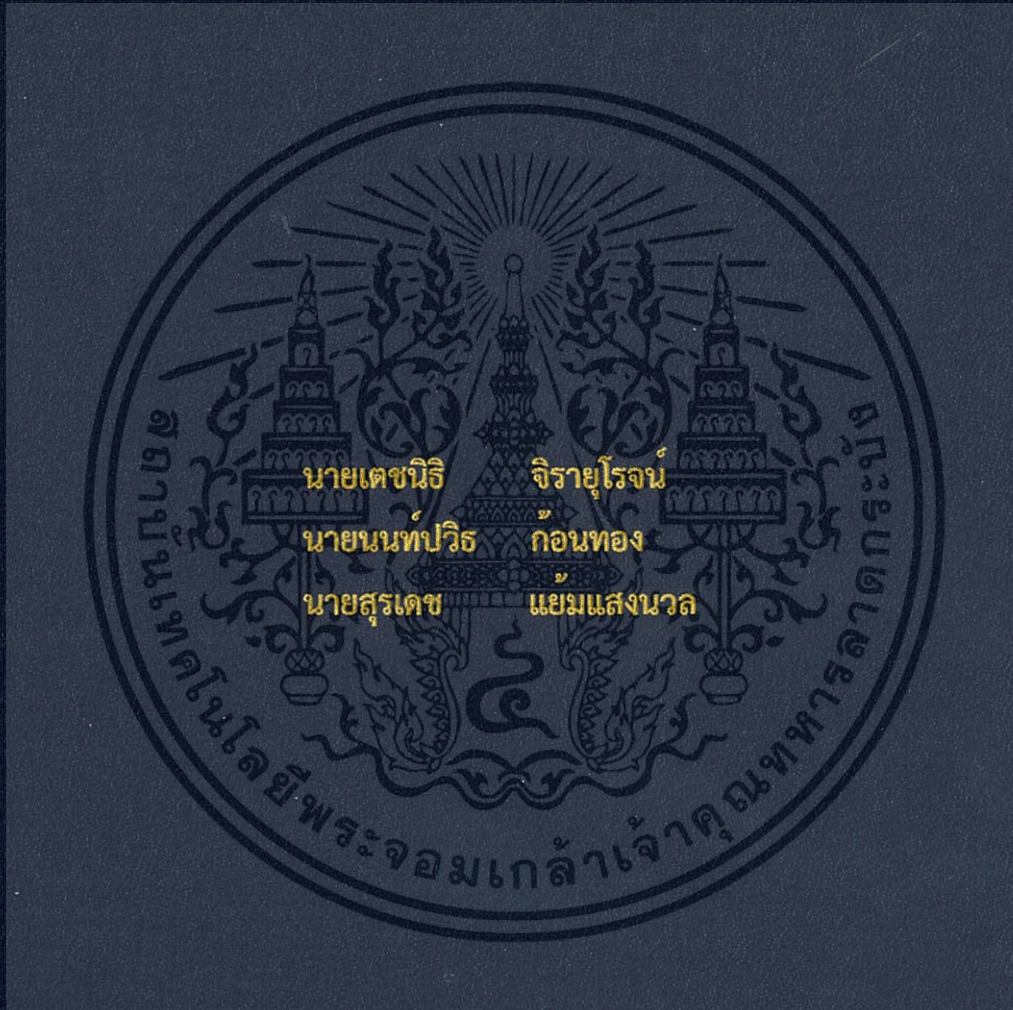


ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

โดยใช้ตัวควบคุม NI cRIO

PMSM DRIVE SYSTEMS FOR ELECTRIC VEHICLES

USING NI cRIO CONTROLLER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

โดยใช้ตัวควบคุม NI cRIO

PMSM DRIVE SYSTEMS FOR ELECTRIC VEHICLES

USING NI cRIO CONTROLLER



T143851

นายเดชนิธิ

จิรายุโรจน์

นายนนท์ปวีร์

ก้อนทอง

นายสุรเดช

แย้มแสงนวล

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน... 143851

วัน,เดือน,ปี 04 มี.ค. 2559



ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

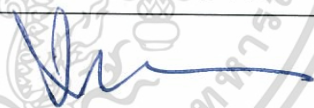
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาขาวิศวกรรมอัตโนมัติ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เชิงโรตารีชนิดแม่เหล็กถาวรสำหรับยานยนต์
ไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุม NI cRIO
PMSM DRIVE SYSTEMS FOR ELECTRIC VEHICLES
USING NI cRIO CONTROLLER

นักศึกษาผู้จัดทำ นายเตชนิธิ จิรายุโรจน์ รหัสนักศึกษา 55010439
นายนนท์ปวิธ ก้อนทอง รหัสนักศึกษา 55010601
นายสุรเดช แยมแสงนวล รหัสนักศึกษา 55011356

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมอัตโนมัติ
ปีการศึกษา 2558

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท	ลายมือชื่อ
รศ.ประภาษ อุดคึกิมาพันธ์	

หัวข้อปริญญานิพนธ์	ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุม NI cRIO		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายเดชนิธิ จิรายุโรจน์	รหัสนักศึกษา	55010439
	นายนนท์ปวิธ ก้อนทอง	รหัสนักศึกษา	55010601
	นายสุรเดช แย้มแสงนวล	รหัสนักศึกษา	55011356
อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา	รศ.ประภาส อุคคกิมพันธ์ 2558		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม NI cRIO โดยมีการนำเสนอเทคนิคในการสร้างระบบขับเคลื่อนของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในรถยนต์โตโยตาอัลพาร์ดเป็นกรณีศึกษา การควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนล้อใช้วิธีการ FOC ส่วนการควบคุมมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมันใช้วิธีการ Six-step Control โปรแกรมการควบคุมระบบขับเคลื่อนและส่วนติดต่อผู้ใช้งานถูกพัฒนาด้วย LabVIEW 2014 จากผลการทดลองที่ได้ยืนยันได้ว่า ระบบขับเคลื่อนที่นำเสนอสามารถควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนล้อและมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมัน ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

Thesis Title	PMSM DRIVE SYSTEMS FOR ELECTRIC VEHICLES USING NI cRIO CONTROLLER
Student	Mr.Teachanit Jirayuroj Mr.Nonpavit Kontong Mr.Suradet Yamsangnuan
Advisor	Assoc. Prof. Prapart Ukakimaparn
Year	2015

ABSTRACT

This thesis presents the permanent-magnet-synchronous-motor (PMSM) drive systems for electric vehicles using NI cRIO controller. A technique to implement the drive systems of two PMSMs used in Toyota Alphard electric car is proposed as an illustrative case study. The drive system of the traction motor is controlled by Field Oriented Control (FOC) method, while the drive system of the hydraulic pump is controlled by Six-step control method. The control program as well as graphic user interface (GUI) is developed by using LabVIEW 2014. Experimental results confirm that the studied traction motor and hydraulic pump can be controlled by the proposed drive systems under specific conditions.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้นักศึกษาชั้นปีที่ 4 เสนอเป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2558 ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ และช่วยเหลือดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีจากหลายฝ่าย ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.ประภาส อุคคกิมาทันธุ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ ที่กรุณาได้รับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของปริญญาานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมถึงวิธีการแก้ไขปัญหาอุปสรรคต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นปัญหาทางด้านวิชาการ หรือปัญหาในการดำเนินงาน อีกทั้งเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ เครื่องมือในการทำงาน รวมทั้งให้กำลังใจ ตั้งแต่เริ่มทำปริญญาานิพนธ์จนสำเร็จ

ผู้จัดทำขอขอบคุณช่างฝีมือประจำอู่รถยนต์พิริยะพงศ์

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุน และกำลังใจ ซึ่งเป็นกำลังใจที่สำคัญแก่คณะผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์ให้ดำเนินไปจนสำเร็จ

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอขอบคุณตึกสาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติที่เป็นสถานที่ทำปริญญาานิพนธ์นี้ ตลอดจนบุคคลต่าง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือที่ผู้จัดทำไม่สามารถกล่าวชำนามได้ทั้งหมดในที่นี้ รวมถึงเพื่อนรุ่นพี่ และรุ่นน้องภายในสาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยสนับสนุนช่วยเหลือ คอยให้กำลังใจที่ดีเสมอมา คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และความปรารถนาดีของท่านเป็นอย่างยิ่ง

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	4
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 รายละเอียดของปริญญานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 การขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรในรถยนต์ไฟฟ้า.....	6
2.1 กล่าวนำ.....	6
2.2 มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร.....	6
2.2.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าของ PMSM.....	8
2.2.2 การสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่ขดลวดสเตเตอร์.....	9
2.3 อินเวอร์เตอร์ชนิดสามเฟสสำหรับ PMSM.....	10
2.4 การควบคุม PMSM ด้วยหลักการ FOC.....	11
2.5 การควบคุม PMSM ด้วยหลักการ Six-Step Control.....	16
2.6 การใช้ PMSM ในรถยนต์ไฟฟ้าที่ศึกษา.....	17
บทที่ 3 ระบบขับเคลื่อน PMSM โดยใช้ตัวควบคุม NI cRIO ที่นำเสนอ.....	20
3.1 กล่าวนำ.....	20
3.2 ตัวควบคุม NI cRIO ที่ใช้ในระบบขับเคลื่อน.....	20
3.2.1 องค์ประกอบ Ni cRIO ในระบบที่นำเสนอ.....	21
3.2.2 สถาปัตยกรรมของตัวควบคุม cRIO บนโปรแกรม LabVIEW.....	23
3.2.3 I/O Assignment.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การควบคุม PMSM ที่ใช้ในการขับเคลื่อนล้อรถยนต์.....	26
3.3.1 รีโซลเวอร์ใน PMSM ที่ใช้ขับเคลื่อนล้อรถยนต์	26
3.3.2 เซนเซอร์วัดกระแสใน PMSM ที่ใช้ขับเคลื่อนล้อรถยนต์.....	28
3.3.3 การออกแบบวิธีการควบคุม FOC ด้วย LabVIEW 2014.....	30
3.4 การควบคุม PMSM ที่ใช้ในการจ่ายแรงดันน้ำมัน.....	31
3.4.1 ฮอลล์เซนเซอร์ของ PMSM ที่ใช้ในการจ่ายแรงดันน้ำมัน	31
3.4.2 การออกแบบวิธีการควบคุมแบบ Six-Step Control ด้วย LabVIEW 2014.....	33
3.5 การออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน GUI.....	35
3.5.1 Real-Time GUI.....	35
3.5.2 FPGA GUI.....	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและสรุปผล.....	39
4.1 กล่าวนำ.....	39
4.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	39
4.2.1 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของ PMSM ที่ใช้ขับเคลื่อนล้อ.....	39
4.2.2 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมัน.....	40
4.2.3 การทดลองขับ PMSM ขับเคลื่อนล้อ.....	40
4.2.4 การทดลองขับมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมัน.....	50
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป.....	52
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	52
5.2 ปัญหาและอุปสรรค.....	52
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	53
เอกสารอ้างอิง.....	54

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 I/O Assignment Module NI-9403 TTL Digital I/O Module.....	25
3.2 I/O Assignment Module NI-9215 4channels, $\pm 10V$, 16bits, Analog input.....	26
3.3 ความสัมพันธ์ของคาร์ทีเซียนเวกเตอร์ที่อ่านได้อ้างอิงกับ Space Vector ของมอเตอร์.....	27
3.4 ความสัมพันธ์แรงดันที่อ่านได้จากเซนเซอร์กับค่ากระแสที่มอเตอร์.....	29
3.5 ความสัมพันธ์ตำแหน่งของโรเตอร์มอเตอร์ขับเคลื่อนแรงดันน้ำมันกับสัญญาณฮอลล์เซนเซอร์ ..	33
3.6 การสร้างสัญญาณของอินเวอร์เตอร์สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์แรงดันน้ำมันในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา.....	35
4.1 การทดลองที่ 1.....	40
4.2 การทดลองที่ 2.....	42
4.3 การทดลองที่ 3.....	44
4.4 ผลการทดลองของมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมัน.....	51

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างส่วนประกอบของรถยนต์ไฟฟ้า.....	1
1.2 ส่วนประกอบชุดขับเคลื่อนล้อหน้ารถยนต์อัลพาร์ดในกรณีศึกษา	2
1.3 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับของมอเตอร์.....	3
1.4 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนPMSM ที่นำเสนอ.....	3
2.1 แผนผังการจำแนกประเภทของมอเตอร์ตามชนิดของแหล่งจ่าย	6
2.2 โครงสร้างของมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร 3 เฟส ที่มีขั้วแม่เหล็ก 4 ขั้ว	7
2.3 แบบจำลองทางไฟฟ้าของ PMSM	8
2.4 แบบจำลองทางสเตเตอร์ของ PMSM	8
2.5 การสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่ขดลวดสเตเตอร์	9
2.6 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์สามเฟสสำหรับ PMSM	10
2.7 รูปแบบของ Space Vector Modulation.....	10
2.8 บล็อกไดอะแกรมของ FOC	11
2.9 Clarke's Transformation.....	12
2.10 Park's Transformation.....	13
2.11 วงจรสมมูลของโรเตอร์.....	13
2.12 Space Vector Modulation ของ FOC.....	15
2.13 Block Diagram ของ Six-Step Control	16
2.14 ควบคุมแรงดันด้วย PWM.....	16
2.15 Space Vector Modulation ของ Six-Step Control.....	17
2.16 รูปคลื่นที่เกิดจากการควบคุมแบบ Six-Step Control	17
2.17 Gear Diagram ของชุดขับเคลื่อนล้อรถยนต์อัลพาร์ด.....	18
2.18 ส่วนประกอบชุดเกียร์ขับเคลื่อนล้อหน้ารถยนต์โตโยต้าอัลพาร์ด	18
2.19 ส่วนประกอบของตัวส่งกำลัง CVT	19
3.1 ส่วนประกอบของตัวควบคุม NI cRIO	21
3.2 องค์ประกอบ Ni cRIO ในระบบที่นำเสนอ.....	21
3.3 อุปกรณ์ NI-9083.....	22
3.4 อุปกรณ์ NI-9215.....	22
3.5 สถาปัตยกรรมของตัวควบคุม cRIO บนโปรแกรม LabVIEW	23

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.6 ระดับชั้นการติดต่อสื่อสารในตัวควบคุม cRIO	24
3.7 ความสัมพันธ์ของคาร์ริโซลเวอร์ที่อ่านได้อ้างอิงกับ Space Vector ของมอเตอร์.....	28
3.8 เซนเซอร์ตรวจวัดกระแส AB-200	28
3.9 การปรับค่ากระแสของเซนเซอร์	29
3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (แกน y) กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ ตัวเซนเซอร์ตรวจวัดกระแส (แกน x)	29
3.11 การควบคุมแบบ FOC ในโปรแกรม LabVIEW	30
3.12 การสร้างสัญญาณสำหรับอินเวอร์เตอร์.....	30
3.13 ลักษณะการติดตั้งฮอลล์เซนเซอร์	31
3.14 ลักษณะการตรวจจับของฮอลล์เซนเซอร์	32
3.15 ความสัมพันธ์ตำแหน่งของโรเตอร์มอเตอร์ขับเคลื่อนแรงดันน้ำมันกับสัญญาณฮอลล์เซนเซอร์	33
3.16 แผนผังโปรแกรม Six-Step Control.....	34
3.17 เทคนิคการสร้างสัญญาณขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์ของ Six-Step Control.....	34
3.18 แผนผัง GUI ของระบบที่นำเสนอ.....	35
3.19 Real-Time GUI	36
3.20 ค่าพารามิเตอร์ที่สามารถปรับแต่งได้ใน FPGA GUI สำหรับ PMSM ขับเคลื่อนล้อ	38
3.21 ค่าพารามิเตอร์ที่สามารถปรับแต่งได้ใน FPGA GUI สำหรับมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมัน.....	38
4.1 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.0015$ $S_p = 60\%$	40
4.2 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.0015$ $S_p = 60\%$	41
4.3 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.0015$ $S_p = -60\%$	41
4.4 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.0015$ $S_p = -60\%$	41
4.5 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.0015$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 60\%$	42
4.6 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.0015$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 60\%$	42
4.7 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.0015$ $f_{cutoff} = 100$ Hz และ $S_p = 60\%$	43
4.8 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.0015$ $f_{cutoff} = 100$ Hz และ $S_p = 60\%$	43
4.9 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.0015$ $f_{cutoff} = 200$ Hz และ $S_p = 60\%$	43
4.10 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.0015$ $f_{cutoff} = 200$ Hz และ $S_p = 60\%$	44
4.11 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.0010$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 60\%$	45

สารบัญญภาพ (ต่อ)

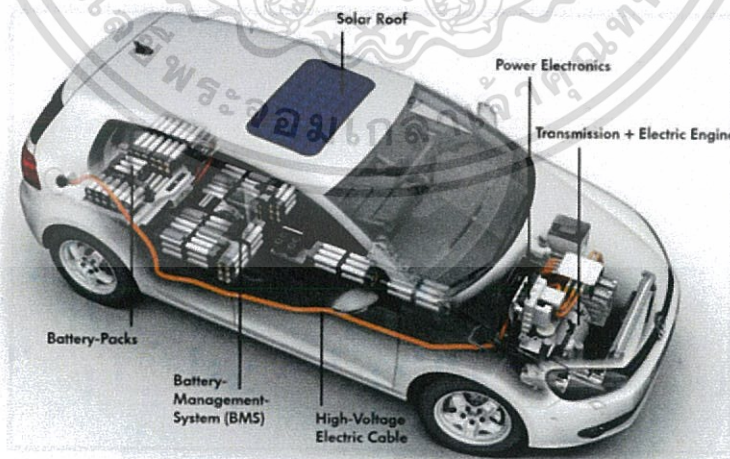
ภาพที่	หน้า
4.12 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.0010$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 60\%$	45
4.13 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.0015$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 60\%$	45
4.14 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.0015$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 60\%$	46
4.15 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.0020$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 40\%$	46
4.16 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.0020$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 40\%$	46
4.17 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.0025$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 60\%$	47
4.18 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.0025$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 60\%$	47
4.19 โครงสร้างพื้นฐานของ FOC.....	47
4.20 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.002$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 40\%$	48
4.21 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.002$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 40\%$	48
4.22 กราฟแสดงค่ากระแส I_d / I_q	48
4.23 กราฟแสดงค่าแรงดัน V_d / V_q	49
4.24 กราฟแสดงค่าแรงดัน V_A / V_B	49
4.25 กราฟ SVPWM.....	49
4.26 สัญญาณฮอลล์เซ็นเซอร์ของมอเตอร์ในแต่ละเฟส.....	50
4.27 สัญญาณ PWM	50

บทที่ 1

บทนำ

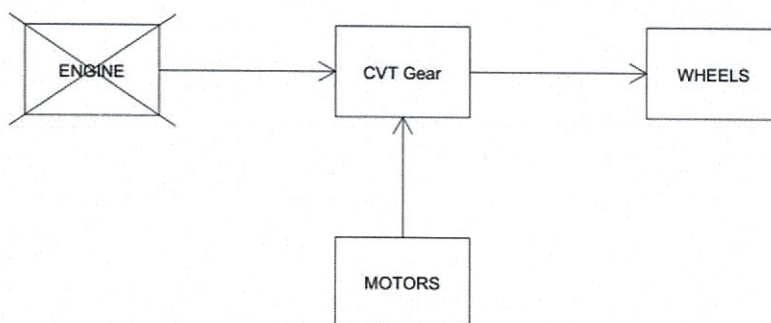
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ในปัจจุบันยานยนต์ถือว่ามีสำคัญอย่างมากในชีวิตประจำวัน นับว่าเป็นปัจจัยหนึ่งในการดำรงชีวิตที่ขาดไม่ได้ ในระบบรถยนต์นั้นการใช้พลังงานเป็นเรื่องที่สำคัญมากเรื่องหนึ่ง ตั้งแต่แรกเริ่มระบบรถยนต์ถูกออกแบบขึ้นมาให้ใช้พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิง ที่เป็นเครื่องยนต์ประเภทสันดาปภายใน (Internal Combustion Engine: ICE) นำมาใช้อย่างแพร่หลายในระบบรถยนต์ต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นรถยนต์ส่วนบุคคล รถบรรทุก รถโดยสารประจำทาง แต่มีข้อเสียคือ การใช้พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิงให้กับการสันดาปของเครื่องยนต์มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานเฉลี่ยที่ต่ำกว่า 30% ถือว่าเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานอย่างมาก และยังก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ดังนั้นพลังงานไฟฟ้านั้นถือว่าเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหา จึงเริ่มมีการพัฒนา และออกแบบให้รถยนต์ใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้น ระบบแบบเดิมก็ถูกพัฒนากลายเป็นระบบรถยนต์แบบไฮบริด (Hybrid Vehicle: HV) โดยเป็นการนำมอเตอร์ไฟฟ้าเข้ามาทำงานร่วมกับเครื่องยนต์ ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้านั้นมีประสิทธิภาพการใช้งานเฉลี่ยอยู่ที่ 85%-90% หรือมากกว่า แต่ระบบรถยนต์แบบไฮบริดนี้ยังคงใช้เครื่องยนต์ในการทำงานเป็นหลักอยู่ จากนั้นพลังงานไฟฟ้าก็ถูกนำเข้ามาใช้ในยานยนต์มากขึ้นเรื่อย ๆ จนพัฒนามาเป็นระบบรถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) ซึ่งจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนเพียงอย่างเดียว ทำให้การใช้พลังงานนั้นมีประสิทธิภาพสูงที่สุด และยังไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย นับว่าเป็นนวัตกรรมใหม่ และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน



ภาพที่ 1.1 ตัวอย่างส่วนประกอบของรถยนต์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



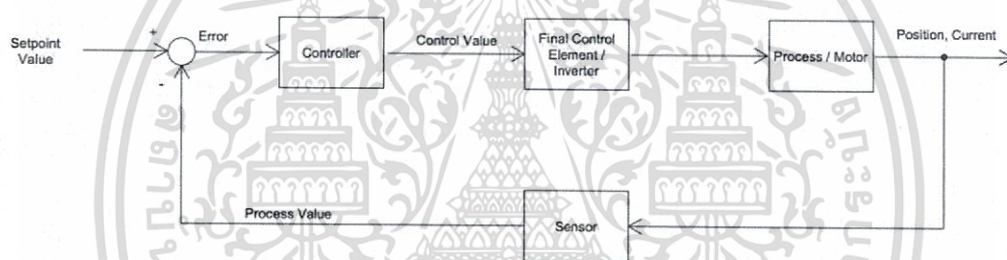
ภาพที่ 1.2 ส่วนประกอบชุดขับเคลื่อนล้อหน้ารถยนต์อัลพาร์ดในกรณีศึกษา

