีการไต่และติดตามค่าของกระแสไซน์อ้างอิงจริง โดยมีแบนด์ที่ใช้ในการทำงานเท่ากับค่าที่ระบุไว้ในโปรแกรม ซึ่งสามารถสังเกตได้จากเส้นทางเดินของกระแสที่ทำการพล๊อตในโหมด X-Y ของเครื่องวัดรูปคลื่นทางไฟฟ้า ส่วนการทดสอบสภาวะคงตัวที่ใช้หลักการควบคุมแบบเฟสเซอร์นี้จะพบว่าขนาดของค่าแรงดันมูลฐานจะขึ้นอยู่กับค่ากระแสไซน์อ้างอิงและค่าความถี่ที่ใช้ โดยค่าแรงดันมูลฐานจะมีค่าลดลงตามค่าความถี่ที่มีการลดลงเพื่อเป็นการรักษาค่าฟลักซ์ที่เกิดขึ้นที่แอร์แก็ปให้มีค่าคงที่ที่พิกัดตลอดเวลา ส่วนการทดสอบสภาวะการรับภาระเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นไปตามหลักการของการควบคุมความเร็วมอเตอร์และจากกราฟการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความถี่อินเวอร์เตอร์ที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะพบว่าการทำงานดังกล่าวมีความถูกต้องและสอดคล้องกับทฤษฎีที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน ค่าความเร็วที่ได้ ณ สภาวะการรับโหลดจะมีค่าการกระเพื่อมของความเร็วน้อยมากหรืออาจกล่าวได้ว่าความเร็วที่ได้มีความราบเรียบ (Smooth) สูง และจากการทดสอบสภาวะการทำงานแบบสเตปคำสั่งและกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์ ผลลัพธ์การตอบสนองที่ได้ค่อนข้างจะรวดเร็วและมีความแม่นยำในการทำงานค่อนข้างสูง ส่วนการทดสอบสภาวะการทำงานแบบสเตปโหลดจะพบว่าผลการตอบสนองที่ได้ยังมีการทำงานที่ช้าอยู่เนื่องมากจากเหตุผลที่ได้กล่าวไว้ในตอนท้ายของการทดลอง และจากการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้จากการควบคุมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยหลักการเฟสเซอร์ ผลการทดสอบยืนยันได้ว่าเทคนิคการควบคุมความเร็วแบบเฟสเซอร์สามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้อย่างถูกต้องและแม่นยำแต่ยังคงมีข้อเสียในเรื่องของผลการตอบสนองความเร็วต่อเวลาที่ช้าในสภาวะที่มีการสเตปโหลดที่มีน้ำหนักมากๆ อย่างฉับพลัน

7.2 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงถึงการประยุกต์ใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้หลักการควบคุมแบบเฟสเซอร์ การออกแบบใช้วิธีการแบบดิจิตอลเกือบทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมดโดยใช้ตัวควบคุมประมวลผลสัญญาณดิจิตอลเบอร์ DSP56F805 และชุดอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นแบบโมดูลที่มีพิกัดแรงดัน 600 โวลต์ และพิกัดกระแส 30 แอมแปร์ ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขดลวดต่อแบบเดลต้า วัดความเร็วด้วยเอ็นโค๊ดเดอร์ขนาด 500 พัลส์ต่อรอบ

วิธีการควบคุมความเร็วมอเตอร์ใช้หลักการควบคุมแบบเฟสเซอร์ ซึ่งมีการทำงานของวงรอบความเร็วแบบปิดโดยกระบวนการควบคุมแบบพีไอที่มีอัตราสุ่มค่าเฉลี่ยความเร็ว 10 มิลลิวินาที ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกใช้ในการควบคุมกระแสทางด้านโรเตอร์พร้อมกับการชดเชยค่าความถี่สลิปที่จ่ายให้กับชุดอินเวอร์เตอร์ วงรอบการทำงานของสวิตซ์มีค่าเท่ากับ 200 ไมโครวินาทีหรือที่ความถี่ 5 กิโลเฮิรตซ์ ภายในวงรอบการทำงานจะมีการเรียกโปรแกรมย่อยต่างๆ ตามผังการทำงานที่ให้ไว้ในบทที่ 5 ซึ่งโปรแกรมจะใช้เวลาในการประมวลผลประมาณ 60 ไมโครวินาที แสดงว่าสามารถใช้เวลาที่เหลืออีก 140 ไมโครวินาทีในการพัฒนาวิธีการควบคุมได้อีก

การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาดพิกัด 1.5 กิโลวัตต์ โดยการจ่ายไฟ 1 เฟส 220 โวลต์ ให้ทางด้านเข้าของเครื่อง ทางด้านออกจะเป็นไฟ 3 เฟส ต่อเข้ากับมอเตอร์ที่ต่อขดลวดแบบเดลต้า สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้ตั้งแต่ความเร็ว –2400 รอบต่อนาที จนถึง 2400 รอบต่อนาที ปรับความถี่ได้ครั้งละ 0.1 เฮิรตซ์ และในสภาวะที่มีการสั่งให้มอเตอร์หยุดหมุนจะมีการลดความถี่ลงจนกระทั่งถึงความถี่ที่ 0.5 เฮิรตซ์ จะมีการสั่งหยุดสัญญาณขับนำ (ยกเว้นในกรณีที่มีการทดสอบการกลับทางหมุนเพื่อดูผลการตอบสนอง)

ค่าของแรงบิดควบคุม (t_c) ที่ใช้ในการทำงานมีทั้งหมด 72 สเตป (เชิงดิจิตอล) แต่ละสเตปมีค่าเท่ากับ 0.013888 เปอร์ยูนิต ส่วนค่าของความถี่สลิปที่ใช้ในการชดเชยค่าความเร็วรอบที่ใช้ในการทำงานมีทั้งหมด 24 สเตปๆ ละ 0.1 เฮิรตซ์ และที่อัตราสุ่มค่าความเร็วทุกๆ 10 มิลลิวินาที ของวงรอบปิดแบบพีไอจะให้ค่าผิดพลาดไม่เกิน ± 9 รอบต่อนาที ของความเร็วรอบมอเตอร์ที่ได้จากการควบคุมในย่านการทำงานไม่เกินพิกัดความเร็วของมอเตอร์

การทดสอบซึ่งจะกระทำภายใต้สภาวะคงตัวและสเตปโหลดเพื่อดูผลการตอบสนองจะพบว่าหลักการดังกล่าวเหมาะกับการเพิ่มโหลดทีละน้อยๆ (โหลดที่มีลักษณะเป็นแรม) เนื่องจากการควบคุมความเร็วจะอาศัยการตรวจจับของเอ็นโค๊ดเดอร์เป็นหลัก ดังนั้นในการทำงานหากความเร็วที่ได้จากการตรวจจับที่มีช่วงเวลาที่ช้าจะทำให้กรณีของการรับโหลดที่มีลักษณะแบบสเตปมีผลการตอบสนองที่ช้า ส่งผลทำให้ค่าเวลาในการคืนตัวนานกว่าระบบจะกลับเข้าสู่สภาวะเดิม ดังนั้นหากช่วงเวลาการตรววจับเร็วขึ้นก็จะทำให้กระบวนการตอบสนองต่อความเร็วดีขึ้นได้ และจากการทดสอบที่สภาวะคงตัวและการกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์ จะพบว่าผลการตอบสนองเป็นที่น่าพอใจ

7.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้หลักการควบคุมแบบเฟสเซอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งหัวข้อการเสนอแนะในการพัฒนาไว้ดังนี้

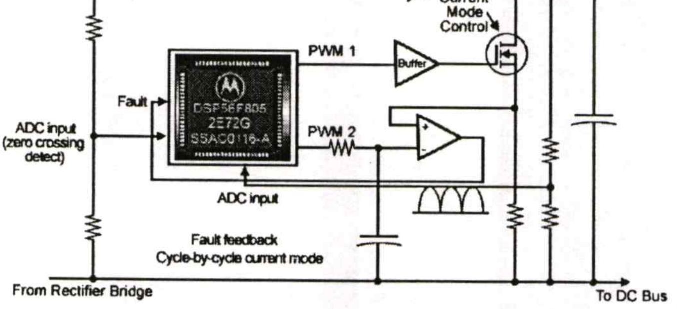
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3.1 ทางด้านซอฟต์แวร์

จากการสร้างและทดสอบจะเห็นได้ว่าคาบการทำงานของสวิตซ์มีช่วงเวลาเหลืออยู่มาก การทำงานอาจจะให้ตัวประมวลดังกล่าวทำการประมวลผลสมการต่างๆ ได้อีก ซึ่งจะเป็นการช่วยลดข้อมูลที่เป็นแบบตาราง (Lookup table) ลงไป ทำให้เนื้อที่ในหน่วยความจำที่ใช้มีค่าน้อยลง ซึ่งเนื้อที่ในหน่วยความจำนี้ส่วนใหญ่จะเป็นขีดจำกัดของตัวประมวลผล ซึ่งหากมีข้อมูลแบบตารางมากในการทำงานก็จำเป็นต้องมีการต่อหน่วยความจำภายนอกเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนในเรื่องของโปรแกรมที่ใช้งานจะพบว่าค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในโปรแกรมจะได้มาจากการทดสอบมอเตอร์แล้วนำค่าที่ได้มากำหนดไว้ในโปรแกรมควบคุมซึ่งเมื่อทำการเปลี่ยนมอเตอร์ก็จะต้องมีการโปรแกรมค่าพารามิเตอร์ใหม่เข้าไป จึงไม่เหมาะกับการพัฒนาเพื่อเป็นประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งการแก้ไขสามารถทำได้โดยการใช้ค่ามาตราฐาน (ค่ากลาง) ที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ทั่วไปมาทำการโปรแกรมไว้ เมื่อมีการใช้งานของพิกัดมอเตอร์ที่ต่างขนาดออกไปก็สามารถเลือกขนาดการทำงานใหม่ได้จากฟังก์ชั่นที่ได้ทำการโปรแกรมไว้นั้นเอง และในเรื่องการตอบสนองความเร็วรอบต่อเวลาที่ยังมีค่าค่อนข้างช้าอยู่นั้น สามารถแก้ไขได้โดยการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วที่มีจำนวนพัลส์สูงเพื่อจะได้มีการลดระยะเวลาการรับค่าลง ส่งผลทำให้ระบบมีการตอบสนองดีขึ้นได้ หรืออาจจะอาศัยการปรับปรุงค่าเกณฑ์ที่ใช้ในการควบคุมให้มีค่าเกณฑ์การตอบสนองที่มากขึ้น