ภาพที่ 1.1 แสดงตัวอย่างส่วนประกอบของรถยนต์ไฟฟ้า ที่มีการใช้เครื่องยนต์พลังงานไฟฟ้า (Electric Engine) โดยส่วนมากเครื่องยนต์พลังงานไฟฟ้าจะนิยมใช้มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Motor: PMSM) แบบสามเฟส ซึ่งจะมีข้อดีในเรื่องของโครงสร้างที่แข็งแรงทนทาน ไม่ต้องบำรุงรักษามากนัก มีประสิทธิภาพที่สูง รวมถึงอัตราสูญเสียพลังงานในตัวมอเตอร์ที่ต่ำ ในปัญญานิพนธ์นี้ได้นำเอาเครื่องยนต์ไฟฟ้าจากขากรยนต์โตโยต้า อัลพาร์ดไฮบริดแบบขับเคลื่อนสี่ล้อมาศึกษา เพื่อออกแบบระบบขับเคลื่อน PMSM โดยทำการถอดเครื่องยนต์ที่เป็นส่วนการใช้พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิงออก เหลือเพียงแต่ส่วนที่เป็นไฟฟ้า ในส่วนระบบขับเคลื่อนของรถที่ใช้ในกรณีศึกษานี้ถูกแบ่งเป็นสองส่วนด้วยกันคือ ส่วนขับเคลื่อนล้อหน้า และล้อหลัง ชุดขับเคลื่อนล้อหน้านั้นได้รับกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้า และถูกส่งผ่านเกียร์ที่เป็นตัวส่งกำลังชนิด Continuous Variable Transmission (CVT) ก่อนที่จะถูกส่งต่อไปยังล้อรถดังภาพที่ 1.2 โดยที่มอเตอร์ในชุดเกียร์ขับเคลื่อนล้อหน้าจะมีทั้งหมดสองตัว ตัวแรกสำหรับส่งกำลังในการขับเคลื่อนล้อ และมอเตอร์ตัวที่สองมีหน้าที่จ่ายแรงดันน้ำมันให้ชุดเกียร์สามารถทำงานได้ ในส่วนของชุดขับเคลื่อนล้อหลังจะเป็นมอเตอร์ส่งกำลังไปที่ล้อโดยตรง แต่วิธีการขับเคลื่อนเหมือนกับมอเตอร์ล้อหน้า เนื่องด้วยข้อจำกัดในเรื่องของเวลาในการศึกษา และออกแบบดังนั้นในโครงการนี้จึงได้เลือกที่จะจัดทำระบบสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าชนิด PMSM ที่ใช้ในเกียร์ขับเคลื่อนล้อหน้าเพียงอย่างเดียว

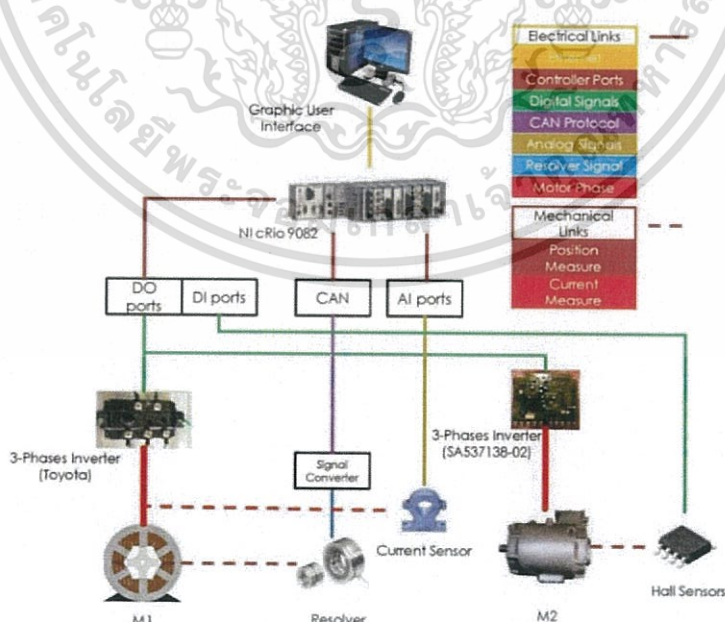
ในภาพที่ 1.3 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมมอเตอร์โดยทั่วไปซึ่งเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ที่ต้องการสัญญาณจากเซนเซอร์ในการวัดค่าตำแหน่งขั้วของมอเตอร์เพื่อใช้สำหรับสร้างสัญญาณควบคุมมอเตอร์ให้ถูกต้อง แล้วนำเข้ามาประมวลผลในระบบจากนั้นสัญญาณควบคุมจะถูกส่งออกไปยังหน่วยควบคุมสุดท้ายหรืออินเวอร์เตอร์เพื่อสั่งงานมอเตอร์

ในระบบขับเคลื่อน PMSM ที่ใช้เป็นกรณีศึกษาดังแสดงในภาพที่ 1.4 จะแบ่งระบบควบคุมออกเป็นสองระบบย่อยสำหรับมอเตอร์ทั้งสองตัวคือ มอเตอร์ตัวแรก (M1) สำหรับส่งกำลังไปที่ล้อนั้น จะใช้วิธีควบคุมแบบ Field Oriented Control (FOC) ที่เป็นการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลในมอเตอร์ เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้ามีผลต่อแรงบิดในมอเตอร์โดยตรง วิธีการนี้จึงเป็นวิธีการที่

เหมาะสมที่สุดในการควบคุมมอเตอร์ที่ขับเคลื่อน เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่มาพร้อมกับมอเตอร์นี้คือ รีโซลเวอร์ ซึ่งนอกจากจะเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดตำแหน่งแล้วจำเป็นต้องมีเซนเซอร์ตรวจวัดกระแสเป็นตัวป้องกันในระบบด้วย และมอเตอร์ตัวที่สอง (M2) สำหรับจ่ายแรงดันน้ำมันนั้น ในที่นี้จะเลือกใช้วิธีการควบคุมแบบ Six-Step Control ซึ่งเป็นการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมมอเตอร์แทน เนื่องจากมีรูปแบบที่ง่ายกว่า FOC มาก และระบบนี้ต้องการแค่ความเร็วของมอเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดแรงดันเพียงพอสำหรับการทำงานของตัวส่งกำลัง CVT และใช้เพียงเซนเซอร์ตำแหน่งเป็นตัวป้องกันเท่านั้น ซึ่งเซนเซอร์วัดตำแหน่งที่มาพร้อมกับมอเตอร์นี้เป็นชนิดฮอลล์เซนเซอร์ การใช้รูปแบบ Six-Step Control จึงเพียงพอสำหรับการควบคุมมอเตอร์ตัวที่สอง หลักการทำงานทั้งสองระบบควบคุมจะถูกสร้างบนโปรแกรม LabVIEW 2014 และใช้ตัวควบคุม NI cRIO ในการควบคุมทั้งหมด รวมถึงการอ่านค่าเซนเซอร์ การติดต่อสื่อสารแบบแคนบัส (CAN Bus) ที่เป็นมาตรฐานในรถยนต์ และมีหน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ (Graphic User Interface: GUI) สำหรับดูค่าตัวแปรต่าง ๆ ในระบบ



ภาพที่ 1.3 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับของมอเตอร์



ภาพที่ 1.4 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อน PMSM ที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1. สร้างระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิด PMSM ที่ใช้ในเครื่องยนต์ของกรณศึกษาได้โดยใช้ตัวควบคุม NI cRIO ซึ่งมีการเขียนโปรแกรมด้วย LabVIEW 2014 ได้
2. สร้างโปรแกรมควบคุมแบบ FOC ให้สามารถใช้งานกับมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนล้อยนต์ได้
3. สร้างโปรแกรมควบคุมแบบ Six-Step Control ให้สามารถใช้งานกับมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมันได้
4. สร้างส่วน GUI เพื่อสั่งงาน และแสดงผลการทำงานของระบบที่น่าเสนอได้

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ใช้ชุดเกียร์ขับเคลื่อนรถยนต์ของโตโยต้าอัลพาร์ท ซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์ 2 ตัว และตัวส่งกำลัง CVT
2. ใช้บอร์ดขับเคลื่อนยี่ห้อโตโยต้า สำหรับมอเตอร์ M1 และใช้วิธีการควบคุมแบบ FOC ให้สามารถควบคุมกระแสในมอเตอร์ได้ โดยใช้รีโซลเวอร์ในการตรวจจับตำแหน่งมอเตอร์
3. ใช้บอร์ดขับเคลื่อนรุ่น SA537138-02 สำหรับมอเตอร์ M2 และใช้วิธีการควบคุมแบบ Six-Step control ให้สามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ที่ให้แรงดันเพียงพอสำหรับการทำงานของตัวส่งกำลัง CVT ใช้ฮอลล์เซ็นเซอร์ในการตรวจจับตำแหน่งมอเตอร์
4. ใช้งานตัวควบคุม NI cRIO รุ่น 9082 ที่มีการเขียนโปรแกรมด้วย LabVIEW 2014 ในการออกแบบสร้างสัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้วยหลักการควบคุมแบบคือ FOC และ Six-Step Control ได้

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ระบบขับเคลื่อน PMSM สามเฟส ที่ใช้งานในเครื่องยนต์ไฟฟ้าในกรณศึกษาได้ โดยระบบที่น่าเสนอสามารถนำระบบไปประยุกต์ใช้งานในระบบรถยนต์ไฟฟ้าอื่น ๆ ได้จริง
2. โมเดลการควบคุมมอเตอร์ชนิด PMSM สามเฟสแบบวิธี FOC และ Six-Step Control

1.5 รายละเอียดของปริิญาานิพนธ์

ปริิญาานิพนธ์ในฉบับนี้จัดทำทั้งหมด 5 บท โดยแต่ละบทมีรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำโดยในบทนี้จะอธิบายถึงความเป็นมาและความสำคัญของปริิญาานิพนธ์ วัตถุประสงค์ ขอบเขตการศึกษา และผลที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 การขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรในรถยนต์ไฟฟ้า บทนี้จะอธิบายถึงพื้นฐานความรู้เกี่ยวกับมอเตอร์ และหลักการทำงานของเกียร์ CVT

- บทที่ 3 ระบบขับเคลื่อน PMSM โดยใช้ตัวควบคุม NI cRIO ในบทนี้จะอธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการออกแบบซอฟต์แวร์ระบบควบคุมมอเตอร์ของรถยนต์
- บทที่ 4 ผลการทดลองและสรุปผลในบทนี้จะอธิบายถึงผลการทดสอบองค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบควบคุมมอเตอร์รถยนต์
- บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะในบทนี้จะอธิบายถึงบทสรุปของปริญญาานิพนธ์ ทั้งหมด ปัญหาที่เกิดขึ้น และข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

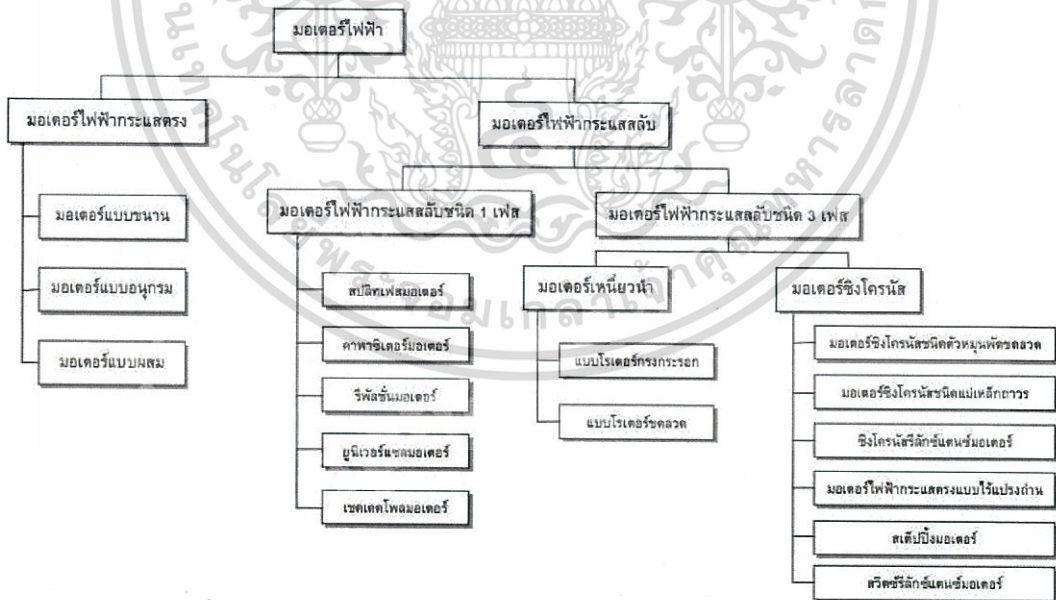
การขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรในรถยนต์ไฟฟ้า

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการขับเคลื่อน PMSM ในรถยนต์ไฟฟ้าที่นำเสนอ เริ่มจากรายละเอียดของมอเตอร์ และชนิดอินเวอร์เตอร์ที่ใช้สำหรับ PMSM จากนั้นจะอธิบายถึงหลักการในการควบคุมมอเตอร์ที่ใช้ในระบบที่นำเสนอคือ FOC และ Six-Step Control รวมถึงการใช้ PMSM ในรถยนต์ที่ศึกษาว่ามีความเกี่ยวข้องกันอย่างไร

2.2 มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร [1]

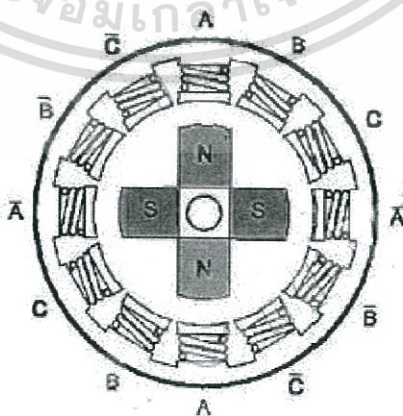
ในภาพที่ 2.1 แสดงแผนผังการจำแนกชนิดของมอเตอร์โดยแบ่งตามชนิดของแหล่งจ่ายที่ใช้ มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวرنั้นถูกจัดอยู่ในกลุ่มมอเตอร์กระแสลับสามเฟสแบบซิงโครนัส ซึ่งลักษณะที่สำคัญของมอเตอร์ประเภทซิงโครนัสคือ ความเร็วที่เพลาของมอเตอร์นั้นจะสอดคล้องโดยตรงกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิด โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ขดลวดสเตเตอร์ จากนั้นโรเตอร์ที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กถาวรก็จะเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามลักษณะของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนขดลวดสเตเตอร์



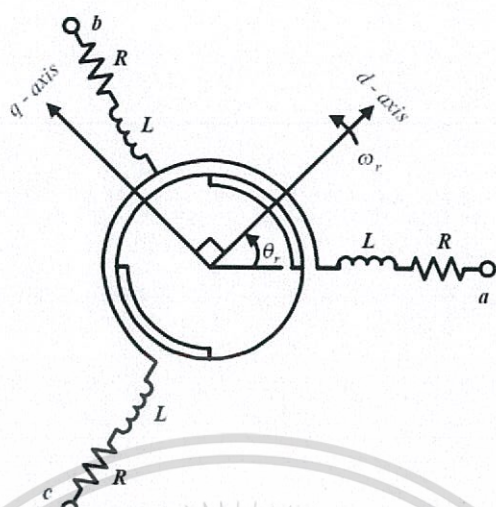
ภาพที่ 2.1 แผนผังการจำแนกประเภทของมอเตอร์ตามชนิดของแหล่งจ่าย

มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรหรือ PMSM เป็นที่นิยมใช้กันมากในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นมอเตอร์ที่มีสัดส่วนแรงบิดต่อน้ำหนักสูง ทำให้มีผลตอบสนองในการควบคุมที่รวดเร็ว มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่ำ ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา เมื่อเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีกำลังเท่ากัน และมีความเร็วรอบสูงสุดสูงกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มีการกระจายความร้อนได้ดี ค่าความสูญเสียต่ำ ไม่ต้องบำรุงรักษาปรังถ่าน ไม่มีมลภาวะทางเสียงเนื่องจากไม่มีเสียงที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างปรังถ่าน และคอมมิวเตเตอร์ ไม่มีการฟุ้งกระจายของผงถ่าน และไม่เกิดประกายไฟ ทำให้สามารถนำไปใช้ในที่อันตรายได้ เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีแก๊สหรือน้ำมันที่ไวไฟ และทำงานโดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม โรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรจะเปลี่ยนจากการใช้ขดลวดพันรอบโรเตอร์มาเป็นการใช้แม่เหล็กถาวรฝังเข้าไปในโรเตอร์แทน ปัญหาของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรคือ การไม่สามารถปรับค่ากระแสของสนามแม่เหล็กที่เกิดจาก โรเตอร์ได้ ซึ่งทำให้ไม่สามารถปรับค่าตัวประกอบกำลัง แรงบิดขณะเริ่มเดินรอบต่ำ และแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับภายในมีค่าแปรตามความเร็ว ข้อดีของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรคือ ไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดเพื่อสร้างสนามที่ตัวโรเตอร์ทำให้ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด

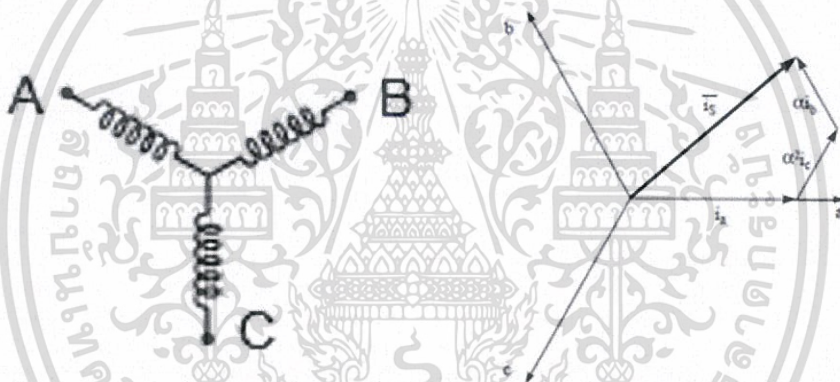
ภาพที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร 3 เฟส ที่มีขั้วแม่เหล็ก 4 ขั้ว (2 คู่ขั้ว) ประกอบด้วยขดลวดที่อยู่กับที่เรียกว่าขดลวดสเตเตอร์ (Stator Winding) และส่วนที่เคลื่อนที่เรียกว่าโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวร โดยมีช่องอากาศ (Air gap) คั่นกลางระหว่างทั้งสองส่วน ซึ่งโครงสร้างสเตเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรเหมือนกับมอเตอร์ซิงโครนัส 3 เฟสทั่วไปที่จ่ายไฟให้ขดลวดที่โรเตอร์คือ มีขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส พันอยู่ในร่องสลอต (Slot) โดยที่ขดลวดมีการวางให้มีการกระจายเป็นรูปแบบไซน์ (Sinusoidal Distribution) เพื่อสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าให้หมุนเป็นวงกลม ขณะที่ขดลวดบนโรเตอร์ถูกแทนด้วยแม่เหล็กถาวรทำให้ไม่มีค่าสูญเสียจากขดลวด ถ้าเปรียบเทียบกับมอเตอร์ที่มีขดลวดที่กำลังเท่ากัน



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร 3 เฟส ที่มีขั้วแม่เหล็ก 4 ขั้ว



ภาพที่ 2.3 แบบจำลองทางไฟฟ้าของ PMSM



ภาพที่ 2.4 แบบจำลองทางสเตเตอร์ของ PMSM

2.2.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าของ PMSM

แบบจำลองทางไฟฟ้าของ PMSM ดังภาพที่ 2.3 สามารถแบ่งได้ 2 ส่วนคือ ส่วนสเตเตอร์ และส่วนโรเตอร์ ในส่วนของสเตเตอร์แสดงดังภาพ 2.4 จะเป็นลักษณะขดลวดแบบสามเฟสต่อในลักษณะของ Wye เรียกชื่อแต่ละขดว่า a , b และ c หรือ u , v และ w ในส่วนแกนอ้างอิงของขดลวดสเตเตอร์จะเรียกว่าคือ abc - axis

จากแบบจำลองของ PMSM ในภาพที่ 2.3 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการแรงดันสามเฟส ได้ดังนี้

$$U_{abc} = Ri_{abc} + \frac{d}{dt}(Li_{abc} + \lambda_{pm}(\theta)) \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $\frac{d\lambda_{pm}(\theta)}{dt}$ คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Back emf) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

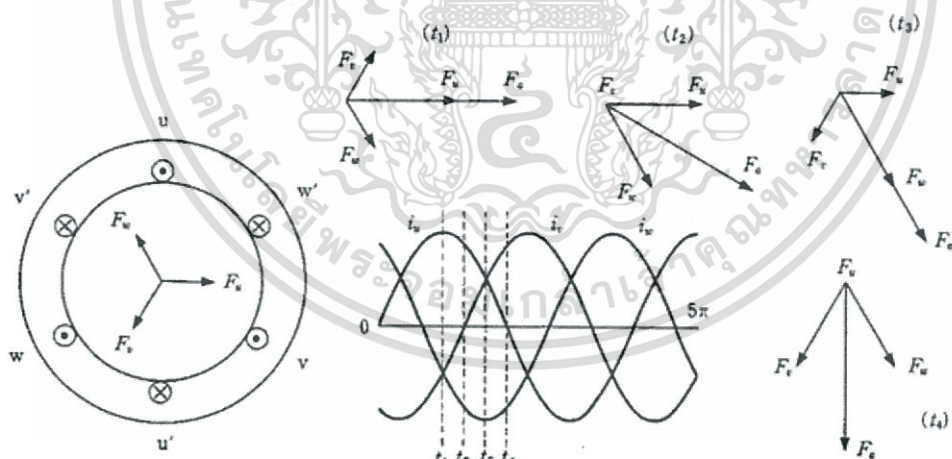
$$\frac{d\lambda_{pm}(\theta)}{dt} = -\omega_r \lambda_{pm} \begin{Bmatrix} \sin(\theta_r) \\ \sin(\theta_r - 2\pi/3) \\ \sin(\theta_r + 2\pi/3) \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