7.3.2 ทางด้านแหล่งจ่ายไฟตรงเพื่อจ่ายให้กับชุดกำลัง

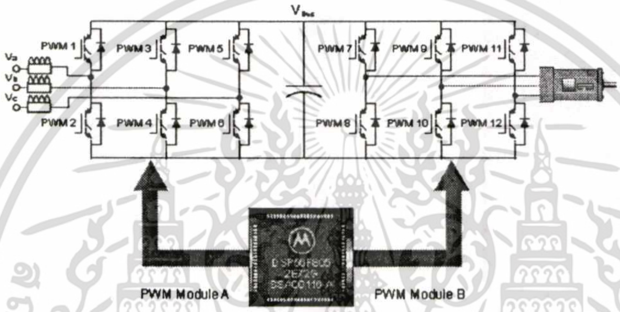
จากผลการทดสอบรูปคลื่นกระแสทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจะมีองค์ประกอบของฮาร์โมนิกส์อันดับต่ำค่อนข้างสูง จึงทำให้ค่าองค์ประกอบกำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าต่ำ เพื่อเป็นการปรับปรุงค่าองค์ประกอบกำลังไฟฟ้าให้ดีขึ้น ควรจะมีการปรับปรุงวงจรภายใน ดังภาพที่ 7.1 แสดงถึงแนวความคิดในการนำฟังก์ชั่นภายในตัวประมวลผลมาทำการควบคุมปรับเปลี่ยนค่าองค์ประกอบกำลังไฟฟ้า ซึ่งในโครงงานวิจัยนี้ยังมีขาสัญญาณเหลือใช้งานอยู่เป็นจำนวนหนึ่ง เช่นอาจจะใช้ขาสัญญาณ GPIO พอร์ต B มาทำการควบคุมสวิตซ์ทางด้านดีซีลิงค์ที่ใช้ในการแก้ไขค่าองค์ประกอบกำลังไฟฟ้า เป็นต้น



ภาพที่ 7.1 การนำ DSP มาใช้ในการควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วตลอดเวลา การควบคุมดังกล่าวจะส่งผลให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ทำงานในโหมดรีเจนเนอร์เรทีฟและส่งถ่ายพลังงานไหลย้อนกลับมายังแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยงเป็นผลทำให้แรงดันตกคร่อมคาปาซิเตอร์สูงทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงไม่คงที่ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อตัวเก็บประจุหรืออุปกรณ์สวิตซ์กำลังได้และทำให้ประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ลดลง เพื่อให้การทำงานและการควบคุมสมบูรณ์แบบจึงขอนำเสนอถึงแนวทางการปรับปรุงภาคคอนเวอร์เตอร์ให้สามารถส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งจะช่วยให้ประหยัดพลังงานอีกทั้งยังเป็นการช่วยแก้ปัญหาความผิดเพี้ยนของกระแสทางด้านอินพุตซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าสูงขึ้นดังแนวความคิดที่ให้ไว้ในภาพที่ 7.2



ภาพที่ 7.2 การนำ DSP มาใช้ในการควบคุมแรงดันทางด้านเข้า

7.3.3 รูปแบบการควบคุม

การควบคุมในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการควบคุมแบบฮีสเตอร์รีซีสคอนโทรล ซึ่งคาบของการสวิตซ์จะไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่จ่ายให้กับโหลด การนำตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลมาใช้ในโครงงานนี้จึงต้องมีการงดใช้ (Disable) ฟังก์ชันบางส่วนที่มีอยู่ภายในตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล เพื่อให้การทำงานและหลักการที่นำเสนอมีความสอดคล้องกัน ทำให้ศักย์ภาพที่น่าจะได้จากตัวประมวลผลมีลดน้อยลง แต่หากมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบจากการควบคุมกระแส (Voltage Source Current Control) ไปเป็นการควบคุมแบบแรงดัน (Voltage Source Voltage Control) โดยการควบคุมอาจจะใช้หลักการควบคุมแบบ SPWM หรือ สเปคเวกเตอร์คอนโทรล จะทำให้ตัวประมวล (DSP) ที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากมีฟังก์ชันพีดับบิวเอ็มที่รองรับการทำงานในลักษณะนี้อยู่ภายในตัวประมวลสัญญาณดิจิตอลเอง อีกทั้งการทำงานที่อยู่ในรูปแบบการควบคุมแบบแรงดัน (Voltage Control) ไม่จำเป็นต้องอาศัยวงจรประวิงเวลาภายนอก (ดังที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อการออกแบบ) เนื่องจากในตัวประมวลผลดังกล่าวมีฟังก์ชันนี้รองรับการทำงานอยู่จึงทำให้ขนาดของโครงงานมีความกระทัดรัดและมีความน่าเชื่อถือของวงจรสูงขึ้น เนื่องจากการทำงานทั้งหมดจะอยู่ในตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Muhammad H. Rashid. **Power Electronics Handbook.** Academic Press, 2001.

[2] Digital Signal Processing Products, "DSP56F801/803/805/807 16 Bit Digital Signal Processing User 's Manual." Motorola, 2000.

[3] Richard Valentine. **Motor Control Electronics Handbook.** McGraw-Hill, 1998.

[4] B.K. Bose. **Power Electronics and Variable Frequency Drives: Technology and Applications.** IEEE Press Marketing. 1996.

[5] ชาญวิทย์ ตั้งสิริวรกุล, "การวิเคราะห์และประเมินคุณสมบัติของเทคนิคเดลต้าม็อดดูเลชั่นที่มีขอบเขตอีสเตอร์รีซีสแบบต่างๆ สำหรับอินเวอร์เตอร์ชนิดจ่ายแรงดัน." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.