แทนสมการที่ (2.2) ลงในสมการที่ (2.1) จะได้

$$\left. \begin{aligned} U_a &= R_s i_a + L \frac{d}{dt} i_a - \omega_r \lambda_{pm} \sin(\theta_r) \\ U_b &= R_s i_b + L \frac{d}{dt} i_b - \omega_r \lambda_{pm} \sin(\theta_r - 2\pi/3) \\ U_c &= R_s i_c + L \frac{d}{dt} i_c - \omega_r \lambda_{pm} \sin(\theta_r + 2\pi/3) \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

2.2.2 การสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่ขดลวดสเตเตอร์ [2]

ภาพที่ 2.5 (ก) แสดงขดลวดที่เหมือนกัน 3 ขด ได้แก่ uu' , vv' และ ww' เรียงตัวโดยทำมุม $2\pi/3$ [rad] ซึ่งกันและกัน เมื่อลัดวงจรขั้ว u' , v' และ w' และจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ตามที่แสดงในภาพที่ 2.5 (ข) ให้กับขั้ว u , v และ w เมื่อเวลาเท่ากับ t_1 , t_2 , t_3 และ t_4 ในขดลวดแต่ละขดตามทิศทางแกนหมุนจะเกิดแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำตัดกัน และมีขนาดแปรผันตามกระแสตามภาพที่ 2.5 (ค) แรงลัพท์ของแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำ จะมีขนาดคงที่ค่าหนึ่งตามรูป เป็นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม $\omega_0 = 2\pi f$ [rad/s] ทำให้บริเวณนั้นเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้น



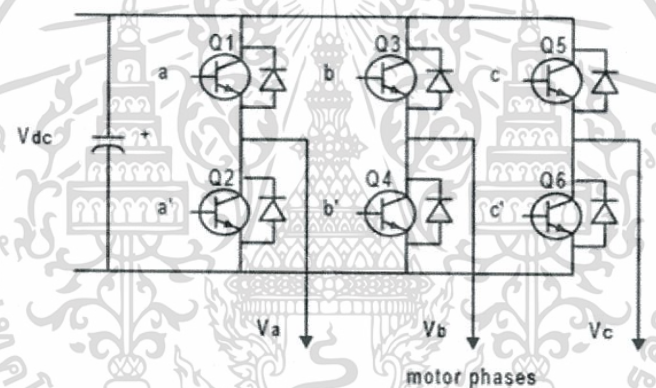
ก) ขดลวดสเตเตอร์ ข) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดสเตเตอร์ ค) เส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำ

ภาพที่ 2.5 การสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่ขดลวดสเตเตอร์

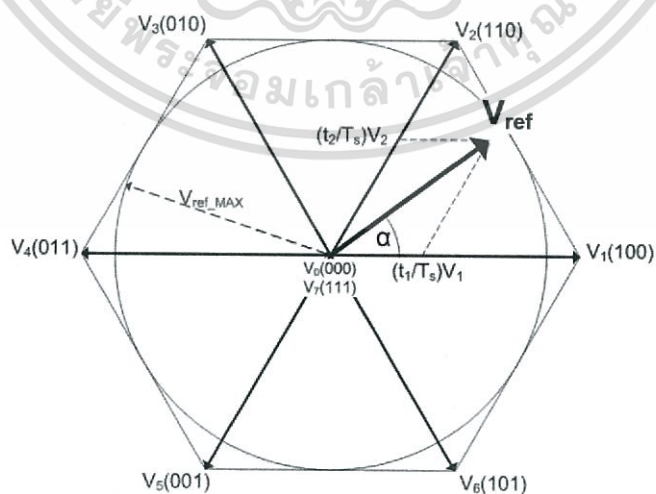
2.3 อินเวอร์เตอร์ชนิดสามเฟสสำหรับ PMSM [3]

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยขนาดของ อินพุท เอาท์พุท และกำลังทั้งหมดที่อินเวอร์เตอร์นั้นมาจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ โครงสร้างพื้นฐานภายในจะประกอบด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ในการส่งผ่านกำลังจากแหล่งจ่ายให้กับโหลด ในปริยายานิพนธ์นี้จะใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสเป็นตัวส่งผ่านกำลังให้กับมอเตอร์ ดังภาพที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ใช้สำหรับ PMSM

Space Vector Modulation [4] เป็นเทคนิคที่ใช้กับอินเวอร์เตอร์ในการสร้างสัญญาณควบคุมมอเตอร์โดยการควบคุมสวิตช์ทั้ง 6 ตัว ให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์ โดยอิงจากการสร้างสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนสเตเตอร์ ภาพที่ 2.7 แสดงรูปแบบ Space Vector Modulation ของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งความสัมพันธ์ของการควบคุมสวิตช์ที่อินเวอร์เตอร์กับเอาท์พุทที่เกิดขึ้นแสดงดังตารางที่ 2.1



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์สามเฟสสำหรับ PMSM



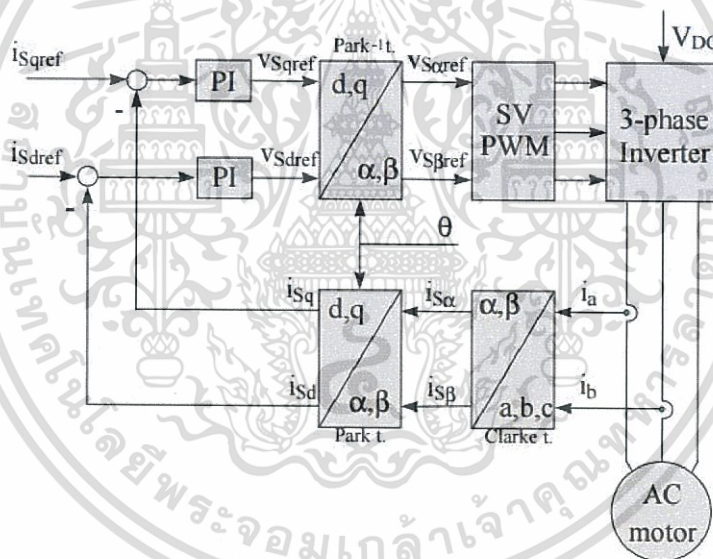
ภาพที่ 2.7 รูปแบบของ Space Vector Modulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สถานะของอินเวอร์เตอร์กับค่าแรงดันเอาต์พุต

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

2.4 การควบคุม PMSM ด้วยหลักการ FOC [5]



ภาพที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมของ FOC

การควบคุมด้วยหลักการ FOC หรือการควบคุมการปรับตามสนามแม่เหล็กที่เป็นการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลในมอเตอร์ เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้ามียผลต่อแรงบิดในมอเตอร์โดยตรง จึงทำการวัดกระแสย้อนกลับเพื่อนำกลับมาคิดมุมของตัวโรเตอร์ โดยใช้รูปแบบการควบคุมทางคณิตศาสตร์ที่เทียบเคียงได้กับมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งวิธีการนี้จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุม PMSM ขับเคลื่อนล้อ

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับค่อนข้างสลับซับซ้อน ดังนั้นเพื่อให้การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงเกิดแนวความคิดที่จะมองมอเตอร์ไฟฟ้า

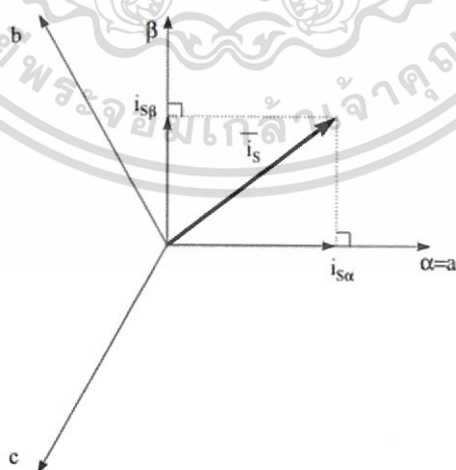
กระแสสลับให้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อง่ายต่อการควบคุม ดังภาพที่ 2.8 ที่แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ FOC ซึ่งทำได้โดยโอนย้ายตัวแปรต่าง ๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับให้มาอยู่บนแกนอ้างอิงของโรเตอร์ ($d - q$) ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะแปลงกระแสไฟฟ้า 3 เฟส ให้เหลือ 2 ตัวแปร จากเวกเตอร์ a, b, c ให้อยู่ในระนาบ α, β โดย α และ β เป็นแกนที่ตั้งฉากกัน (Clarke Transformation) ดังภาพที่ 2.9 ซึ่งเปรียบเทียบเหมือนการแปลงรูปแบบจากมอเตอร์สามเฟส เป็นมอเตอร์กระแสตรงแกนหยุดนิ่ง หรือเรียกว่า Stationary frame ในภาพที่ 2.10 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน α, β และแกน $d - q$

โดยกระแส α และ β มีความสัมพันธ์กับกระแส a, b และ c ดังนี้

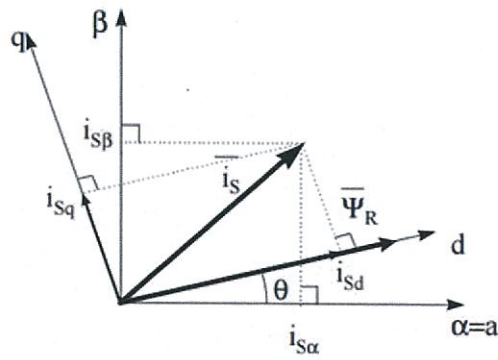
$$i_{s\alpha} = i_a \quad (2.4)$$

$$i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}i_a + \frac{2}{\sqrt{3}}i_b \quad (2.5)$$

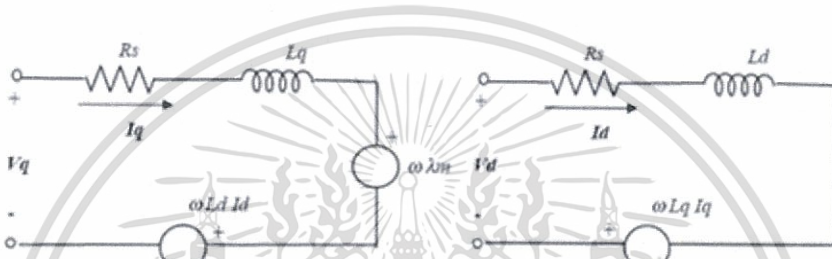
แกน $d - q$ ยังสามารถจะพิจารณาให้เป็นแกนที่อยู่กับที่ หรือเป็นแกนที่หมุนได้ด้วยความเร็วเชิงมุม (ω_r) ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมาก ในการจะพิจารณาสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ให้อยู่ในรูปสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ที่หยุดนิ่งอยู่กับที่ สัญญาณแรงดันของมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร จึงถูกอธิบายในมุมมองของกรอบอ้างอิงโรเตอร์ $d - q$ โดยใช้สมการการแปลงจากปริมาณสามเฟสเป็นปริมาณสองเฟส (Park's Transformation) จะแปลงจากระนาบ α, β ไปเป็นระนาบของ $d - q$ โดยที่แนวแกน d คือ แนวแกนของสนามแม่เหล็ก และแนวแกน q คือ แนวแกนของแรงบิดมอเตอร์ โดย Park's Transformation นี้จะมองในลักษณะแกนหมุนที่อิงโรเตอร์ หรือเรียกว่า Rotating frame



ภาพที่ 2.9 Clarke's Transformation



ภาพที่ 2.10 Park's Transformation



ภาพที่ 2.11 วงจรสมมูลของโรเตอร์

โดยกระแส d และ q มีความสัมพันธ์กับกระแส α และ β ดังนี้

$$i_{sd} = i_{s\alpha} \cos \theta + i_{s\beta} \sin \theta \tag{2.6}$$

$$i_{sq} = -i_{s\alpha} \sin \theta + i_{s\beta} \cos \theta \tag{2.7}$$

สมการของการแปลงค่าปริมาณจากสามเฟสเป็นปริมาณสองเฟสที่เขียนบนแกนอ้างอิง ($d - q$) แสดงดังสมการที่ (2.8)

$$[v_{qdo}] = [T_{qdo}(\theta_q)][V_{abc}] \tag{2.8}$$

โดยที่ $[T_{qdo}(\theta_q)]$ ในรูปของเมตริกซ์ (Matrix) มีค่าเท่ากับ

$$[T_{qdo}(\theta_q)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_q & \cos \left(\theta_q - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_q + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta_q & \sin \left(\theta_q - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta_q + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

จากสมการที่ (2.8) และ (2.9) จะได้สมการแรงดันของการแปลงค่าปริมาณสามเฟสเป็นปริมาณสองเฟส ดังสมการที่ (2.10)

$$\begin{bmatrix} v_q \\ v_d \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r + 120^\circ) \\ \sin \theta_r & \sin(\theta_r - 120^\circ) & \sin(\theta_r + 120^\circ) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

การควบคุมกระแสแบบปรับตามสนามแม่เหล็ก (Field Oriented Control หรือ Vector Control) จะทำการเปรียบเทียบสัญญาณกระแสอ้างอิงกับสัญญาณกระแสจริงในแต่ละเฟส เนื่องจากสัญญาณแรงดันของมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร อธิบายในมุมมองของกรอบอ้างอิงโรเตอร์ v_d, v_q ทำให้สัญญาณกระแสจริงที่ได้ จะอยู่ในมุมมอง ของกรอบอ้างอิงโรเตอร์ด้วย i_d, i_q จึงต้องทำการแปลงค่าสัญญาณกระแสจริงสองเฟสเป็นสัญญาณกระแสจริงสามเฟส เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงในแต่ละเฟสต่อไป โดยใช้สมการการแปลง จากปริมาณสองเฟสเป็นปริมาณสามเฟส (Inverse Park's Transformation) แสดงดังสมการที่ (2.11) และ (2.12) สมการของการแปลงค่าปริมาณจากสองเฟสเป็นปริมาณสามเฟสที่เขียนบนแกนอ้างอิง ($d - q$) แสดงดังสมการที่ (2.11)

$$[i_{abc}] = [T_{qdo}(\theta_q)^{-1}] [i_{qdo}] \quad (2.11)$$

โดยที่ $[T_{qdo}(\theta_q)^{-1}]$ ในรูปของเมตริกซ์ มีค่าเท่ากับ

$$[T_{qdo}(\theta_q)^{-1}] = \begin{bmatrix} \cos \theta_q & \sin \theta_q & 1 \\ \cos(\theta_q - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_q - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_q + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_q + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.11) และ (2.12) จะได้สมการกระแสของการแปลงค่าปริมาณสองเฟสเป็นปริมาณสามเฟส ดังสมการที่ (2.13)

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r & 1 \\ \cos(\theta_r - 120^\circ) & \sin(\theta_r - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta_r + 120^\circ) & \sin(\theta_r + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ที่เทียบกับแกนอ้างอิงของโรเตอร์ดังภาพที่ 2.11 โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการแรงดันของมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่แกนอ้างอิง q และแกนอ้างอิง d ในสมการที่ (2.14) และ (2.15) ตามลำดับ ดังนี้

$$v_q = R_s i_q + \omega_r \lambda_d + \frac{d}{dt} \lambda_q \quad (2.14)$$

$$v_d = R_s i_d + \omega_r \lambda_q + \frac{d}{dt} \lambda_d \quad (2.15)$$

ค่าฟลักซ์ในแกนอ้างอิง q และแกนอ้างอิง d แสดงดังสมการที่ (2.16) และ (2.17)

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (2.16)$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{pm} \quad (2.17)$$

แทนสมการที่ (2.16) และ (2.17) ลงในสมการที่ (2.14) และ (2.15) จะได้

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_r (L_d i_d + \lambda_{pm}) \quad (2.18)$$

$$v_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_r L_q i_q + \frac{d}{dt} \lambda_{pm} \quad (2.19)$$

นอกจากสมการแรงดันของมอเตอร์ซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร ยังมีสมการแรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์ที่นำมาใช้วิเคราะห์ผลต่าง ๆ ของตัวมอเตอร์ สมการแรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์ แสดงดังสมการที่ (2.20)

$$T_e = \frac{3p}{2} [\lambda_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2.20)$$

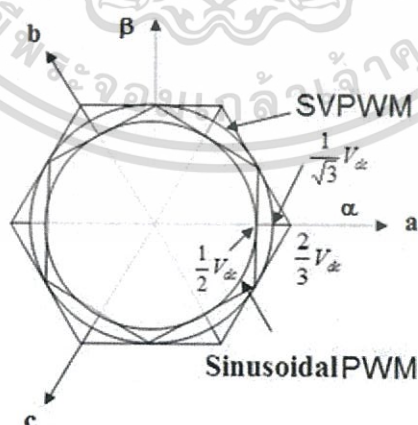
$$\omega_m = \int \left(\frac{T_e - T_L - B\omega_m}{J} \right) dt \quad (2.21)$$

$$\omega_r = \frac{d}{dt} \theta_r \quad (2.22)$$

$$\omega_m = \omega_r \left(\frac{2}{p} \right) \quad (2.23)$$

$$\theta_m = \theta_r \left(\frac{2}{p} \right) \quad (2.24)$$

ลักษณะของการสร้างสัญญาณ Space Vector Modulation ที่เกิดจากการควบคุมแบบ FOC จะมีลักษณะเป็น Sinusoidal Modulation ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 Space Vector Modulation ของ FOC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การควบคุม PMSM ด้วยหลักการ Six-Step Control

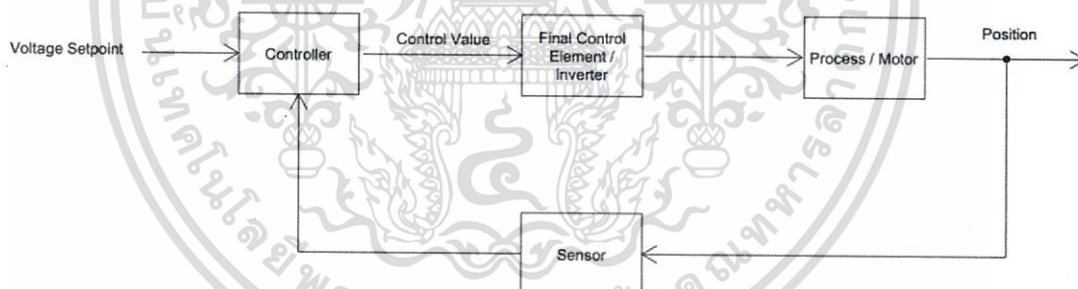
ภาพที่ 2.13 แสดงบล็อกไดอะแกรมของ Six-Step Control ซึ่งเป็นการควบคุมมอเตอร์ที่ใช้หลักการ Pulse Width modulation (PWM) ดังภาพที่ 2.14 เข้ามาเพื่อควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ โดยการลดแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์ลง โดยมีสมการของแรงดันตกคร่อมดังนี้

$$V_{\text{motor}} = V_{\text{total}} \times \%D \quad (2.25)$$

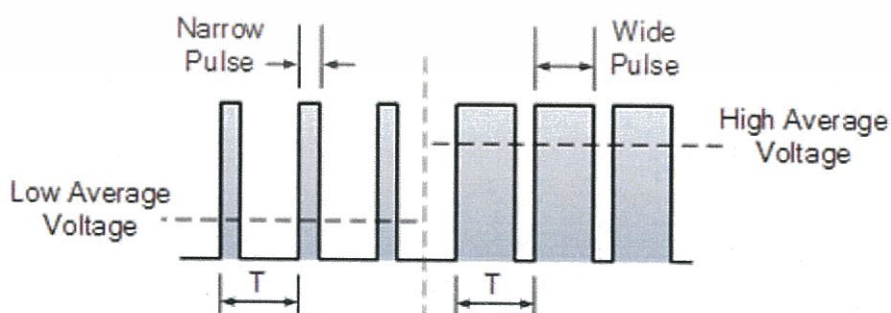
$$\%D = \frac{T_{\text{on}}}{T} \times 100 \quad (2.26)$$

$$T = T_{\text{on}} + T_{\text{off}} \quad (2.27)$$

โดย V_{motor} คือ แรงดันตกคร่อมมอเตอร์
 V_{total} คือ แรงดันทั้งหมด
 $\%D$ คือ คาบเวลาดีวตี้ไซเคิล (Duty cycle) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์
 T_{on} คือ คาบเวลาที่ทำงาน หรือ ON TIME
 T_{off} คือ คาบเวลาที่ไม่ทำงาน หรือ OFF TIME
 T คือ คาบเวลาทั้งหมดใน 1 ดีวตี้ไซเคิล

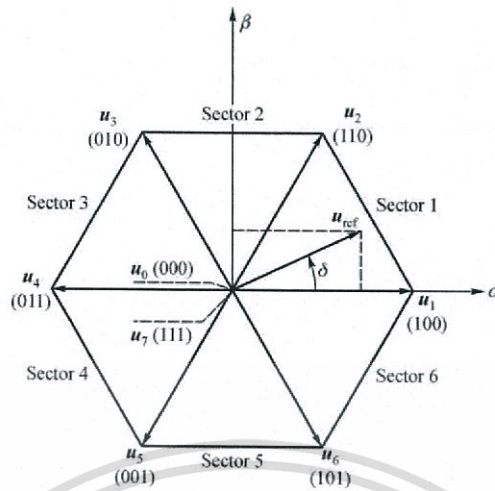


ภาพที่ 2.13 บล็อกไดอะแกรมของ Six-Step Control

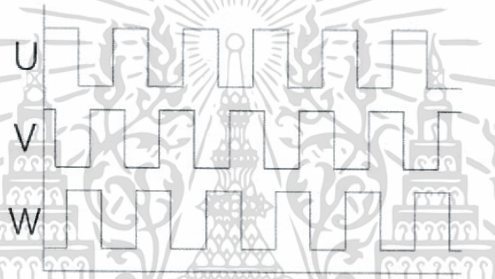


ภาพที่ 2.14 ควบคุมแรงดันด้วย PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.15 Space Vector Modulation ของ Six-Step Control