[6] Peter Vas. **Vector control of AC Machines.** Clarendon Press, Oxford, 1993.

[7] I. Boldea and S.A. Nasar. **Vector control of AC drives.** CRC Press, Inc. 1992.

[8] D.W. Novotny and T.A. Lipo. **Vector Control and Dynamics of AC Drives.** Clarendon Press, Oxford, 1996.

[9] Werner Leonhard. **Control of Electrical Drives.** 3 rd Edition. Springer-Verlag, 2001.

[10] Kaushik Rajashekara, Atsuo Kawamura and Kouki Matsuse. **Sensorless Control of AC Motor Drives.** IEEE Press, Inc. 1996.

[11] Steven W. Smith. **The Scientist and Engineer 's Guide to Digital Signal Processing.** Second Edition. California Technical Publishing. San Diego, California, 1999.

[12] Digital Signal Processing Products, "DSP56800 Family Manual." Motorola, 2000.

[13] Digital Signal Processing Products, "DSP56F805EVM Hardware Reference Manual." Motorola, 2000.

[14] David Zalac, "DSP5680X Architecture Captures Best of DSP and MCU Worlds." Motorola Inc., 2001

[15] Code Warrior Products, "Code Warrior C Compilers Reference." Metro works, Inc. 2000.

[16] Code Warrior Products, "Code Warrior IDE User Guide." Metro works, Inc. 1999.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[17] Tore M. Underland, Stainar Midttveit and Robert Nilssen., "Phasor Applied Control (PAC) of Induction Motors A New Concept for Servo-Quality Dynamic Performance." Conference on Applied Motion Control, PP. 1-8, June 1986.

[18] จรัล ตั้งวงศ์ชูเกตุ และ วิจิตร กิณเรศ, "การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้หลักการทางเฟสเซอร์." ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , หน้า 363 – 368, 22-23 พฤศจิกายน 2544.

[19] Ned Mohan, Tore M. Underland and William P. Robbins. **Power Electronics: Converters, Applications and Design.** Second Edition. John Wiley&Sons, Inc. New York, 1995.

[20] B.K. Bose, "An Adaptive Hysteresis-Band Current Control Technique of Voltage-Fed PWM Inverter for Machine Drive System." IEEE, Trans. Ind. Elec. Vol37, No.5. October 1990.

[21] R. Krihnan and F.C. Doran, "Study of Parameter Sensitive in High - Performance Inverter-fed Induction Motor Drive Systems." IEEE Transactions on Industry Application, Vol. IA-23, No 4, pp. 623-625, July/August 1987.

[22] R. Krihnan and A.S. Bharadwaj, "Single Chip Microcontroller Implementation of An In-controlled Induction Motor Drive System." IEEE, pp. 265-270, 1989.

[23] Chee-Mun Ong. **Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink.** Prentice Hall, Inc. 1998.

[24] Sergey E. Lyshevski. **Electromechanical System and Applied Mechatronics.** CRC Press, LLC. 1999.

[25] B.K. Bose. **Power Electronics and AC drives.** Prentice-Hall, 1986.

[26] เอกชัย ลีลารัศมี. **คู่มือการใช้งานโปรแกรมเล็ก 6.5** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.

[27] Mitsubishi, "Mitsubishi Semiconductors Power Modules MOS." Mitsubishi, Sep 1998.

[28] โยธิน เปรมปราณีรัชต์. **ระบบเซอร์โวและอิเลคทรอนิกส์คอนโทรลมอเตอร์.** ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2533.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[29] โสภณ สมัยรัฐ, "ระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

[30] โคทม อารียา. **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1 & 2.** ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2544

[31] Paul M. Embree and Bruce Kimble. **C Language Algorithms for Digital Signal Processing**. Prentice Hall, Inc. 1991.

[32] ธันวา ศรีประโมง. **การเขียนโปรแกรมภาษาซี.** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, พิมพ์ครั้งที่ 4, 2538.

[33] มัณฑนา ปราการสมุทร. **การเขียนชุดคำสั่งภาษาซี.** ดวงกมลสมัย, 2534.

[34] Code Warrior Products, "Code Warrior DSP56XXX Assembler Reference." Metro works Inc., 2000.

[35] Peter Vas. **Parameter Estimation Condition Monitoring and Diagnosis of Electrical Machines.** Claredon Press, Inc. Oxford, 1993.

[36] วิริยะ พิเชฐจำเริญ. **เอ.ซี. มอเตอร์คอนโทรล**. คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2529.

[37] พิชิต ลำยอง. **เอกสารประกอบการสอนวิชาเครื่องกลไฟฟ้า**. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2539.