ภาพที่ 2.16 รูปคลื่นที่เกิดจากการควบคุมแบบ Six-Step Control

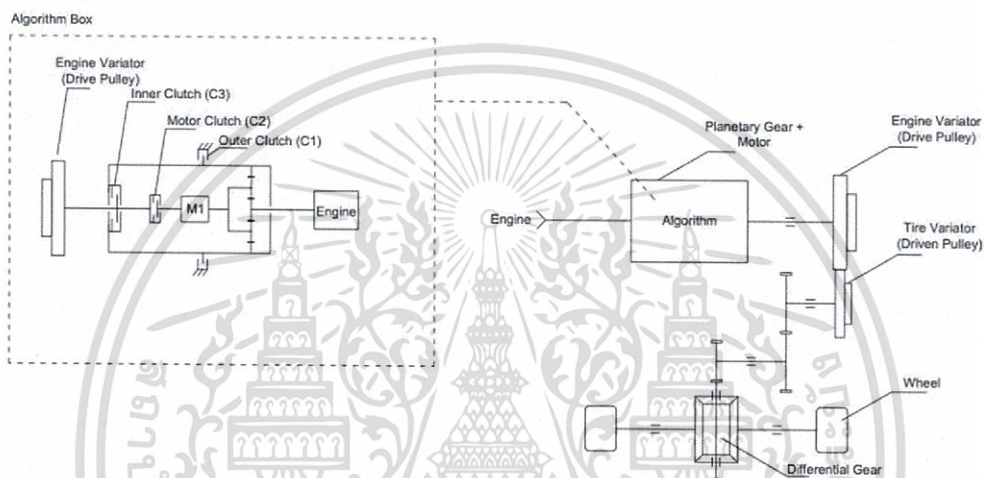
ย่านความถี่ของสัญญาณ PWM ที่ใช้กับอินเวอร์เตอร์จะอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 10,000 Hz โดยภาพที่ 2.15 แสดงลักษณะของ Space Vector Modulation ของการควบคุมแบบ Six-Step Control จะมีลักษณะเป็นรูปทรงหกเหลี่ยมซึ่งแบ่งตำแหน่งของมอเตอร์เป็น 6 ระดับด้วยกัน ดังนั้นการหมุนแบบนี้แรงดันที่ตกคร่อมจะไม่ได้เป็นคลื่นไซน์แบบสามเฟสแต่จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมเฟสต่างกัน 120 องศา ดังภาพที่ 2.16

2.6 การใช้ PMSM ในรถยนต์ไฟฟ้าที่ศึกษา

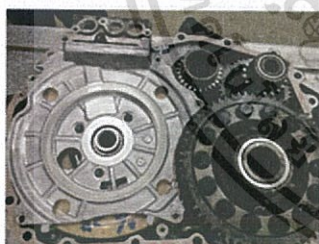
จากภาพที่ 1.2 ตัวขับเคลื่อนประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า และเครื่องยนต์ ทำหน้าที่วิเคราะห์อัตราทดเพื่อส่งกำลังไปยังเกียร์ CVT [6] สามารถเขียนแผนผังของชุดเกียร์ขับเคลื่อนรถยนต์โดยใช้อัลฟาร์ทได้ดังภาพที่ 2.17 ในระบบที่นำเสนอจะทำการนำเอาส่วนของเครื่องยนต์ที่ใช้พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิงออก ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจาก PMSM จึงถูกส่งไปยังเกียร์ CVT โดยตรง โดยมีมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมันทำหน้าที่จ่ายแรงดันน้ำมันที่เหมาะสมให้กับเกียร์เพื่อใช้สำหรับการส่งงานแผ่นคลัทช์ (Clutch) และการปรับเปลี่ยนอัตราทดของตัวส่งกำลัง CVT ซึ่งใช้โซลินอยด์วาล์วในการทำหน้าที่ควบคุมทางเดินน้ำมันภายในสมองเกียร์ให้สามารถส่งแรงดันน้ำมันไปยังแต่ละจุดได้ กำลังที่ผ่านตัวส่ง

กำลัง CVT จะถูกส่งไปยังเพลาล้อตามลำดับ จากภาพที่ 2.18 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของชุดเกียร์ขับเคลื่อนล้อหน้าดังนี้

- PMSM สำหรับส่งกำลังในการขับเคลื่อนล้อ (Front Motor)
- PMSM สำหรับจ่ายแรงดันน้ำมัน (Hydraulic pump)
- เกียร์ส่งกำลัง ชนิด Continuous Variable Transmission (CVT)
- สมองเกียร์
- โซลินอยด์วาล์ว



ภาพที่ 2.17 Gear Diagram ของชุดขับเคลื่อนล้อรถยนต์อัลพาร์ด



(ก) มอเตอร์ขับเคลื่อนล้อ



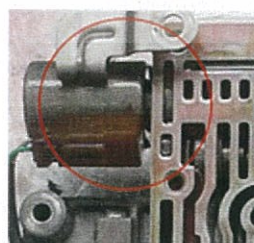
(ข) มอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมัน



(ค) ตัวส่งกำลัง CVT



(ง) สมองเกียร์

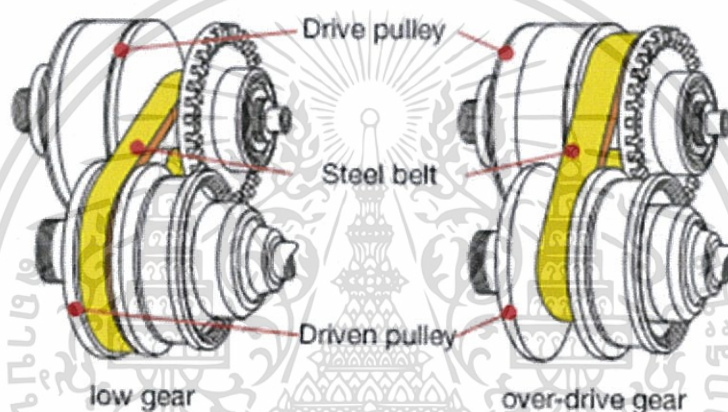


(จ) โซลินอยด์วาล์ว

ภาพที่ 2.18 ส่วนประกอบชุดเกียร์ขับเคลื่อนล้อหน้ารถยนต์โตโยต้าอัลพาร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกียร์ CVT จะทำงานก็ต่อเมื่อ Front Motor และมอเตอร์ขับเคลื่อนน้ำมันทำงาน โดยความเร็วของรอกยนต์จะขึ้นอยู่กับความกว้างของรอกพูลเลย์ ถ้าพูลเลย์ส่งกำลังขับ (Drive pulley) มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ขณะที่พูลเลย์รับแรงขับ (Driven pulley) มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ ในลักษณะนี้จะเป็นการส่งกำลังในอัตราทดเกียร์สูง เมื่อรอกยนต์มีความเร็วเพิ่มขึ้น คอมพิวเตอร์ที่ควบคุมการทำงานของเกียร์ CVT จะสั่งการให้ปั๊มน้ำมันแรงดันสูงจ่ายน้ำมันไปที่ชุดพูลเลย์ เพื่อปรับเปลี่ยนขนาดของรอกพูลเลย์ โดยปรับให้เส้นผ่านศูนย์กลางของพูลเลย์ส่งกำลังขับกว้างขึ้น และในขณะเดียวกันนั้นจะลดแรงดันน้ำมันที่พูลเลย์รับแรงขับ เป็นการลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางการหมุนให้เล็กลง ซึ่งเป็นการลดอัตราทดในการขับเคลื่อนให้ลดลง แต่จะเพิ่มความเร็วของรอกยนต์เช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนการขับของเฟืองเกียร์ในระบบเกียร์อัตโนมัติทั่วไป แสดงให้เห็นดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 ส่วนประกอบของตัวส่งกำลัง CVT

บทที่ 3

ระบบขับเคลื่อน PMSM โดยใช้ตัวควบคุม NI cRIO ที่นำเสนอ

3.1 กล่าวนำ

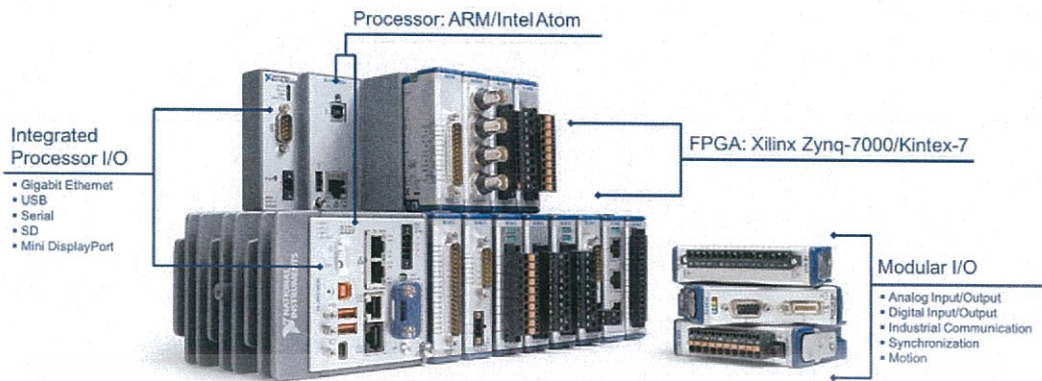
ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดพื้นฐานของตัวควบคุม NI cRIO และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในระบบควบคุมมอเตอร์ที่นำเสนอ การสร้างสัญญาณขับเคลื่อนด้วยหลักการ FOC และ Six-Step Control สำหรับมอเตอร์ขับเคลื่อนถาวร และมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมัน โดยใช้โปรแกรม LabVIEW 2014 การเขียนอัลกอริทึมต่าง ๆ รวมถึงการสร้างหน้าต่าง GUI สำหรับติดต่อกับผู้ใช้งาน

3.2 ตัวควบคุม NI cRIO ที่ใช้ในระบบขับเคลื่อน [7]

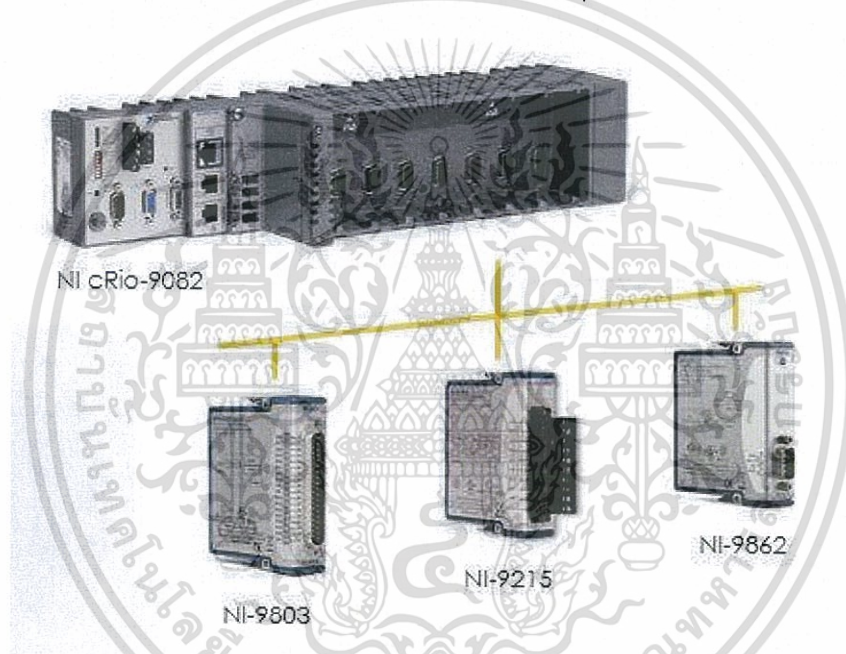
ตัวควบคุม NI cRIO (CompactRio) ที่นำเสนอ เป็นตัวควบคุมที่ถูกออกแบบ และพัฒนาขึ้นโดยบริษัท National Instrument (NI) โดยมีลักษณะเด่นคือ เป็นอุปกรณ์ควบคุมแบบฝังตัว ซึ่งมีระบบประมวลผลภายในตัวเอง สามารถออกแบบ และสร้างส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้งานได้ผ่านทางโปรแกรม LabVIEW มีวางสำหรับต่ออุปกรณ์ซึ่งเรียกว่า Chassis ที่ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ประเภท Modular I/O ที่ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้งานได้ตามต้องการ ในภาพที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของตัวควบคุม NI cRIO ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนหลัก ๆ คือ

1. ส่วนเชื่อมต่อกับระบบประมวลผล (Integrated Processor I/O) ซึ่งจะมีพอร์ตสำหรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เช่น พอร์ต Ethernet สำหรับการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ เพื่อการเขียนโปรแกรมและดาวน์โหลดตัวควบคุม หรือการมอนิเตอร์ตัวแปรในระบบผ่านทางหน้าต่าง GUI
2. ส่วนประมวลผล (Processor) ระบบประมวลผลของตัวควบคุมให้สามารถทำงานด้วยตัวเองในกรณีที่ไม่ใช้การสั่งงานจากคอมพิวเตอร์
3. ส่วนอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (FPGA) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการทำงานเหมือนลอจิกเกตพื้นฐาน ซึ่งผู้ใช้งานสามารถออกแบบอัลกอริทึมการทำงานได้เองผ่านทางโปรแกรม LabVIEW
4. ส่วนอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุต (Modular I/O) หรือเรียกอีกอย่างว่า C-series Module เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้ในการเชื่อมต่อกับตัวควบคุม เพื่อรับหรือส่งสัญญาณในกระบวนการ เช่น สัญญาณดิจิทัล สัญญาณแอนะล็อก โปรโตคอลการสื่อสาร ซึ่งถูกออกแบบไว้ให้สามารถเลือกใช้ได้ตามต้องการ

ซึ่งคุณสมบัติต่าง ๆ เช่นความเร็วของหน่วยประมวลผล จำนวนพอร์ตการเชื่อมต่อ จำนวน Modular I/O ที่ Chassis รองรับ ก็จะแตกต่างกันไปตามคุณสมบัติของตัวควบคุมแต่ละรุ่นอีกด้วย สำหรับ NI cRIO ที่ใช้ในปริณิษยานิพนธ์นี้คือ รุ่น NI cRIO-9082



ภาพที่ 3.1 ส่วนประกอบของตัวควบคุม NI cRIO



ภาพที่ 3.2 องค์ประกอบ Ni cRIO ในระบบที่นำเสนอ

3.2.1 องค์ประกอบ Ni cRIO ในระบบที่นำเสนอ

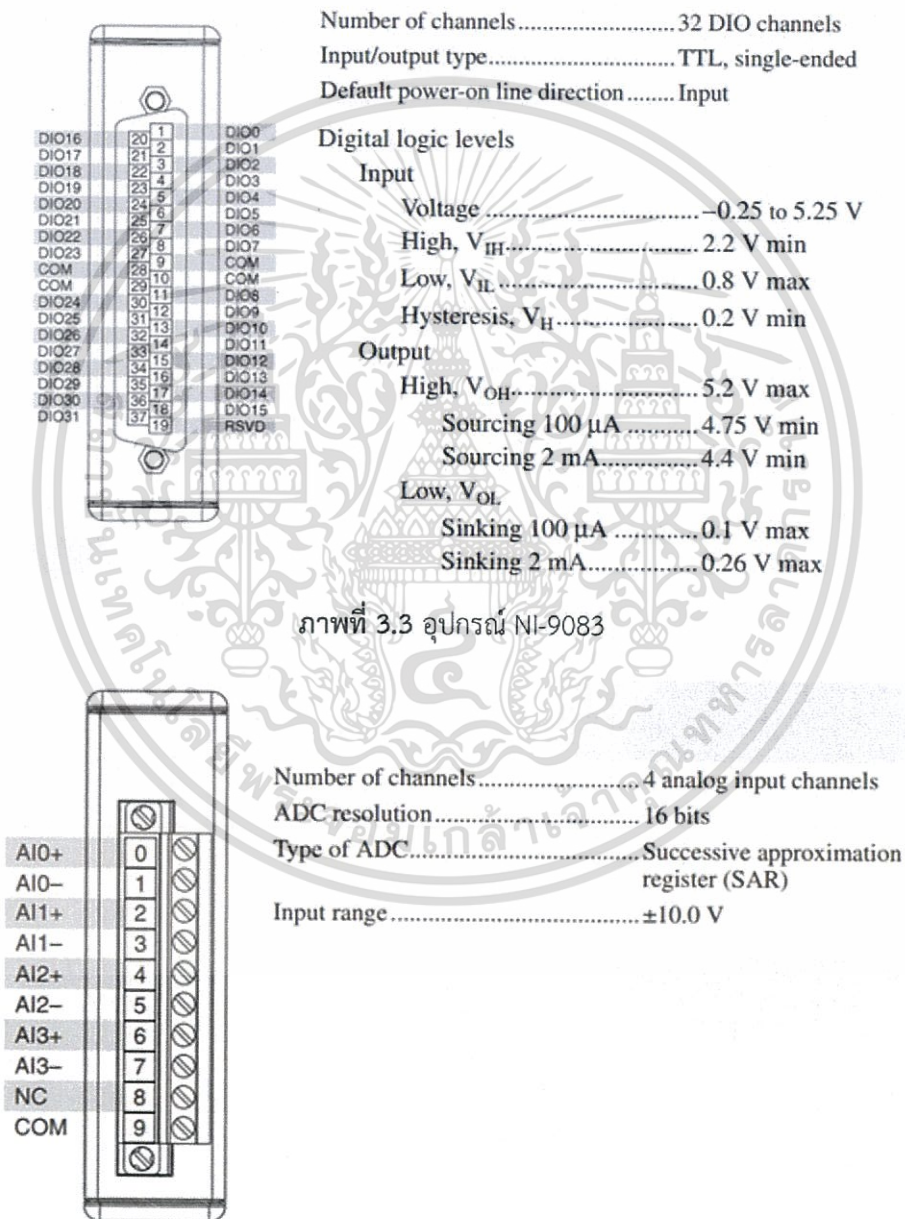
ภาพที่ 3.2 แสดงองค์ประกอบ Ni cRIO ในระบบขับเคลื่อน PMSM ที่นำเสนอจะใช้ NI cRIO-9082 เป็นตัวควบคุมหลัก ซึ่งมีการใช้งาน Modular สำหรับการรับส่งสัญญาณในกระบวนการจำนวน 3 ตัว ดังนี้

1. NI-9803 Digital I/O ดังแสดงในภาพที่ 3.3 ใช้รับส่งสัญญาณดิจิทัลแบบ TTL ความเร็วสูงสุดในการส่งสัญญาณคือ $7 \mu\text{s/bit}$ มีทั้งหมด 32 พอร์ต โดยแต่ละพอร์ตสามารถตั้งค่าให้เป็นอินพุต หรือเอาต์พุตก็ได้ ในระบบนี้จะมีหน้าที่สร้างสัญญาณควบคุมไปยังอินเวอร์เตอร์ และรับค่าการตรวจจับตำแหน่งจากฮอลล์เซ็นเซอร์ของมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

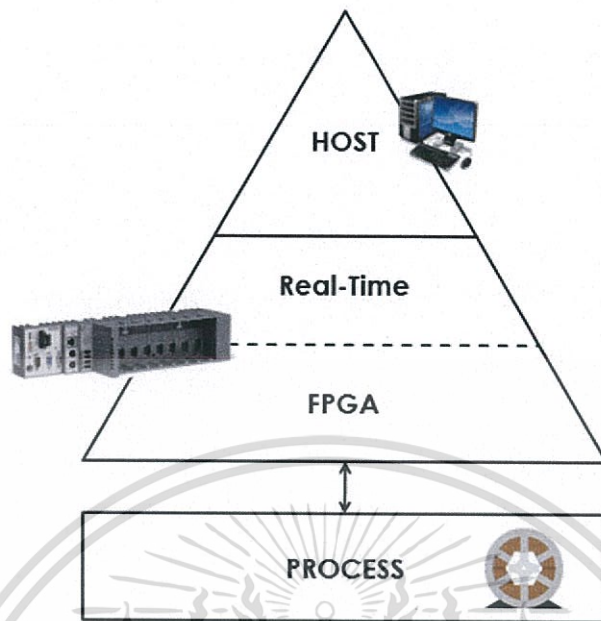
2. NI-9215 Analog Input ดังภาพที่ 3.4 เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณแอนะล็อกมีความละเอียด 16 บิต สำหรับรับค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -10 ถึง +10 โวลต์ ในระบบจะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณจากเซนเซอร์ตรวจวัดกระแสที่ PMSM ขับเคลื่อนล้อ

3. NI-9862 1-Port High-speed CAN เป็นอุปกรณ์สำหรับการติดต่อสื่อสารแบบแคนบัส ใช้สำหรับการรับค่าตำแหน่งของ PMSM ขับเคลื่อนล้อจากเซนเซอร์รีโซลเวอร์ที่ผ่านการแปลงสัญญาณให้เป็นการสื่อสารในรูปแบบของแคนบัส



ภาพที่ 3.4 อุปกรณ์ NI-9215

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



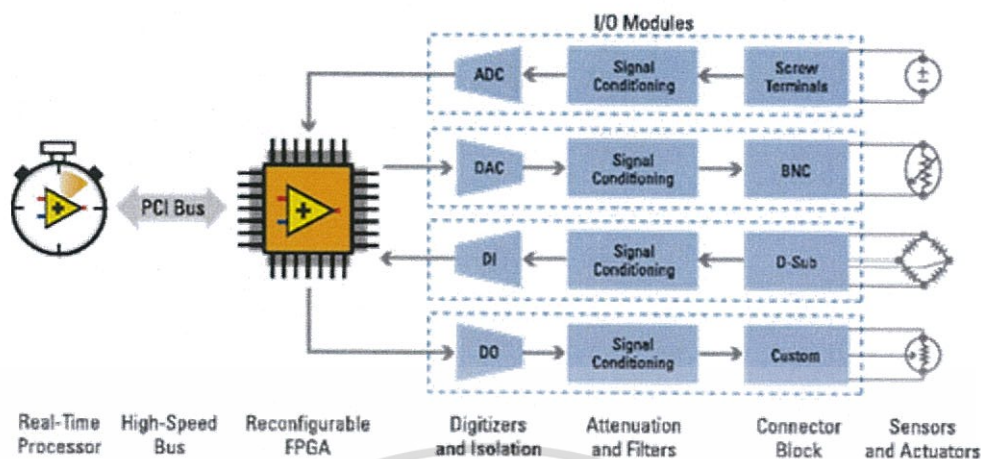
ภาพที่ 3.5 สถาปัตยกรรมของตัวควบคุม cRIO บนโปรแกรม LabVIEW

3.2.2 สถาปัตยกรรมของตัวควบคุม cRIO บนโปรแกรม LabVIEW

โปรแกรม LabVIEW โดยพื้นฐานคือ โปรแกรมที่สามารถใช้งานได้บนหน่วยประมวลผลของคอมพิวเตอร์ แต่สามารถเขียนโปรแกรมให้ทำงานบนหน่วยประมวลผลของตัวควบคุมได้เช่นกัน ซึ่งการเขียนโปรแกรม LabVIEW กับตัวควบคุม cRIO นั้น ระดับชั้นของการเขียนโปรแกรมสามารถแบ่งได้ดังภาพที่ 3.5 คือ

ระดับชั้นบนคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้งาน

- Host หรือ My Computer เป็นระดับชั้นของผู้ใช้งาน โปรแกรมที่ถูกเขียนขึ้นในระดับนี้จะใช้หน่วยประมวลผลของคอมพิวเตอร์ในการทำงาน นิยมใช้สำหรับการมอนิเตอร์ค่าตัวแปรที่อยู่ในระบบทั้งหมด สามารถเชื่อมต่อกับตัวควบคุมได้หลายตัว ระดับชั้นบนตัวควบคุม cRIO ที่ประกอบด้วย Real-Time และ FPGA มีความสัมพันธ์กันดังแสดงในภาพที่ 3.2
- Real-Time Target ระดับชั้นนี้จะอยู่ในตัวควบคุม เป็นการทำงานที่เป็นการประมวลผลของหน่วยประมวลผล เช่นการติดต่อสื่อสารต่าง ๆ ของตัวควบคุม โปรแกรมที่เขียนในระดับนี้จะเป็นการติดต่อสื่อสารกับระดับชั้น Host หรือการติดต่อสื่อสารกับระดับชั้น FPGA



ภาพที่ 3.6 ระดับชั้นการติดต่อสื่อสารในตัวควบคุม cRIO

- FPGA Target ระดับชั้นนี้อยู่บนตัวควบคุมเช่นเดียวกัน เป็นระดับชั้นที่มีระดับติดกับระดับชั้นกระบวนการโดยตรง ซึ่งทำให้สามารถรับส่งสัญญาณได้รวดเร็ว ดังนั้นการรับส่งจากพอร์ตดิจิทัล และแอนะล็อกที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์จะถูกเขียนอยู่ในระดับนี้

สำหรับโปรแกรมที่เขียนบน LabVIEW 2014 นั้นหลังจากลงโปรแกรมแล้ว จำเป็นต้องมีการลง Software Driver สำหรับอุปกรณ์ในระบบด้วยดังนี้

- NI-RIO 14 สำหรับรองรับการใช้ร่วมกับอุปกรณ์ Compact Rio รุ่นต่าง ๆ
- RT Module 14 รองรับการใช้งานโปรแกรมในระดับ Real-Time ของตัวควบคุม NI cRIO
- FPGA Module 14 รองรับการใช้งานโปรแกรมในระดับ FPGA ของตัวควบคุม NI cRIO
- LabVIEW SoftMotion Module 2014 สำหรับใช้งานเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมมอเตอร์เช่น Clarke Transformation Park Transformation PWM
- NI XNET สำหรับการใช้งานอุปกรณ์การติดต่อสื่อสารที่เป็นโปรโตคอล CAN LIN หรือ FlexRay บนตัวควบคุม NI cRIO

ซึ่งหากลง Software Driver ไม่ครบตามเงื่อนไขจะมีการแจ้งเตือนจากโปรแกรมขึ้นมา โดยสามารถดาวน์โหลดมาลงได้ผ่านเว็บไซต์ www.ni.com

3.2.3 I/O Assignment

ตาราง 3.1 และ 3.2 แสดง I/O Assignment ของอุปกรณ์ Modular I/O NI-9403 และ NI-9215 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 I/O Assignment Module NI-9403 TTL Digital I/O Module

No.	Terminal Name	Description
1	DIO 0	NOT USE
2	DIO 1	Input from Hall U
3	DIO 2	Input from Hall V
4	DIO 3	Input from Hall W
5	DIO 4	Output to M2 Phase U (U_{upper})
6	DIO 5	Output to M2 Phase V (V_{upper})
7	DIO 6	Output to M2 Phase W (W_{upper})
8	DIO 7	Output to M2 Phase X (U_{lower})
9	COM	GND
10	COM	GND
11	DIO 8	Output to M2 Phase Y (V_{lower})
12	DIO 9	Output to M2 Phase Z (W_{lower})
No.13 to No.25 is NOT USE.		
26	DIO 22	Output to M1 Phase U
27	DIO 23	Output to M1 Phase X
28	COM	GND
29	COM	GND
30	DIO 25	Output to M1 Phase V
31	DIO 26	Output to M1 Phase Y
32	DIO 27	Output to M1 Phase W
33	DIO 28	Output to M1 Phase Z
34	DIO 29	NOT USE
35	DIO 30	
36	DIO 32	
37	DIO 31	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 I/O Assignment Module NI-9215 4 channels, $\pm 10V$, 16bits, Analog input

No.	Terminal Name	Description
0	AI0+	Reserved
1	AI0-	
2	AI1+	Current Sensor I_{VA+}
3	AI1-	GND
4	AI2+	Current Sensor I_{WA+}
5	AI2-	GND
6	AI3+	Reserved
7	AI3-	
8	NC	NOT USE
9	COM	GND

3.3 การควบคุม PMSM ที่ใช้ในการขับเคลื่อนล้อยนต์

PMSM ที่ใช้ในการขับเคลื่อนล้อยนต์นั้นจะใช้การควบคุมแบบ FOC ในการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ ซึ่งการควบคุมแบบ FOC จะใช้สัญญาณป้อนกลับของสัญญาณตำแหน่งของมอเตอร์ที่วัดโดยรีโซลเวอร์ และกระแสในมอเตอร์ที่วัดโดยเซนเซอร์วัดกระแส นำมาคำนวณในระบบเพื่อสร้างสัญญาณไปที่เคลื่อนอินเวอร์เตอร์ ผ่านตัวควบคุม NI cRIO

3.3.1 รีโซลเวอร์ใน PMSM ที่ใช้ขับเคลื่อนล้อยนต์

ภาพที่ 3.7 และตารางที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่ารีโซลเวอร์ที่อ่านได้อ้างอิงกับ Space Vector ของมอเตอร์ ซึ่งจากตารางจะเห็นได้ว่ามุมทางกล (θ_m) ที่อ่านได้จากการหมุนของรีโซลเวอร์หนึ่งรอบจะเท่ากับมุมทางไฟฟ้า (θ_e) สองรอบ ซึ่งการคำนวณในระบบนั้นจะต้องใช้ค่ามุมทางไฟฟ้าในการคำนวณ ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงมุมทางกลให้กลับเป็นมุมทางไฟฟ้าก่อนที่จะนำค่าไปคำนวณในระบบควบคุม โดยใช้วิธีการดังนี้

1. เปลี่ยนหน่วยจากองศาที่อ่านจากรีโซลเวอร์ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา (degree) ให้เป็นหน่วยที่ใช้ในระบบคือ 0 ถึง 2 เรเดียน (radian)

$$\theta_{rad} = (\theta_{deg} \div 360) \times 2$$

2. เปลี่ยนมุมทางกลเป็นมุมทางไฟฟ้า

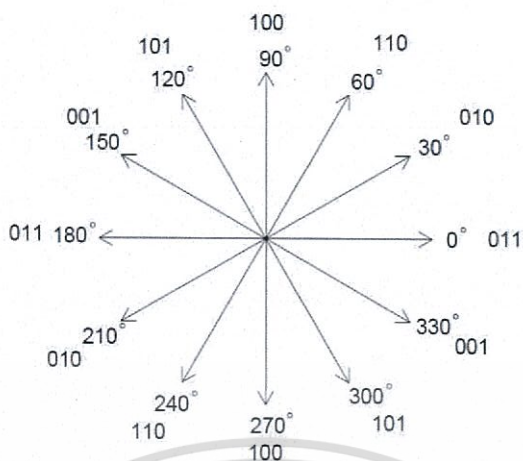
$$\text{ถ้า } \theta_m \leq 2; \theta_e = \theta_m \times 2 \quad (\text{rad})$$

$$\text{ถ้า } \theta_m > 2; \theta_e = (\theta_m - 2) \times 2 \quad (\text{rad})$$

ตารางที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของคาร์ดิโวลเวอ์ที่อ่านได้อ้างอิงกับ Space Vector ของมอเตอร์

u	v	w	มุมทางไฟฟ้า (°)
1	0	0	271.53
1	1	0	240.01
0	1	0	211.40
0	1	1	183.05
0	0	1	150.75
1	0	1	119.75
1	0	0	89.05
1	1	0	56.69
0	1	0	29.76
0	1	1	0.33
0	0	1	330.35
1	0	1	301.10
1	0	0	271.58
1	1	0	242.44
0	1	0	211.23
0	1	1	183.36
0	0	1	153.12
1	0	1	121.56
1	0	0	91.00
1	1	0	60.93
0	1	0	32.00
0	1	1	2.38
0	0	1	342.09
1	0	1	303.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.7 ความสัมพันธ์ของค่ารีโซลเวอร์ที่อ่านได้อ้างอิงกับ Space Vector ของมอเตอร์

Pin No.	Pin Name	Description
1	SVSN	-15 Vcc
2	SIWAS	Output W ch.A
3	SIVAS	Output V ch.A
4	SVSP	+15 Vcc
5	SIWBS	Output W ch.B
6	SSG	Gnd
7	SSG	Gnd
8	SIVBS	Output V ch.B

ภาพที่ 3.8 เซนเซอร์ตรวจวัดกระแส AB-200

3.3.2 เซนเซอร์วัดกระแสใน PMSM ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์

ภาพที่ 3.8 แสดงเซนเซอร์ตรวจวัดกระแสรุ่น AB-200 สำหรับวัดกระแสที่ PMSM ค่ากระแสป้อนกลับที่วัดได้จากเซนเซอร์จะถูกส่งมาในรูปแบบแรงดันผ่าน Modular I/O NI-9215 เพื่อนำไปประมวลผลในตัวควบคุมโดยย่านของแรงดันที่ใช้คือ -10 ถึง +10 โวลต์

เนื่องจากในระบบที่นำเสนอจะทดสอบกับกระแสที่ต่ำ จึงมีการ Calibrate อุปกรณ์ก่อนใช้งานดังภาพที่ 3.9 เพื่อลดย่านของกระแสที่ต้องการวัดลง ตารางที่ 3.4 จะแสดงค่าแรงดันที่อ่านได้ก่อนและหลังการ Calibrate ภาพที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ของเอาต์พุตกับค่ากระแสเอาต์พุตที่

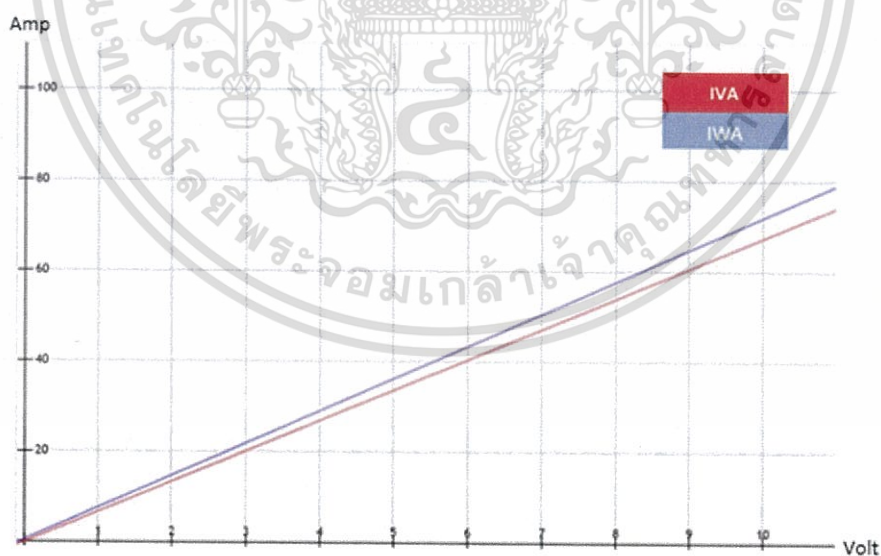
นำไปใช้จะเลือกจาก Output W ch.A และ Output V ch.A ซึ่งเป็นค่ากระแสที่อ่านได้จากเฟส W และ V ของมอเตอร์ตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 ความสัมพันธ์แรงดันที่อ่านได้จากเซนเซอร์กับค่ากระแสที่มอเตอร์

Output	ก่อน Caribrate		หลัง Caribrate
	ก่อน Caribrate	ก่อน Caribrate	
IVA	202.5A/10V	20.25A/1V	6.75A/1V
IVB	202.5A/10V	20.25A/1V	6.75A/1V
IWA	214.5A/10V	21.45A/1V	7.15A/1V
IWB	227.5A/10V	22.75A/1V	7.58A/1V

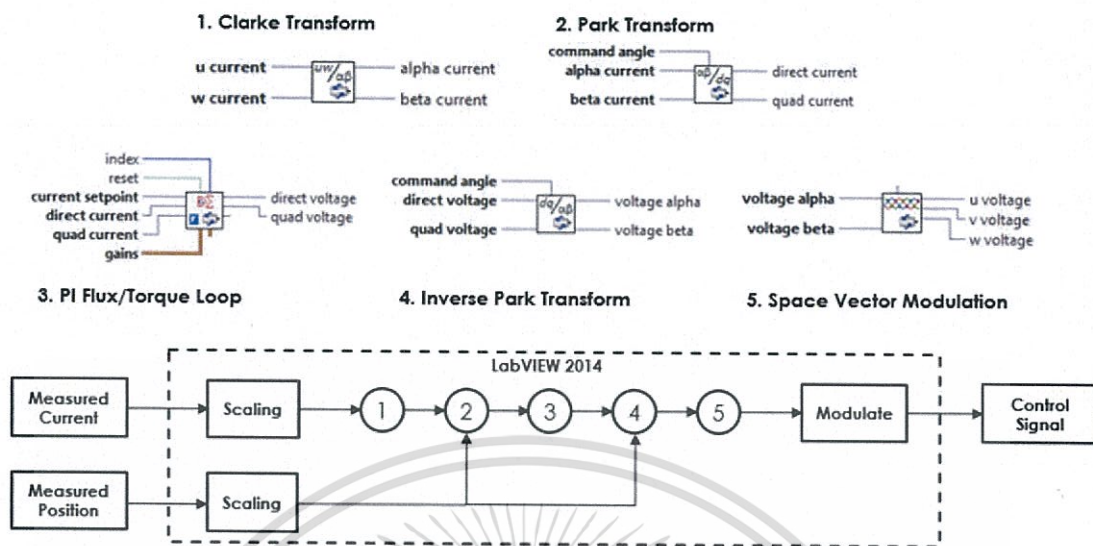


ภาพที่ 3.9 การปรับค่ากระแสของเซนเซอร์

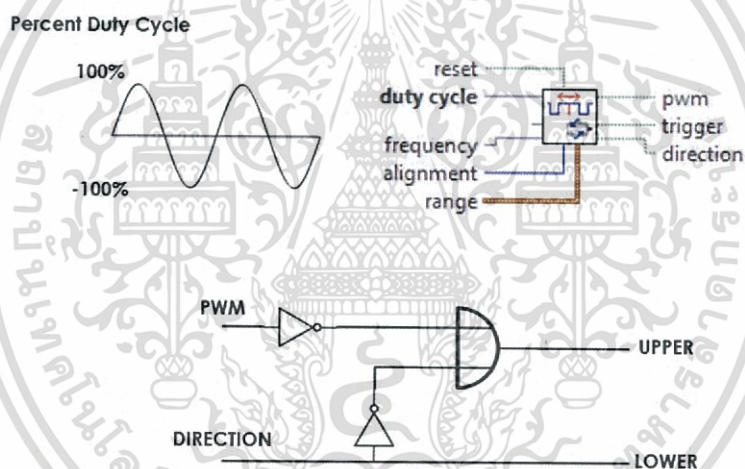


ภาพที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (แกน y) กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวเซนเซอร์ตรวจวัดกระแส (แกน x)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.11 การควบคุมแบบ FOC ในโปรแกรม LabVIEW



ภาพที่ 3.12 การสร้างสัญญาณสำหรับอินเวอร์เตอร์

3.3.3 การออกแบบวิธีการควบคุม FOC ด้วย LabVIEW 2014

ในการออกแบบการควบคุม FOC ในโปรแกรม LabVIEW ดังภาพที่ 2.11 จะมีอัลกอริทึมในโปรแกรมต่าง ๆ อ้างอิงตามบล็อกไดอะแกรมของ FOC อัลกอริทึมที่ใช้เขียนดังนี้

1. Clarke Transform บล็อกนี้จะรับการแสดจากเฟสของมอเตอร์ที่วัดมาจากเซนเซอร์วัดกระแสซึ่งเป็นช่วงแรงดัน -10 ถึง +10 โวลต์ โดยจะต้องนำมา Scaling อีกครั้งให้อยู่ในช่วง -32 ถึง +32 โวลต์ ก่อนที่จะนำมาเข้าบล็อกไดอะแกรม เอาท์พุทจากบล็อกจะได้จาก Alpha Current และ Beta Current

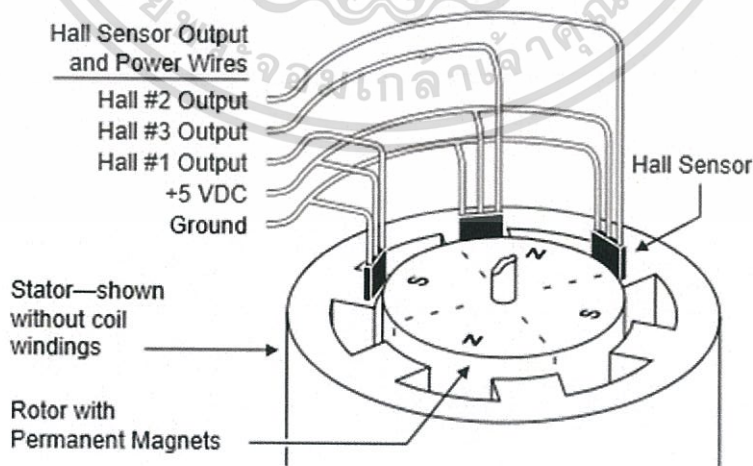
2. Park Transform รับค่า Alpha Current และ Beta Current แล้วแปลงเป็น Direct Current และ Quad Current โดยบล็อกนี้ต้องใช้ค่ามุมที่อ่านจากรีโซลเวอร์ในการคำนวณด้วย
3. PI Flux/Torque Loop ตัวควบคุมแบบ PI Control
4. Inverse Park Transform รับค่าจากสัญญาณควบคุมจากบล็อก PI Flux/Torque loop และแปลงค่าให้เป็น Voltage Alpha และ Voltage Beta
5. Space Vector Modulation หรือ Inverse Clarke Transform เป็นตัวรับสัญญาณ Voltage Alpha และ Voltage Beta เปลี่ยนให้เป็นเป็นสัญญาณในรูปคลื่นไซน์ 3 เฟส ซึ่งต้องนำสัญญาณนี้ไปผ่านการ Modulate เพื่อใช้สำหรับขับสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ ดังภาพที่ 3.2 แสดงการสร้างสัญญาณไปยังอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากหลักการสร้างสัญญาณของสวิตช์แต่ละคูมีหลักการเดียวกัน จึงยกตัวอย่างขึ้นมาเพียงแค่เฟสเดียว ขา PWM จะเป็นสัญญาณของ Pulse Width Modulation ซึ่งเปลี่ยนแปลงความกว้างของสัญญาณตามเปอร์เซ็นต์ของตัวสี่เหลี่ยมที่เกิดขึ้นจาก Space Vector Modulation ส่วนขา Direction จะบอกถึงทิศทางของการหมุนคือ ถ้าตัวสี่เหลี่ยมมีค่าเป็นลบก็จะออกเป็นลอจิก True

3.4 การควบคุม PMSM ที่ใช้ในการจ่ายแรงดันน้ำมัน

PMSM ที่ใช้ในการจ่ายแรงดันน้ำมันนี้จะใช้หลักการควบคุมแบบ Six-Step Control ซึ่งการควบคุมแบบ Six-Step Control จะใช้สัญญาณป้อนกลับของสัญญาณคือ ตำแหน่งของมอเตอร์ที่วัดโดยฮอลล์เซนเซอร์ จากนั้นนำมาคำนวณในระบบเพื่อใช้ในการขับเคลื่อน PMSM