[38] พิชิต ลำยอง. **เอกสารประกอบการทดลองวิชาเครื่องกลไฟฟ้า 2.** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

รายละเอียดทั่วไปของมอเตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

1. ข้อมูลในแผ่นป้ายของมอเตอร์ (Name Plate)

ยี่ห้อ	MULLER	Number	ZJLOITH-02A 5-2001	Box No.	330500330101		
Volt	220 / 380	4 Pole 50 Hz	2 HP	INS Class F	DATE 2001-2		
Amp	6.3 / 3.6	RPM 1430	Weight 25 kg.	Frame	90L	Serial 119	

2. ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ

ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ได้ทำจากการทดสอบ [37,38] จะมีรายละเอียดดังนี้

ค่าความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ (R_s) เท่ากับ	3.965	โอห์ม
ค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์ (R_r) เท่ากับ	3.4777	โอห์ม
ค่าความต้านทานในขดแมกนีไตซิ่งค์ (R_m) เท่ากับ	893	โอห์ม
ค่าความเหนี่ยวนำทางด้านสเตเตอร์ (X_s) เท่ากับ	6.060132	โอห์ม
ค่าความเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์ (X_r) เท่ากับ	6.060132	โอห์ม
ค่าความเหนี่ยวนำในขดแมกนีไตซิ่งค์ (X_m) เท่ากับ	91.7772	โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การคำนวณค่าโมเมนต์ของความเฉื่อย

1. การคำนวณหาค่าโมเมนต์ของความเฉื่อย

การคำนวณหาค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยของมอเตอร์โดยทั่วไปมีวิธีการวัดอยู่ด้วยกัน 2 วิธี ซึ่งวิธีแรกได้แก่ การตรวจจับอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วเทียบกับเวลาโดยใช้อุปกรณ์บันทึกผล (Speed Recorder) ในการหาค่าโมเมนต์ของความเฉื่อย ซึ่งวิธีการนี้ค่อนข้างจะยุ่งยาก การทดสอบสามารถทำได้โดยการควบคุมให้มอเตอร์หมุนอยู่ที่ค่าความเร็วรอบที่ค่าความถี่และแรงดันพิกัดในสภาวะไม่มีโหลด จากนั้นทำการตัดไฟที่จ่ายให้กับมอเตอร์เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสโลปความเร็วโดยอาศัยสมการที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

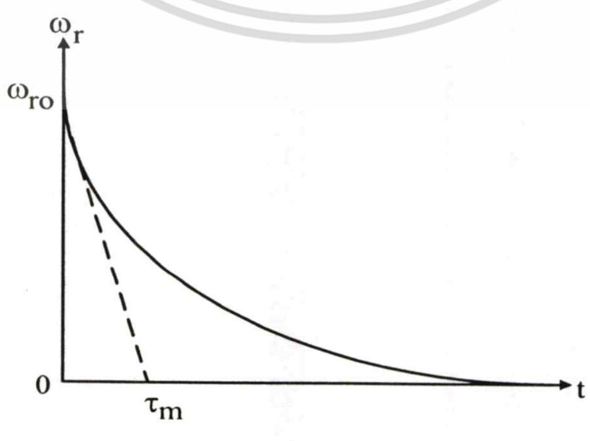
$$T_e = J_m \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \omega_r + T_L \qquad (ข.1)$$

เนื่องจากการตัดไฟที่จ่ายให้กับมอเตอร์ จะทำให้เทอมของ T_e มีค่าเท่ากับศูนย์ โดยที่เทอม T_L ก็จะมีค่าเท่ากับศูนย์เช่นเดียวกันเนื่องจากอยู่ในสภาวะ ไม่มีโหลด ดังนั้นจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$B_m \omega_r = -J_m \frac{d\omega_r}{dt} \qquad (ข.2)$$

$$B_m \omega_r(s) = -J_m \left[s\,\omega_r(s) - \omega_{ro} \right] \qquad (ข.3)$$

เมื่อ ω_{ro} คือ ค่าความเร็วเชิงมุมของความเฉื่อย



ภาพที่ ข.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเทียบกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (ข.3) ค่าของความเร็วเชิงมุมจะมีค่าเท่ากับ

$$\omega_r(s) = \frac{\omega_{ro}}{\left(S + \frac{B_m}{J_m}\right)} = \frac{\omega_{ro}}{\left(S + \frac{1}{\tau_m}\right)} \qquad (ข.4)$$

เมื่อทำการแปลงให้อยู่ในรูปโดเมนต์เวลาจะได้

$$\omega_r(t) = \omega_{ro} \cdot e^{-1/\tau_m} \qquad (ข.5)$$

จากสมการ (ข.5) หากเราสามารถทราบตำแหน่งของความเร็วแต่ละจุดได้ เราก็สามารถหาค่าของเทอม τ_m ได้เช่นเดียวกัน นั่นก็หมายถึงสามารถหาค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยที่เกิดขึ้นได้นั่นเอง ส่วนวิธีที่สองได้แก่การใช้ข้อมูลทางด้านกายภาพ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วิธีการนี้ในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ของความเฉื่อย ซึ่งจากสูตรการหาค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยจะมีค่าเท่ากับ

$$J_m = \frac{1}{2} m r^2 \qquad (ข.6)$$

เมื่อ J_m คือ ค่าโมเมนต์ของความเฉื่อย (กิโลกรัม - เมตร^2)

m คือ น้ำหนักของมวลที่ต้องการคำนวณหาค่าโมเมนต์ (กิโลกรัม)

r คือ ค่ารัศมีของมวลที่ต้องการคำนวณหาค่าโมเมนต์ (เมตร)

ในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยของมอเตอร์ที่ทำการทดสอบนี้จะประกอบไปด้วยเทอมของค่าความเฉื่อยที่เกิดจากโรเตอร์และล้อช่วยแรง (Pulley) ซึ่งในการคำนวณเราจะต้องทราบข้อมูลทางด้านกายภาพเหล่านั้นเสียก่อน โดยข้อมูลต่างๆ ที่ใช้มีดังนี้

- โรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก มีน้ำหนัก	6	กิโลกรัม
- เส้นผ่าศูนย์กลางของโรเตอร์	8	เซนติเมตร
- น้ำหนักของล้อช่วยแรง (Pulley)	2.5	กิโลกรัม
- เส้นผ่าศูนย์กลางของล้อช่วยแรง (Pulley)	15	เซนติเมตร

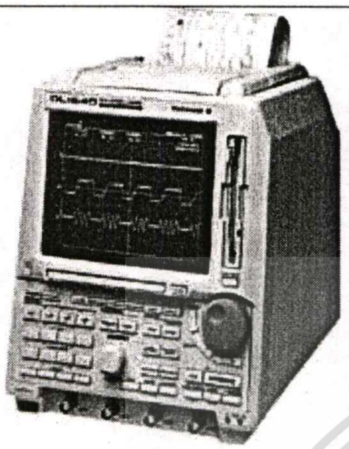
จากนั้นทำการแทนค่าต่างๆ ที่ได้ลงในสมการ (ข.6) จะได้ค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยรวมของโรเตอร์และล้อช่วยแรง (Pulley) เท่ากับ

$$J_m = \frac{1}{2} \cdot 6 \cdot \left(\tfrac{0.08}{2}\right)^2 + \frac{1}{2} \cdot 2.5 \cdot \left(\tfrac{0.15}{2}\right)^2$$

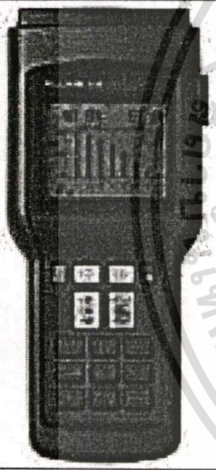
$$= 0.01183 \quad \text{กิโลกรัม - เมตร}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

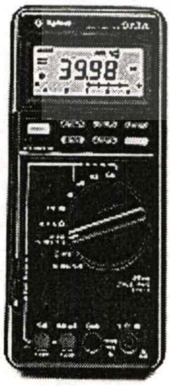
ภาคผนวก ค.
เครื่องมือวัดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์



ผลิตภัณฑ์	Digital Oscilloscope (YOKOGAWA)	
รุ่น	DL1520/L (2 Channel)	
รายละเอียด	150 MHz bandwidth 200 MS/s sampling rate on one channel or 100 MS/s on two channels (DL1520/L) 8 bit vertical resolution DC to 30 MHz, 850V (DC + AC peak) 2% DC accuracy, Internal low pass filter	



ผลิตภัณฑ์	Power Harmonics Analyzer (FLUKE)	
รุ่น	FLUKE 41B	
รายละเอียด	5 to 600 Vrms, 1.00 to 1000 Arms up to 600 kw., 6 Hz to 99.9 Hz Indicates fundamental to 13 th hamonices. Measures crest factor, PF, DPF, K-factor %THD, %THD-R	



ผลิตภัณฑ์	Multi Meter (Hewlett Packard)	
รุ่น	973A	
รายละเอียด	True RMS 20 kHz Accuracy = 0.1% Vac or Vdc : 0 to 1000 Volts. Iac or Idc : 0 to 10 Amperes.	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตภัณฑ์	Current Probe (CHAUVIN ARNOUX)
รุ่น	E3N
รายละเอียด	Current Probe 10 – 100 Ampere / 1 Volt Input 100 A Peak Max Frequency: DC to 100 kHz. (@ 3 db) Output 10 mV/A, 100 mV/A CAT III

ผลิตภัณฑ์	Digital Clamp (YOKOGAWA)
รุ่น	2343 02
รายละเอียด	Amp 40A / 400A / 1000 A Volt 40V / 400V / 600 V Ohm 400 / 4k Ohm

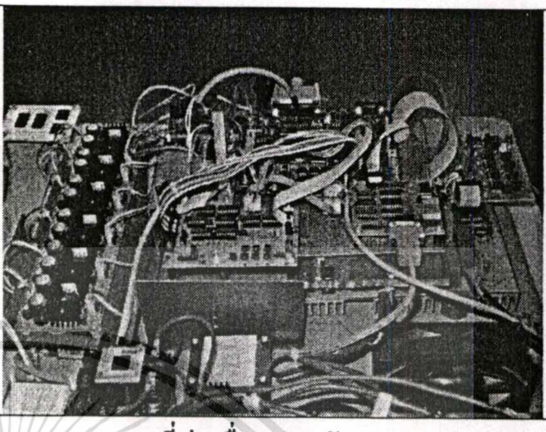
ผลิตภัณฑ์	Digital Tachometers (YOKOGAWA)
รุ่น	3631
รายละเอียด	Measurement range : 60.0 to 1999.9 rpm and 60 to 19,999 rpm Detection distance 30 to 300 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

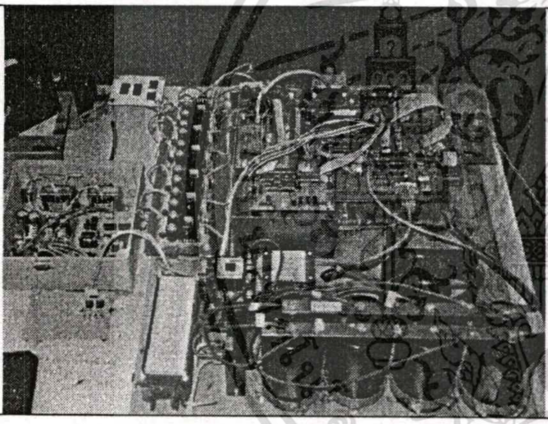
ภาคผนวก ง.

เครื่องต้นแบบและภาพโครงงานโดยรวมของโครงงานวิจัย

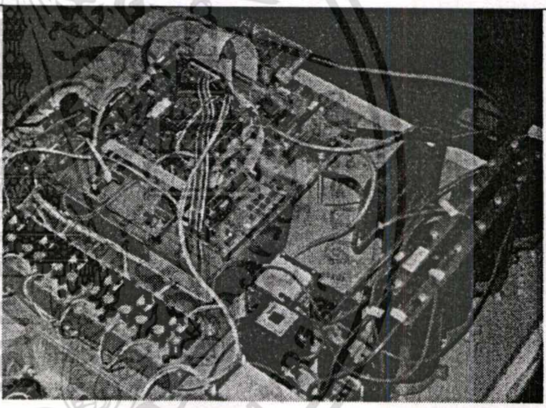
ภาพโครงงานโดยรวม



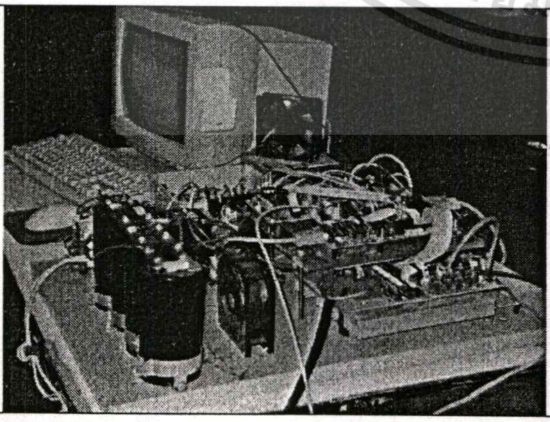
ชุด DSP ที่ต่อเชื่อมสำหรับการควบคุม



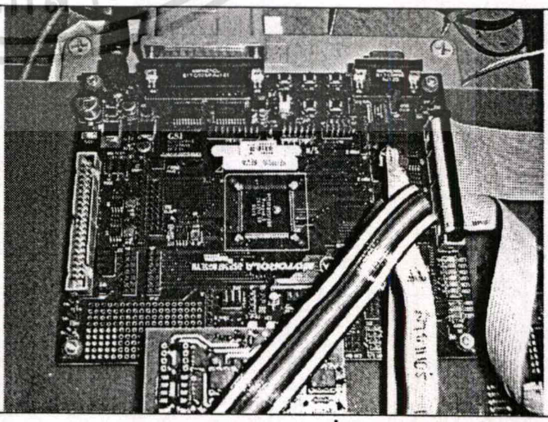
ภาพโดยรวมของวงจรกำลังและวงจรป้องกัน



ภาพโดยรวมของวงจรกำลังและวงจรป้องกัน

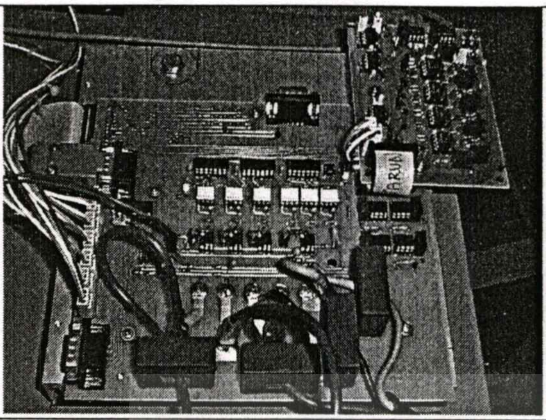


ภาพโดยรวมของวงจรกำลังและวงจรป้องกัน

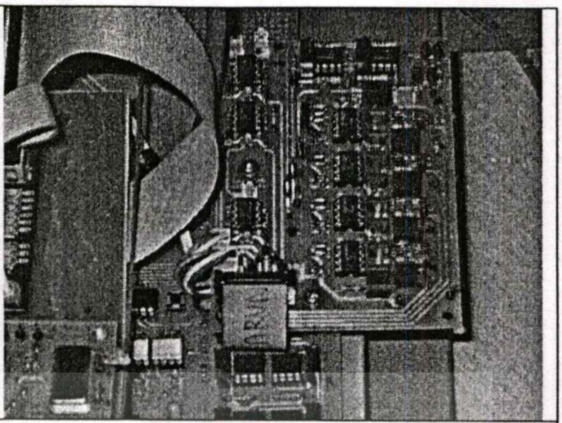


บอร์ด DSP56F805EVM ที่ใช้ในโครงงาน

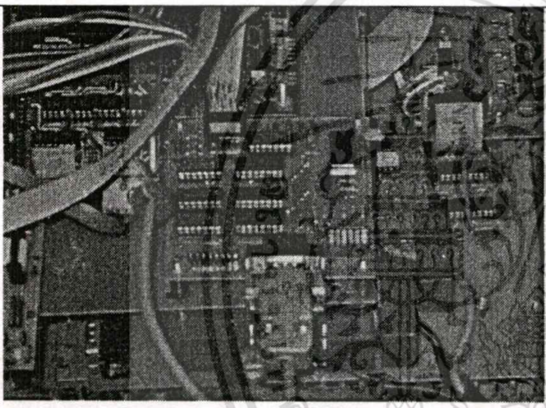
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