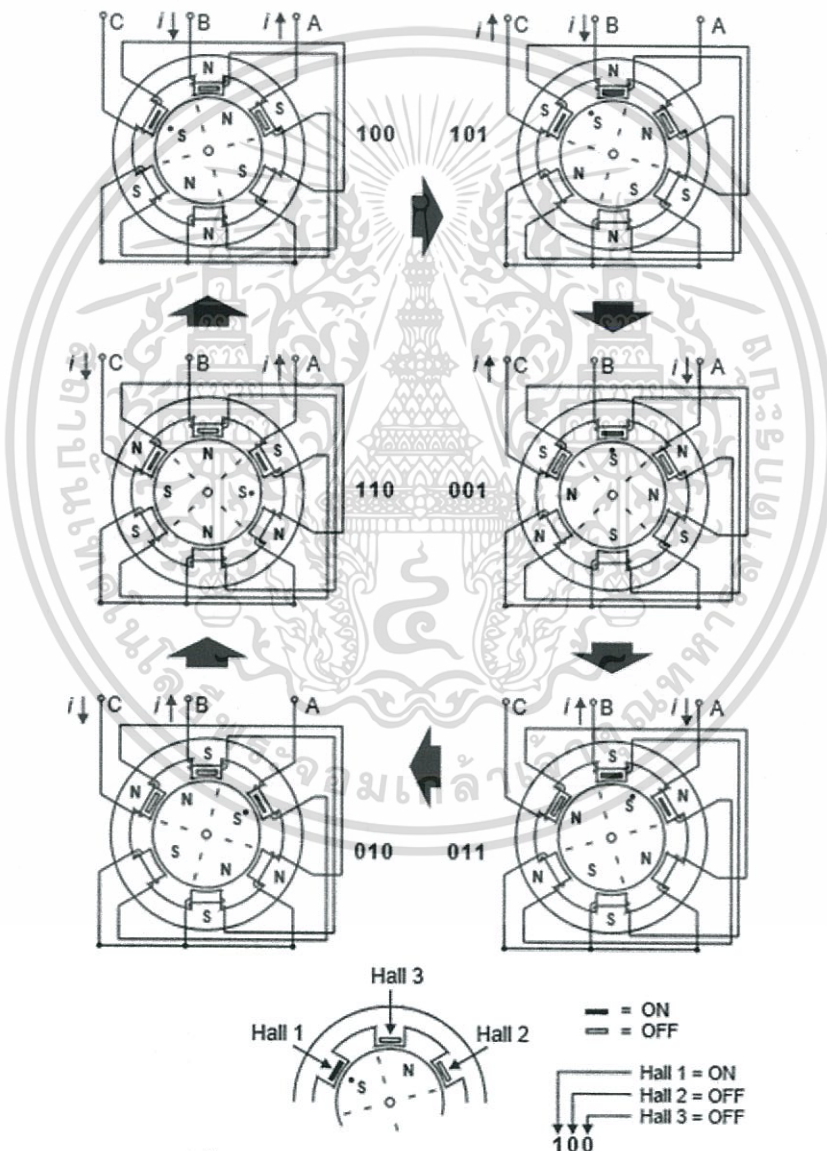
3.4.1 ฮอลล์เซนเซอร์ของ PMSM ที่ใช้ในการจ่ายแรงดันน้ำมัน

ลักษณะการติดตั้งฮอลล์เซนเซอร์แสดงดังภาพที่ 3.13 ซึ่งประกอบด้วยฮอลล์เซนเซอร์ทั้งหมด 3 ตัวสำหรับการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ทั้งสามเฟส



ภาพที่ 3.13 ลักษณะการติดตั้งฮอลล์เซนเซอร์

เมื่อมีการจ่ายไฟให้กับขดลวดสเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุน ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของแกนโรเตอร์ การตรวจจับของฮอลล์เซนเซอร์จะระบุตำแหน่งของโรเตอร์ มีสัญญาณเอาต์พุตออกมาเป็นดิจิทัลลอจิก แสดงในภาพที่ 3.14 เป็นการแสดงสัญญาณของฮอลล์เซนเซอร์กับตำแหน่งของโรเตอร์ในตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งสัญญาณที่ได้จะขึ้นอยู่กับลักษณะการติดตั้งเซนเซอร์ด้วย ตารางที่ 3.5 และภาพที่ 3.15 แสดงลักษณะสัญญาณจากฮอลล์เซนเซอร์กับตำแหน่งของโรเตอร์ของมอเตอร์ขับเคลื่อนแรงดันน้ำมันในรถยนต์โตโยต้าอัลพาร์ด จะเห็นได้ว่าในหนึ่งรอบจะมีระดับการหมุนอยู่ 6 ระดับ

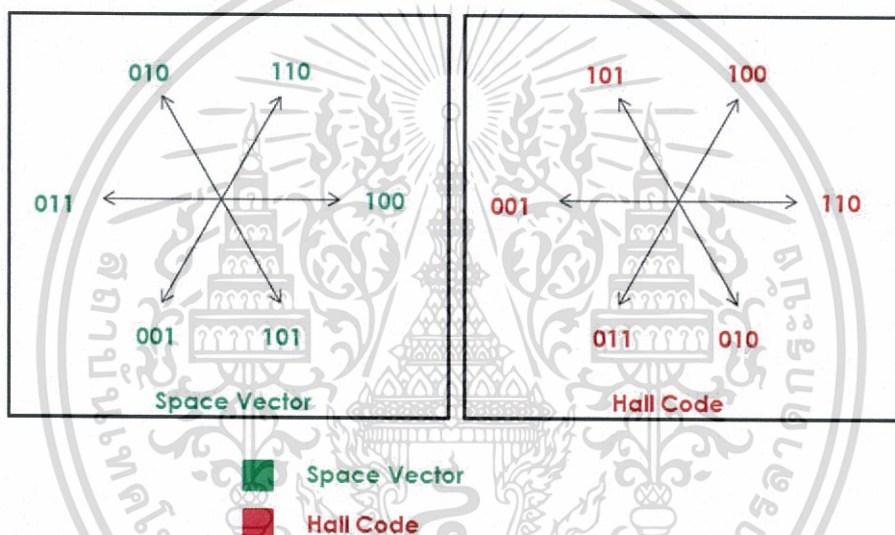


ภาพที่ 3.14 ลักษณะการตรวจจับของฮอลล์เซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ความสัมพันธ์ตำแหน่งของโรเตอร์มอเตอร์ขับเคลื่อนแรงดันน้ำมันกับสัญญาณฮอลล์ เซนเซอร์

เวกเตอร์	ตำแหน่งโรเตอร์	รหัสฮอลล์เซนเซอร์
100	0°	110
110	60°	100
010	120°	101
011	180°	001
001	240°	011
101	300°	010



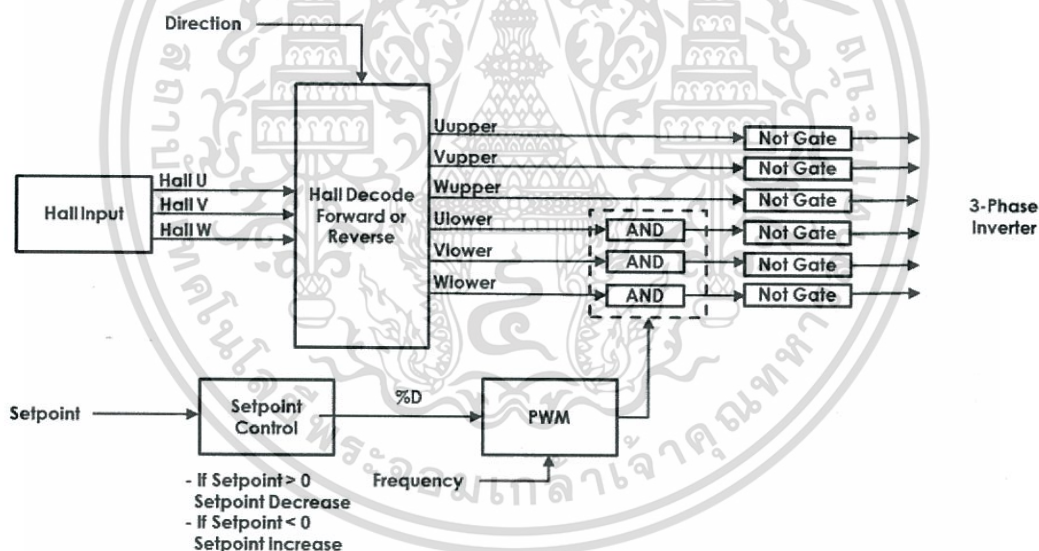
ภาพที่ 3.15 ความสัมพันธ์ตำแหน่งของโรเตอร์มอเตอร์ขับเคลื่อนแรงดันน้ำมันกับสัญญาณฮอลล์ เซนเซอร์

3.4.2 การออกแบบวิธีการควบคุมแบบ Six-Step Control ด้วย LabVIEW 2014

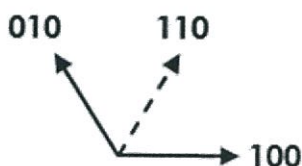
แผนผังโปรแกรมของการควบคุมแบบ Six-Step Control แสดงดังภาพที่ 3.16 สัญญาณที่ได้จากฮอลล์เซนเซอร์ที่วัดตำแหน่งของมอเตอร์ โดยอ้างอิงการหมุนจาก Space Vector มาถอดรหัส (Decode) โดยแบ่งการหมุนของมอเตอร์เป็นสองทิศทางคือ ทิศทางปกติ (Forward) และทิศกลับทาง (Reverse) ในภาพที่ 3.15 เมื่อตำแหน่งของโรเตอร์อยู่ตำแหน่ง 100 ค่าที่ฮอลล์เซนเซอร์อ่านได้คือ 110 ดังนั้นจะนำรหัสนี้ไปทำการถอดรหัสเพื่อสร้างสัญญาณให้กับอินเวอร์เตอร์เพื่อขับมอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่ง Space Vector ถัดไปคือ ตำแหน่ง Space Vector 110 เมื่อแกนโรเตอร์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 110 ค่าที่ฮอลล์เซนเซอร์อ่านได้ก็จะเป็น 100 ก็จะถูกนำมาถอดรหัสเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไปยังตำแหน่งต่อไป

เทคนิคการสร้างสัญญาณขับอินเวอร์เตอร์จากการถอดรหัสจากฮอลล์เซนเซอร์นั้นจะให้สัญญาณขับของอินเวอร์เตอร์นำหน้าตำแหน่งที่ต้องการอยู่ 60 องศาหรือ 1 ตำแหน่งเพื่อจะได้เวกเตอร์รับที่อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการพอดี ดังภาพที่ 3.17 ตำแหน่งที่ฮอลล์เซนเซอร์อ่านได้นั้นคือตำแหน่ง Space Vector 100 และตำแหน่งถัดไปที่ต้องการคือ 110 ดังนั้นในการสร้างสัญญาณขับก็จะทำการสร้างสัญญาณขับไปยังตำแหน่ง Space Vector 010 ในตารางที่ 3.6 จะแสดงการสร้างสัญญาณของอินเวอร์เตอร์สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์แรงดันน้ำมันในทิศทางตามเข็ม และทวนเข็ม

ในการควบคุมแรงดันที่มอเตอร์ก็จะนำลอจิกที่ใช้ขับอินเวอร์เตอร์มาเข้าเงื่อนไข “และ” (AND Operation) กับสัญญาณ Pulse Width Modulation ซึ่งถูกควบคุมความกว้างของสัญญาณด้วย Setpoint Control มีหน้าที่ในการควบคุมสัญญาณ Setpoint ที่ป้อนเข้ามาเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าแบบทันที ซึ่งก่อให้เกิดการกระชากของมอเตอร์ โดยสามารถทำการ AND Operation กับสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ชุดบนหรือชุดล่างก็ได้ ในระบบนี้จะทำการเลือกสวิตช์ชุดล่าง เนื่องจากการทำงานของอินเวอร์เตอร์เป็นแบบ Active Low จึงมี Not Gate สำหรับกลับลอจิกก่อนที่จะส่งสัญญาณไปยังอินเวอร์เตอร์



ภาพที่ 3.16 แผนผังโปรแกรม Six-Step Control



ภาพที่ 3.17 เทคนิคการสร้างสัญญาณขับอินเวอร์เตอร์ของ Six-Step Control

ตารางที่ 3.6 การสร้างสัญญาณของอินเวอร์เตอร์สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์แรงดันน้ำมันในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา

Space Vector	ตำแหน่งโรเตอร์	รหัสฮอลล์เซ็นเซอร์	หมุนทวน	หมุนตาม
100	0°	110	010	001
110	60°	100	011	011
010	120°	101	001	010
011	180°	001	101	110
001	240°	011	100	100
101	300°	010	110	101



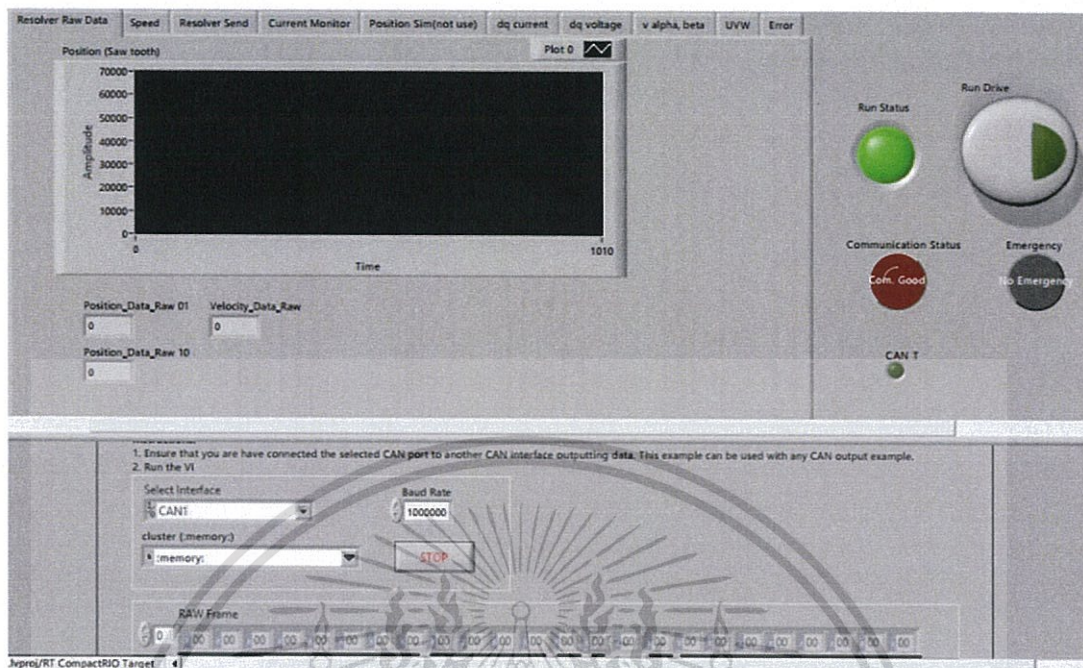
ภาพที่ 3.18 แผนผัง GUI ของระบบที่นำเสนอ

3.5 การออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน GUI

การออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานจะแบ่งส่วนติดต่อเป็นสองส่วน ดังภาพที่ 3.18 ซึ่งจะประกอบด้วย GUI ทั้งหมดสองส่วนคือ Real-Time GUI และ FPGA GUI

3.5.1 Real-Time GUI

เป็น GUI ที่ถูกเขียนขึ้นในระดับชั้น Real-Time Target ดังแสดงในภาพที่ 3.19 มีหน้าที่มอนิเตอร์ในส่วนการเชื่อมต่อสื่อสารของระบบที่รับค่าตำแหน่งของมอเตอร์จากรีโซลเวอร์ซึ่งถูกส่งมาเป็นโปรโตคอลแคนบัส รวมถึงการตรวจสอบสถานะความผิดพลาดของระบบเพื่อนำไปใช้ในสำหรับสั่งหยุดการทำงานของระบบ เช่นหากสายสัญญาณแคนบัส ขาดการเชื่อมต่อก็จะมีการแจ้งเตือน และสั่งหยุดการทำงานของมอเตอร์ โดยส่งคำสั่งหยุดไปยังส่วนของ FPGA นอกจากการมอนิเตอร์ในส่วนของการเชื่อมต่อแล้วยังมีหน้าที่ตรวจสอบค่าตัวแปรอื่น ๆ ของระบบอีกด้วย เช่นความเร็วของมอเตอร์ กระแสไฟฟ้า เป็นต้น



ภาพที่ 3.19 Real-Time GUI

3.5.2 FPGA GUI

เป็น GUI ที่สร้างขึ้นในระดับชั้น FPGA ซึ่งใช้สำหรับในการตั้งค่าต่าง ๆ ก่อนจะเริ่มทำการเดินระบบเช่นความถี่ของสัญญาณ PWM ค่าตัวแปร Gain ของระบบ อีกทั้งยังใช้สำหรับการปรับค่า Setpoint ของระบบอีกด้วย ใน FPGA GUI นี้จะมีการเชื่อมต่อกับหน้า GUI ใน Real-Time Target เพื่อนำค่าความผิดพลาดต่าง ๆ ที่ถูกส่งมาประมวลผล และทำการหยุดการทำงานของระบบ FPGA GUI ประกอบด้วยหน้าจอ GUI ของมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมัน และ PMSM

1. FPGA GUI สำหรับ PMSM ขับเคลื่อนล้อ

ส่วนต่าง ๆ ใน FPGA GUI สำหรับ PMSM ขับเคลื่อนล้อดังภาพที่ 3.20

1) Gains

เป็นการปรับค่า Gain ของ PMSM ขับเคลื่อนล้อ (PI Control)

2) Torque Command (%)

เป็นการปรับ Setpoint ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปใน PMSM ขับเคลื่อนล้อ

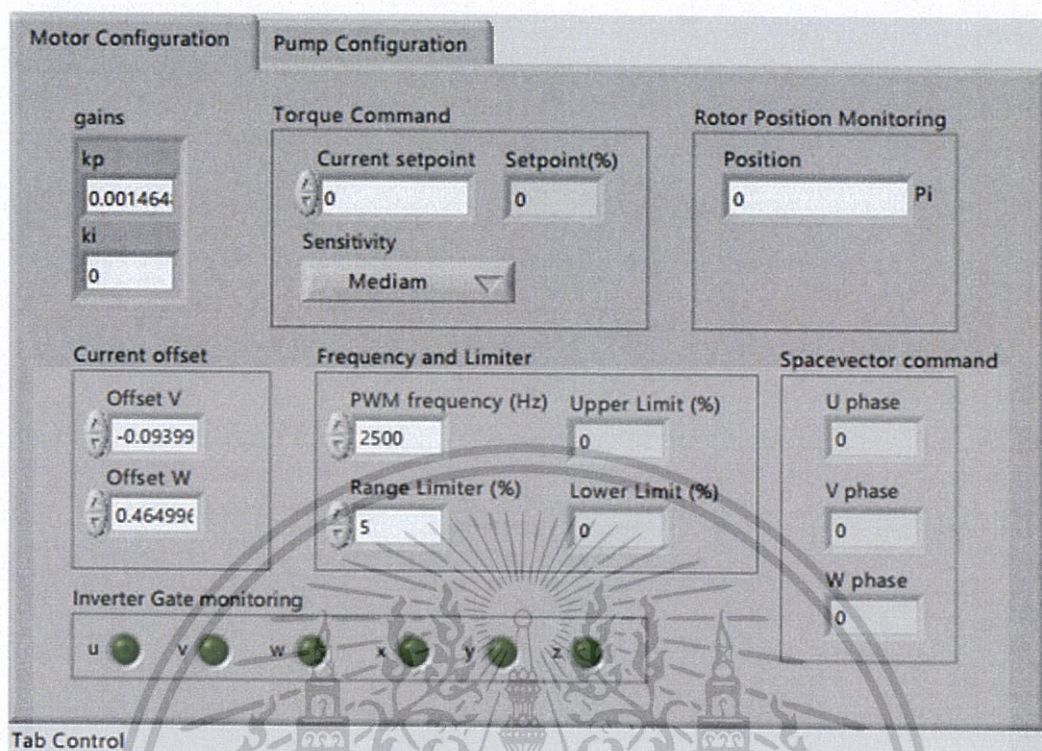
3) Current offset (V)

เป็นการปรับค่า offset ของแรงดันไฟฟ้าที่ถูกวัดมาจากเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า

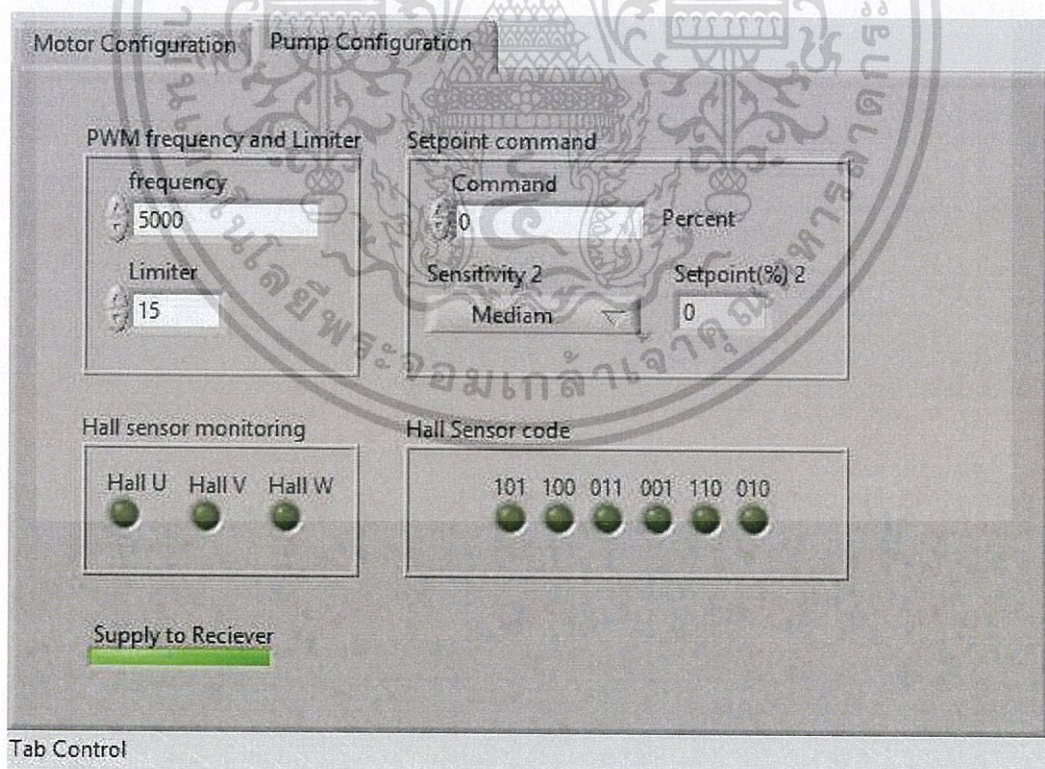
4) Frequency (Hz) and Limiter (%)

- Frequency เป็นการปรับค่าความถี่ของ PWM

- Limiter เป็นการปรับค่าลิมิตของเอาต์พุตที่ส่งไปยัง PMSM โดยเอาต์พุตที่มีค่ามากที่สุดจะเท่ากับค่า Limiter ที่ได้ถูกตั้งค่าไว้ ซึ่งสามารถตั้งค่า Limiter ได้ตั้งแต่ 0 – 100 % เพื่อป้องกันไม่ให้มอเตอร์ทำงานเกินช่วงที่ผู้ใช้ต้องการ
- 5) Rotor Position Monitoring (π)
 - แสดงตำแหน่งโรเตอร์ของ PMSM ขับเคลื่อนล้อยี่มีค่าตั้งแต่ 0-2 π
- 6) Space Vector Command (%)
 - แสดงค่าเอาต์พุตที่ส่งไปยังมอเตอร์ในเฟส U, V และ W
- 7) Inverter Gate Monitoring
 - แสดง Gate ของอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่กำลังทำงานอยู่
- 2. FPGA GUI สำหรับมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมัน
 - ค่าต่าง ๆ ใน FPGA GUI สำหรับมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมัน ดังภาพที่ 3.21
 - 1) Frequency (Hz)
 - เป็นการปรับค่าความถี่ของ PWM
 - 2) Limiter (%)
 - เป็นการปรับค่าลิมิตของเอาต์พุตที่ส่งไปยังมอเตอร์ โดยเอาต์พุตที่มีค่ามากที่สุดจะเท่ากับค่า Limiter ที่ได้ถูกตั้งค่าไว้ ซึ่งสามารถตั้งค่า Limiter ได้ตั้งแต่ 0 – 100 % เพื่อป้องกันไม่ให้มอเตอร์ทำงานเกินช่วงที่ผู้ใช้ต้องการ
 - 3) Command (%)
 - เป็นการปรับค่า Setpoint ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปใน PMSM ขับเคลื่อนล้อยี่ผู้ใช้งานต้องการ
 - 4) Sensitivity
 - เป็นการเลือกระดับความเร็วในการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าจนกว่าจะถึง Setpoint ที่ตั้งค่าไว้ โดยมีทั้งหมด 3 ระดับคือ Low, Medium และ Fast
 - 5) Setpoint(%) 2 (%)
 - แสดงผลของค่า Setpoint ที่เกิดขึ้นจริง
 - 6) Hall sensor Monitoring
 - ไฟแสดงสถานการณ์ตรวจจับตำแหน่งของฮอลล์เซนเซอร์
 - 7) Hall sensor Code
 - แสดงตำแหน่งของโรเตอร์ โดยแสดงผลเป็นรหัสของฮอลล์เซนเซอร์ ซึ่งมีการตรวจจับทั้งหมด 6 ตำแหน่งตาม Space Vector ของ Six-step Control



ภาพที่ 3.20 ค่าพารามิเตอร์ที่สามารถปรับแต่งได้ใน FPGA GUI สำหรับ PMSM ที่ใช้ขับเคลื่อนล้อ



ภาพที่ 3.21 ค่าพารามิเตอร์ที่สามารถปรับแต่งได้ใน FPGA GUI สำหรับมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและสรุปผล

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้กล่าวถึงผลการศึกษาและการดำเนินการทั้งหมดที่เกิดขึ้น การปรับปรุงแก้ไขส่วนต่าง ๆ ทางด้านฮาร์ดแวร์ การสร้าง และการออกแบบซอฟต์แวร์ที่ใช้ รวมทั้งการทดลองต่าง ๆ และผลการทดลองของโปรแกรมขับเคลื่อนมอเตอร์มีความสมบูรณ์ โดยเริ่มจากการทดลองการขับเคลื่อน PMSM ที่จ่ายแรงดันน้ำมันก่อนเพื่อให้ระบบเกียร์สามารถทำงานได้ จากนั้นจึงทำการทดลองการขับเคลื่อน PMSM ของมอเตอร์ขับเคลื่อนล้อ

4.2 ขั้นตอนการทดลอง

4.2.1 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของ PMSM ที่ใช้ขับเคลื่อนล้อ

- Gains

เนื่องจาก PMSM มีขนาดใหญ่ ในการทดลองจึงปรับค่า Gains ที่ค่าต่ำ ๆ เพื่อความปลอดภัย และป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น จึงเลือกค่า Gains ที่ 0.0010 0.0015 0.0020 และ 0.0025 ตามลำดับ

- Current offset

เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ามี่ค่าเท่ากับ 0.009399 โวลต์ ที่เฟส V และมีค่าเท่ากับ -0.46499 โวลต์ ที่เฟส W ดังนั้นจึงทำการปรับค่า Current offset ในเฟส V และในเฟส W เท่ากับ -0.009399 และ 0.46499 โวลต์ ตามลำดับ

- Frequency

ในการทดลองขับ PMSM ที่ใช้ขับเคลื่อนล้อจะใช้ค่าความถี่ของ PWM ที่ 2,500 Hz

- Limiter

ในการทดลองขับ PMSM ที่ใช้ขับเคลื่อนล้อจะใช้ค่า Limiter เท่ากับ 5% เพื่อให้มีความปลอดภัยสูงสุด

- Torque Command

หลังจากตั้งค่าทั้งหมดแล้ว จะทำการตั้งค่า Setpoint ที่ต้องการก่อนจะทำการขับ PMSM ที่ใช้ขับเคลื่อนล้อ

4.2.2 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมัน

- Frequency

ในการทดลองขับมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมัน ที่ใช้ขับเคลื่อนล้อจะใช้ค่าความถี่ของ PWM ที่ 5,000 Hz

- Limiter

ในการทดลองขับมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมันจะใช้ค่า Limiter เท่ากับ 15% เพื่อให้มีความปลอดภัยสูงสุด

- Sensitivity

ในการทดลองขับมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมันจะใช้ค่า Sensitivity ที่ระดับ Medium

- Command

หลังจากตั้งค่าทั้งหมดแล้วจะทำการตั้งค่า Setpoint ที่ต้องการก่อนจะทำการขับมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมัน

4.2.3 การทดลองขับ PMSM ขับเคลื่อนล้อ

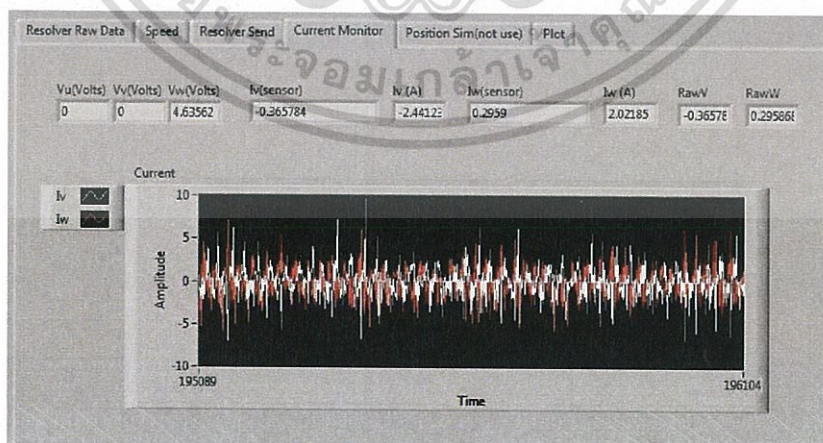
- การทดลองที่ 1

การทดสอบสัญญาณควบคุม PMSM ด้วยหลักการ FOC โดยการปรับค่าพารามิเตอร์

ต่าง ๆ

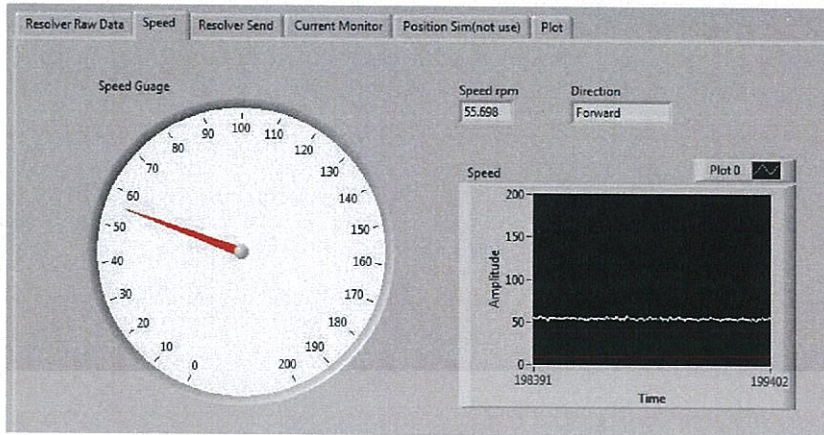
ตารางที่ 4.1 การทดลองที่ 1

No.	Gain (K_p)	Setpoint (S_p)	Rotation	RPM
1	0.0015	60%	Forward	55.698
2	0.0015	-60%	Reverse	50.505

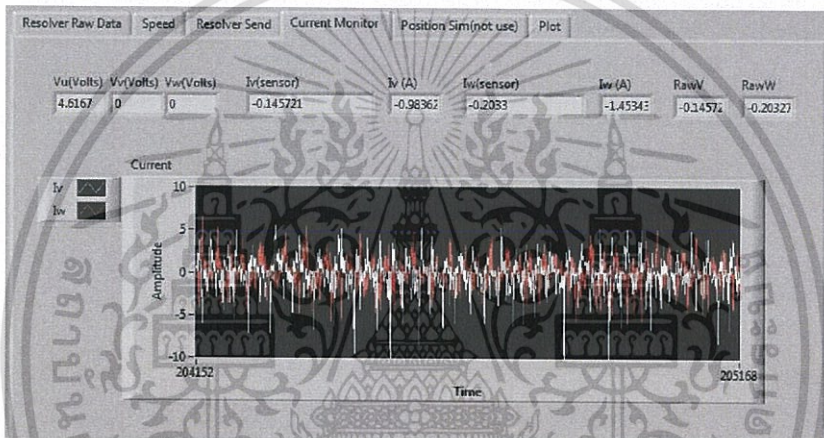


ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.0015$ $S_p = 60\%$

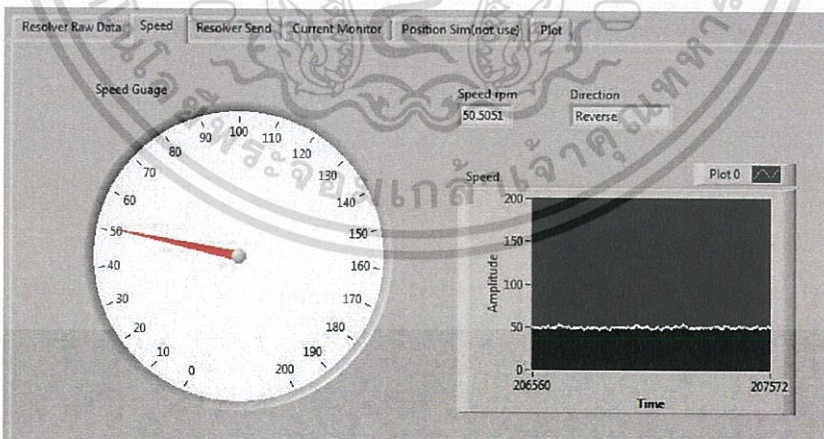
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.0015$ $S_p = 60\%$



ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.0015$ $S_p = -60\%$



ภาพที่ 4.4 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.0015$ $S_p = -60\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

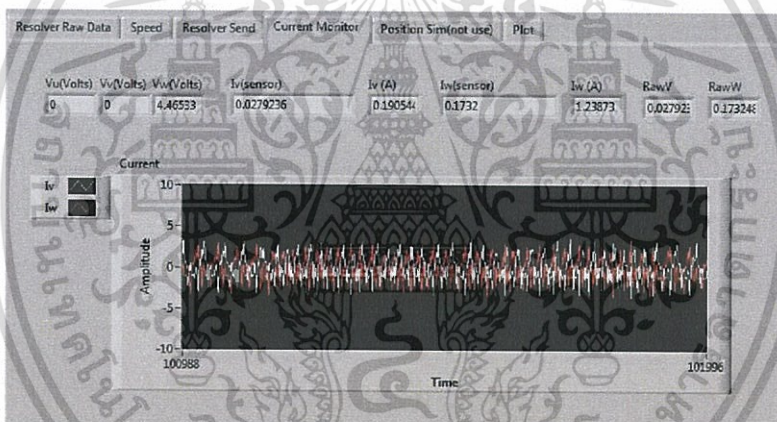
- การทดลองที่ 2

เนื่องจากผลการทดลองที่ 1 จะเห็นได้ว่าการรบกวนของสัญญาณกับผลตอบสนองจากการควบคุม PMSM ด้วยหลัก FOC จึงใช้หลักการ Lowpass Filter เพื่อป้องกันการรบกวนของสัญญาณ และดูพฤติกรรมที่เปลี่ยนไปจากการเพิ่มค่า Filter

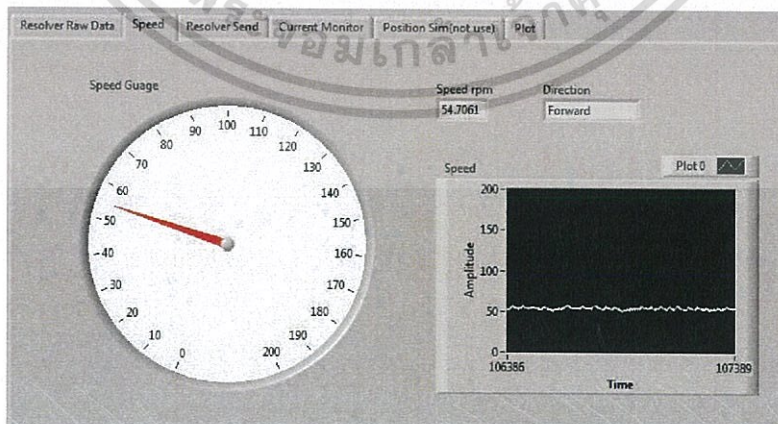
ตารางที่ 4.2 การทดลองที่ 2

No.	Gain (K_p)	Setpoint (S_p)	Filter (f_{cutoff})	RPM
1	0.0015	60%	50 Hz	54.706
2	0.0015	60%	100 Hz	54.935
3	0.0015	60%	200 Hz	53.103

ในการทดลองครั้งที่ 1 จะใช้ค่า $K_p = 0.0015$ $S_p = 60\%$ และค่า $f_{cutoff} = 50$ Hz ได้ผลการทดลองดังนี้



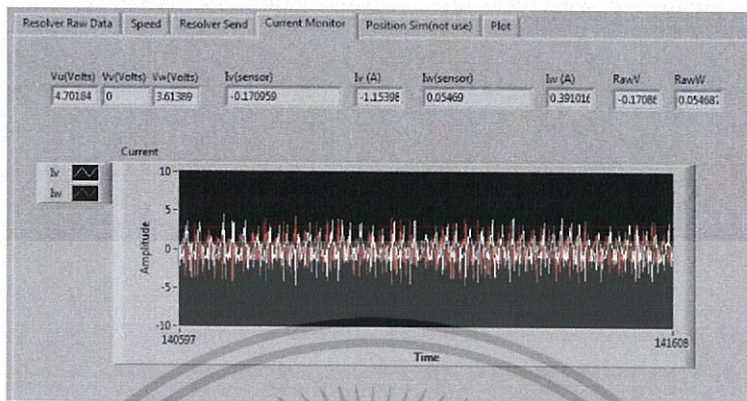
ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.0015$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 60\%$



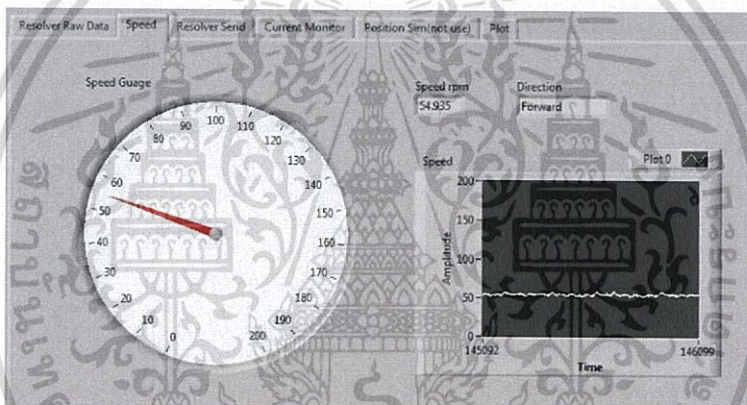
ภาพที่ 4.6 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.0015$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 60\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองครั้งที่ 2 จะใช้ค่า $K_p = 0.0015$ $S_p = 60\%$ และค่า $f_{cutoff} = 100$ Hz
 ได้ผลการทดลองดังนี้

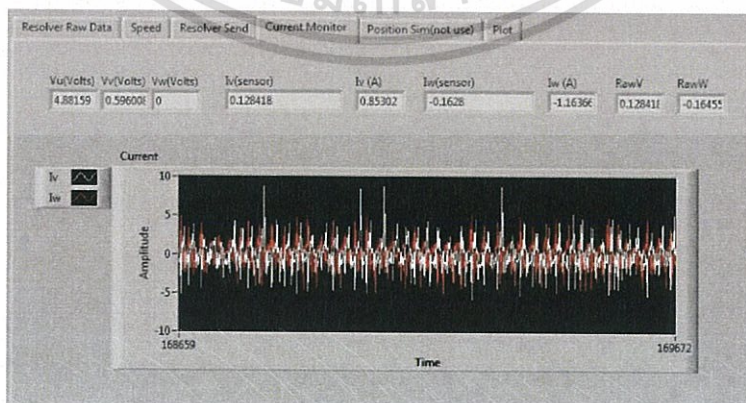


ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.0015$ $f_{cutoff} = 100$ Hz และ $S_p = 60\%$



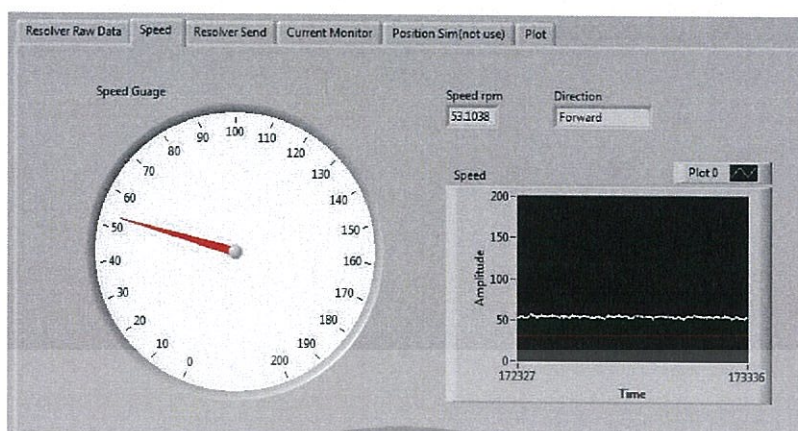
ภาพที่ 4.8 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.0015$ $f_{cutoff} = 100$ Hz และ $S_p = 60\%$

ในการทดลองครั้งที่ 3 จะใช้ค่า $K_p = 0.0015$ $S_p = 60\%$ และค่า $f_{cutoff} = 200$ Hz
 ได้ผลการทดลองดังนี้



ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.0015$ $f_{cutoff} = 200$ Hz และ $S_p = 60\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.10 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.0015$ $f_{cutoff} = 200$ Hz และ $S_p = 60\%$

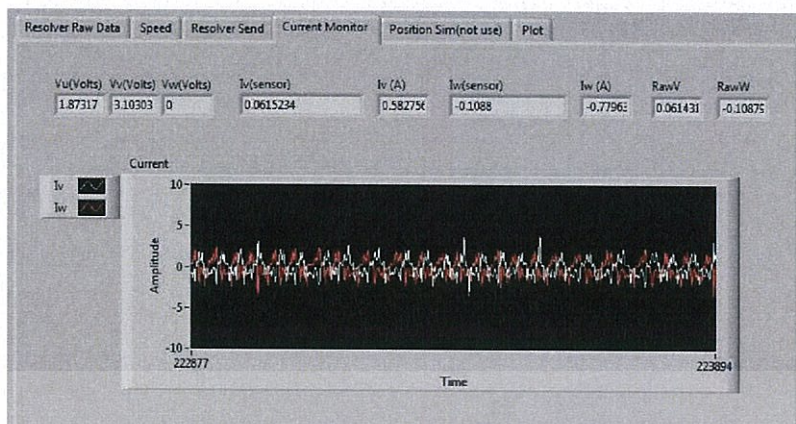
- การทดลองที่ 3

เนื่องจากผลการทดลองที่ 2 จะเห็นได้ว่าการใช้ Filter จะมีความเหมาะสม โดยดูจากการรบกวนของระบบ และในการทดลองนี้จะทำการเปลี่ยนค่า K_p เพื่อหาผลตอบสนองที่เหมาะสม

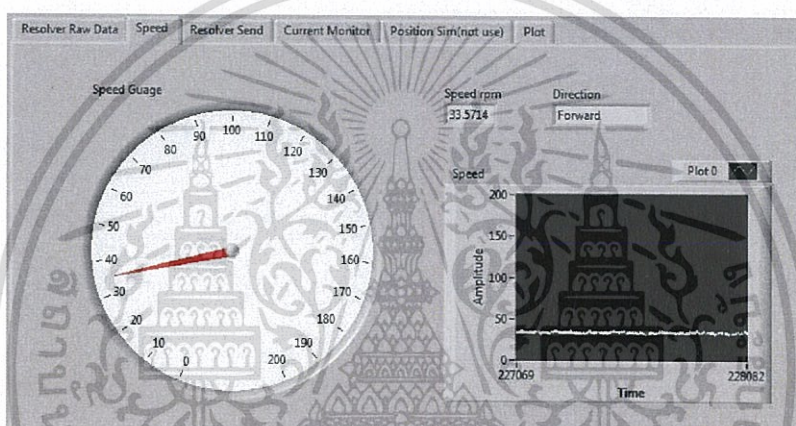
ตารางที่ 4.3 การทดลองที่ 3

No.	Gain (K_p)	Setpoint (S_p)	Filter (f_{cutoff})	RPM
1	0.0010	60%	50 Hz	33.5714
2	0.0015	60%	50 Hz	54.7061
3	0.0020	40%	50 Hz	45.1688
4	0.0025	60%	50 Hz	52.9512

ในการทดลองครั้งที่ 1 จะใช้ค่า $K_p = 0.0010$ $S_p = 60\%$ และค่า $f_{cutoff} = 50$ Hz ได้ผลการทดลองดังนี้