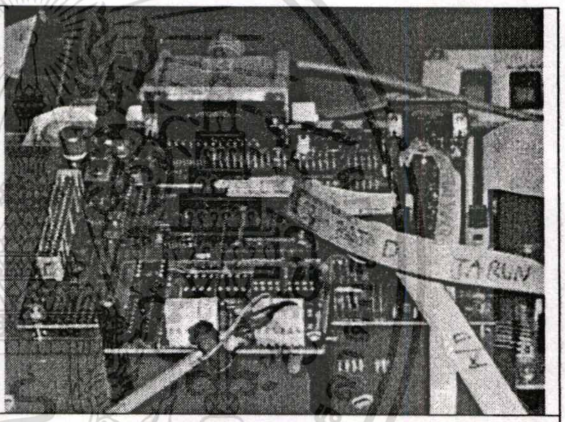
ชุดอินเวอร์เตอร์สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์



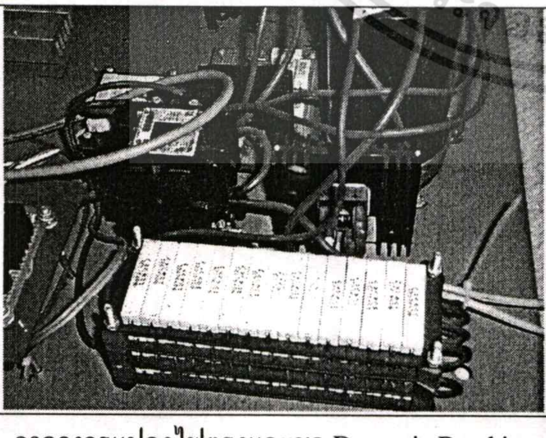
ชุดตรวจจับกระแส 3 เฟส และกระแสที่ดีซีบัส



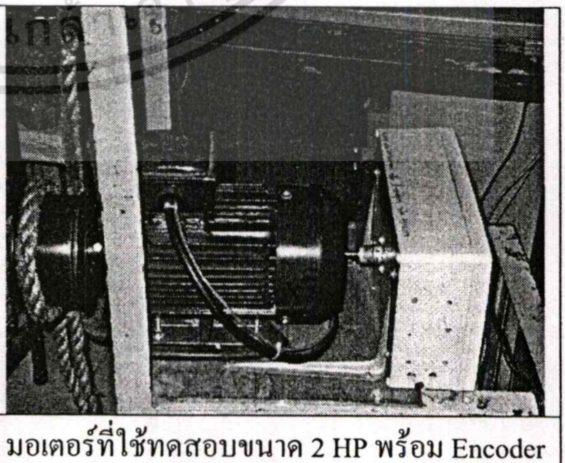
ชุดสร้างช่วงเวลาเดดไทม์ (dead time)



ชุดแปลงระดับสัญญาณจาก Encoder



ภาควงจรแปลงไฟตรงและชุด Dynamic Breaking



มอเตอร์ที่ใช้ทดสอบขนาด 2 HP พร้อม Encoder

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.
ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ในประชุมวิชาการ

1. จรัล ตั้งวงศ์ชูเกตุ และ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ, "เตาหุงต้มอาหารโดยการเหนี่ยวนำโดยใช้วงจรออสซิลเลตด้วยตัวเอง." ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 22 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 272 – 275, 2 – 3 ธันวาคม 2542.

2. จรัล ตั้งวงศ์ชูเกตุ และ วิจิตร กิณเรศ, "การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้หลักการทางเฟสเซอร์." ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 363 – 368, 22 - 23 พฤศจิกายน 2544.

3. จรัล ตั้งวงศ์ชูเกตุ เอกวิทย์ หายักวงษ์ และวิจิตร กิณเรศ, "การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบเฟสเซอร์ โดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลในการควบคุมการทำงาน." วิศวสารลาดกระบัง ปีที่ 19, ฉบับที่ 3, เดือนกันยายน, 2545.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายจรัล ตั้งวงศ์ชูเกตุ เกิดเมื่อวันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2518
ที่อำเภอป้อมปราบศัตรูพ่าย จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ปี พ.ศ. 2536

สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาไฟฟ้า
จากโรงเรียนเทคโนโลยีช่างอุตสาหกรรมกรุงเทพ จ. กรุงเทพมหานคร

ปี พ.ศ. 2538

สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง
จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนนทบุรี จ.นนทบุรี

ปี พ.ศ. 2538 ถึง 2541

เป็นอาจารย์ประจำสอนวิชาไฟฟ้า – คอมพิวเตอร์
ที่โรงเรียนเทคโนโลยีช่างอุตสาหกรรมกรุงเทพ (หัวหมาก) จ. กรุงเทพมหานคร

ปี พ.ศ. 2541

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า เกียรตินิยมอันดับ 2
จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปี พ.ศ. 2542

วิศวกรไฟฟ้า บริษัท พศินา จำกัด

ปี พ.ศ. 2543

วิศวกรออกแบบระบบไฟฟ้า บริษัท มิตรเทคนิคคัลคอนซัลแท้นท์ จำกัด

ปี พ.ศ. 2544 ถึง ปัจจุบัน

วิศวกรไฟฟ้า ระดับ 4 กองออกแบบสถานีไฟฟ้า
ฝ่ายออกแบบสถานี และสายส่ง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (ส่วนกลาง)

ปี พ.ศ. 2545 ถึง ปัจจุบัน

อาจารย์พิเศษ โรงเรียนช่างการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้