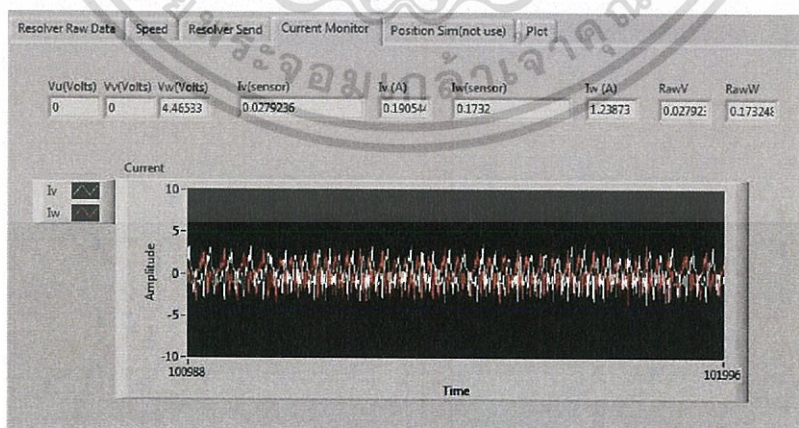


ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.0010$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 60\%$



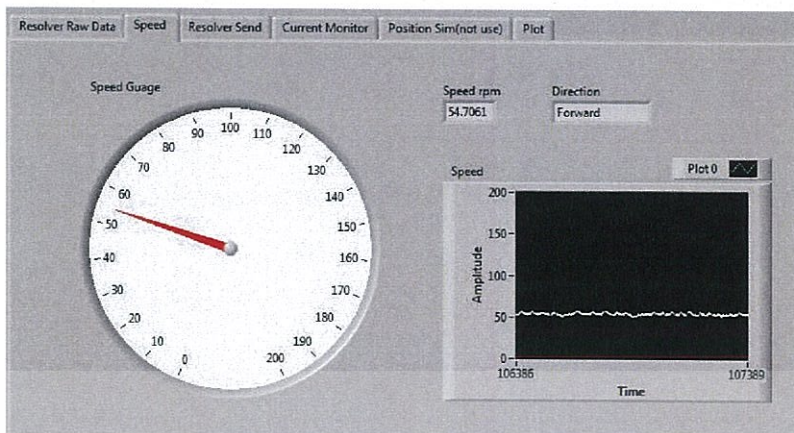
ภาพที่ 4.12 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.0010$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 60\%$

ในการทดลองครั้งที่ 2 จะใช้ค่า $K_p = 0.0015$ $S_p = 60\%$ และค่า $f_{cutoff} = 50$ Hz
ได้ผลการทดลองดังนี้



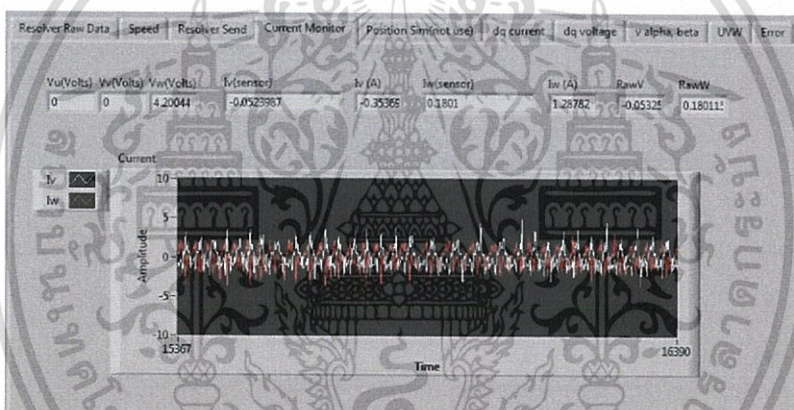
ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.0015$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 60\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

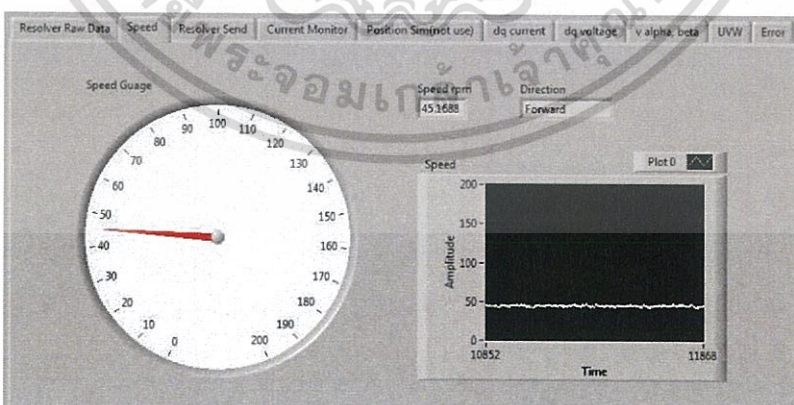


ภาพที่ 4.14 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.0015$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 60\%$

ในการทดลองครั้งที่ 3 จะใช้ค่า $K_p = 0.0020$ $S_p = 60\%$ และค่า $f_{cutoff} = 50$ Hz
ได้ผลการทดลองดังนี้



ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.0020$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 40\%$



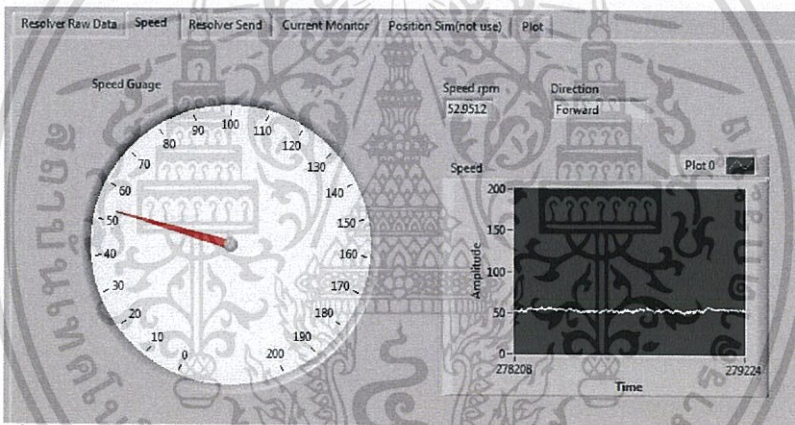
ภาพที่ 4.16 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.0020$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 40\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองครั้งที่ 4 จะใช้ค่า $K_p = 0.0025$ $S_p = 60\%$ และค่า $f_{cutoff} = 50$ Hz
 ได้ผลการทดลองดังนี้

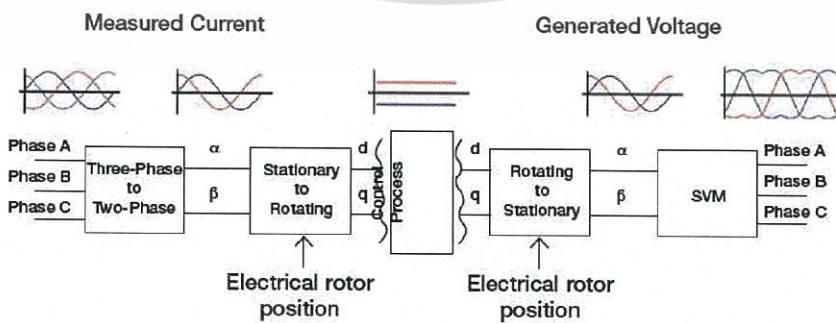


ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.0025$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 60\%$



ภาพที่ 4.18 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.0025$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 60\%$

- การทดลองที่ 4
- นำผลของการทดลองที่ได้จากการทดลองที่ 1 – 3 มาเทียบกับทฤษฎีดังภาพที่ 4.19

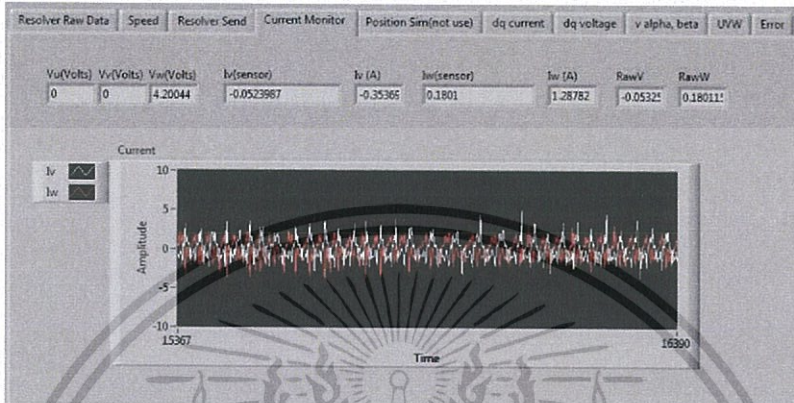


ภาพที่ 4.19 โครงสร้างพื้นฐานของ FOC

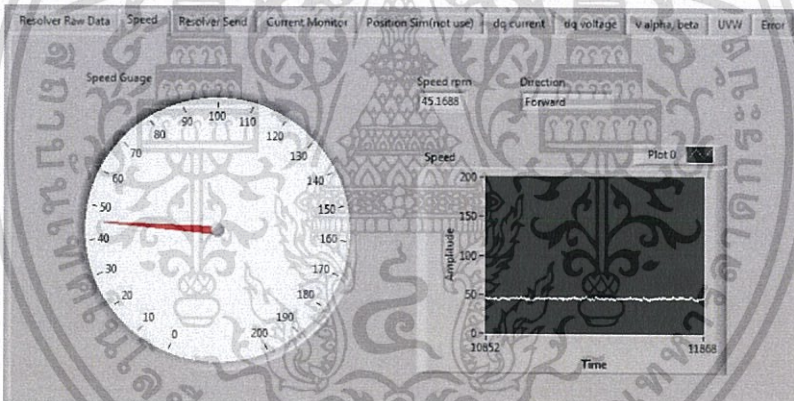
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองนี้จะเป็นการเปรียบเทียบสัญญาณตามโครงสร้างพื้นฐานของ FOC โดยดูผลตอบสนองของการควบคุม PMSM

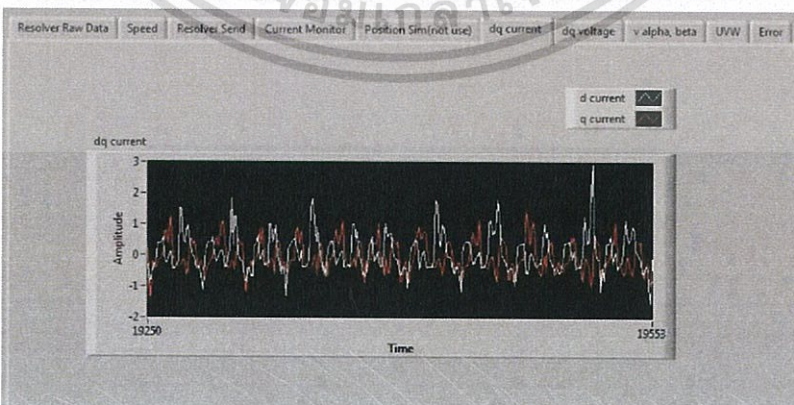
ในครั้งนี้จะใช้ค่า $K_p = 0.0020$ Filter = 50 Hz และ $S_p = 40\%$ ได้ผลการทดลองดังนี้



ภาพที่ 4.20 กราฟแสดงค่ากระแสที่ $K_p = 0.002$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 40\%$

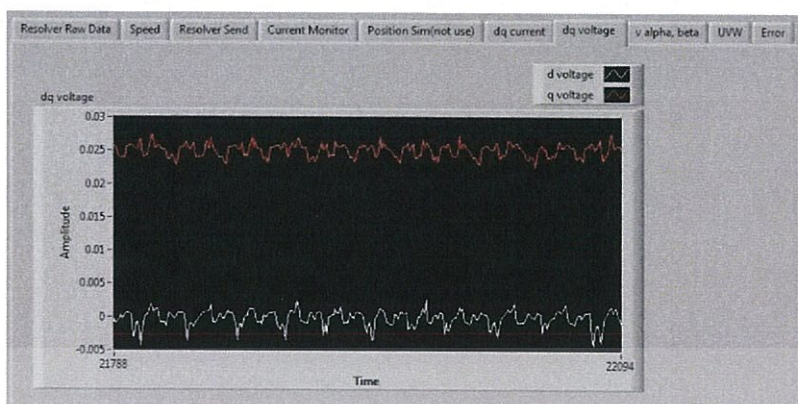


ภาพที่ 4.21 ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ $K_p = 0.002$ $f_{cutoff} = 50$ Hz และ $S_p = 40\%$

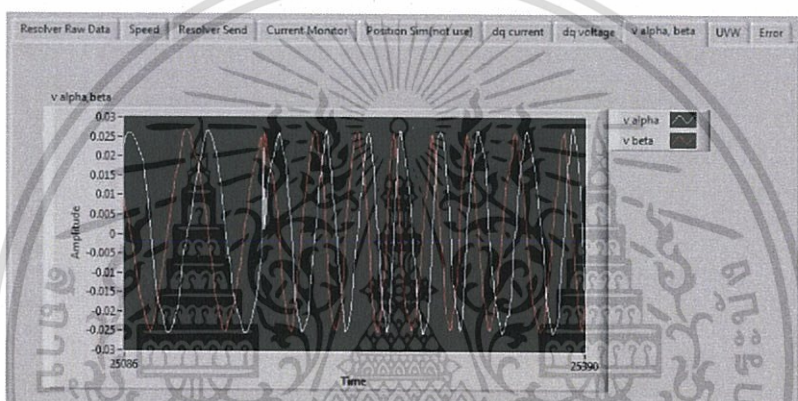


ภาพที่ 4.22 กราฟแสดงค่ากระแส I_d I_q

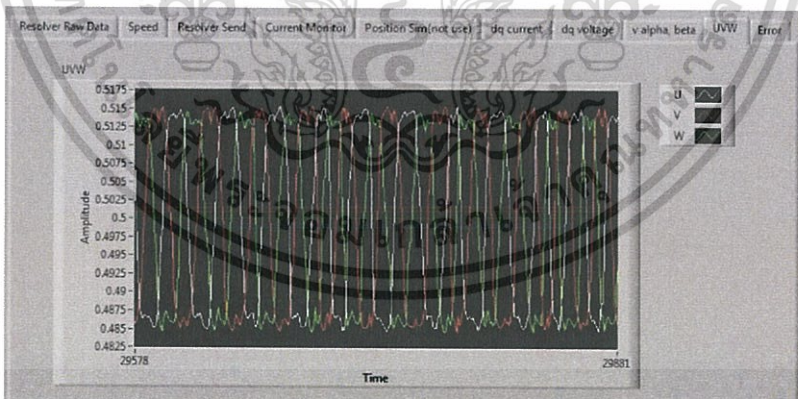
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.23 กราฟแสดงค่าแรงดัน V_{d^*} V_{q^*}



ภาพที่ 4.24 กราฟแสดงค่าแรงดัน V_{α} V_{β}

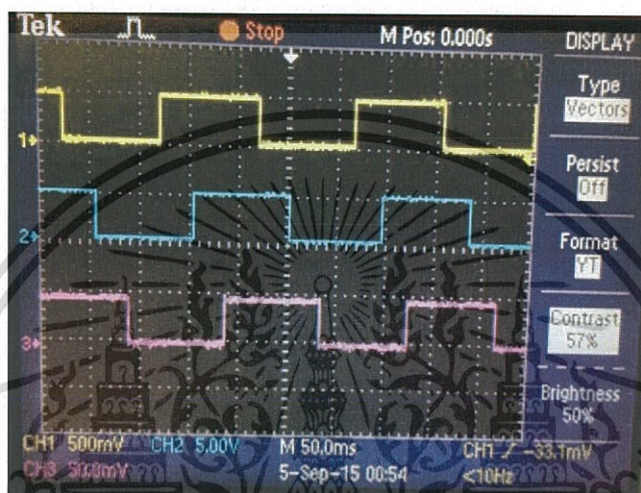


ภาพที่ 4.25 กราฟ SVPWM

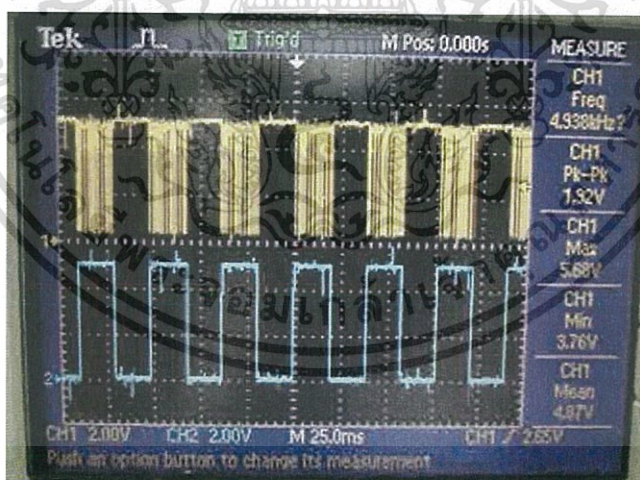
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 การทดลองขับมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมัน

การทดลองนี้จะสังเกตพฤติกรรมของสัญญาณ และผลที่เกิดขึ้นที่เพลาารถยนต์เมื่อมีการทำงานของ PMSM และมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมันในขณะที่ทำการขับ PMSM สำหรับขับเคลื่อนล้อรถยนต์ เนื่องจากในการทดลองนี้ขนาดแรงดันสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นแรงดันสูงขนาด 310 โวลต์ เพื่อความปลอดภัยในการดำเนินงานจึงทำการใส่ค่า Setpoint และสังเกตพฤติกรรมที่ช่วง 0 ถึง 15 เปอร์เซนต์เท่านั้น



ภาพที่ 4.26 สัญญาณฮอลล์เซ็นเซอร์ของมอเตอร์ในแต่ละเฟส



ภาพที่ 4.27 สัญญาณ PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองของมอเตอร์จ่ายแรงดันน้ำมัน

Setpoint (%)	แรงดันที่ PMSM (Volt)	การทำงานของเพลาารยนต์
0	0	มอเตอร์ไม่หมุน และเพลาารยนต์หยุดนิ่ง
1	3.1	มอเตอร์เริ่มหมุน และเพลาารยนต์หยุดนิ่ง
2	6.2	มอเตอร์เริ่มหมุนเร็วขึ้นตามขนาดแรงดัน
3	9.3	มอเตอร์หมุนเร็วขึ้น
4	12.4	มอเตอร์หมุนเร็วขึ้น
5	15.5	มอเตอร์หมุนเร็วขึ้น เพลาารยนต์เริ่มทำการหมุน กำลังจาก PMSM ขับเคลื่อนล้อถูกส่งไปยัง CVT
6	18.6	มอเตอร์หมุนเร็วขึ้น เพลาารยนต์หมุน โดยมีจังหวะกระตุกเล็กน้อย
7	21.7	มอเตอร์หมุนเร็วขึ้น เพลาารยนต์หมุน โดยมีจังหวะกระตุกเล็กน้อย
8	24.8	เพลาารยนต์หมุนอย่างราบรื่น และความเร็วของมอเตอร์เพิ่มมากขึ้น
9	27.9	เพลาารยนต์หมุนอย่างราบรื่นและความเร็วของมอเตอร์เพิ่มมากขึ้น
10	31.0	เพลาารยนต์หมุนอย่างราบรื่นและความเร็วของมอเตอร์เพิ่มมากขึ้น
11	34.1	เพลาารยนต์หมุนอย่างราบรื่นและความเร็วของมอเตอร์เพิ่มมากขึ้น
12	37.2	เพลาารยนต์หมุนอย่างราบรื่นและความเร็วของมอเตอร์เพิ่มมากขึ้น
13	40.3	เพลาารยนต์หมุนอย่างราบรื่นและความเร็วของมอเตอร์เพิ่มมากขึ้น
14	43.4	เพลาารยนต์หมุนอย่างราบรื่นและความเร็วของมอเตอร์เพิ่มมากขึ้น
15	46.5	เพลาารยนต์หมุนอย่างราบรื่นและความเร็วของมอเตอร์เพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการออกแบบซอฟต์แวร์ระบบควบคุม PMSM ได้ทำการศึกษา Park's transformation และ Clarke's transformation เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับให้อยู่ในรูปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อใช้ในการควบคุม และทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงกลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ในการป้อนสัญญาณควบคุมไปควบคุม PMSM โดยทำการตรวจวัดค่าความเร็วของมอเตอร์ จากนั้นจะได้ค่าความผิดพลาดเพื่อนำมาทำการชดเชยค่าความผิดพลาด โดยการควบคุมดังกล่าวผ่านการคำนวณด้วยโปรแกรม LabVIEW ที่สร้างขึ้นผ่านตัวควบคุม NI CompactRIO ที่เป็นตัวปฏิบัติการแบบ Real-Time และ FPGA ทำให้ประมวลผลได้รวดเร็ว

ในการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบควบคุม PMSM โดยการรับค่ากระแสไฟฟ้าของ PMSM ผ่าน Current sensor จากนั้นซอฟต์แวร์จะคำนวณความเร็วรอบของมอเตอร์ และหาค่าความผิดพลาดจากค่า error แล้วใช้การควบคุมมอเตอร์แบบ FOC เพื่อปรับแรงบิดของมอเตอร์

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

1. เนื่องจากผู้จัดทำไม่มีความรู้พื้นฐานทางด้านโปรแกรม LabVIEW จึงเกิดความล่าช้าในการศึกษา และออกแบบโปรแกรมการควบคุม PMSM
2. เกิดอุบัติเหตุไฟฟ้าลัดวงจรควบคุมมอเตอร์ส่วนเฟลารถยนต์ ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาวงจรการป้องกันการเกิดไฟฟ้าลัดวงจร เพราะวงจรควบคุมมอเตอร์เฟลารถยนต์อาจมีไม่เพียงพอ
3. อุปกรณ์บางส่วนที่นำมาใช้ ผ่านการจมน้ำมาก่อน จึงต้องนำชิ้นส่วนไปทำความสะอาดก่อนนำมาศึกษา
4. โมดูล I/O ที่มีไม่เพียงพอต่อความต้องการ จึงต้องสั่งซื้อโมดูลจากต่างประเทศ
5. มีสิ่งที่ต้องศึกษาเพิ่มตลอดในระยะเวลาการทำงาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้ดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง
6. อุปกรณ์ส่วนใหญ่ไม่มีคู่มือในการใช้งาน จึงทำให้เสียเวลาเป็นอย่างมากในการศึกษาทำความเข้าใจอุปกรณ์นั้น ๆ
7. ข้อจำกัดในการทำงาน เนื่องจากต้องเดินทางไปทำงานที่อุร์ถยนต์จึงทำให้การทดลองกับอุปกรณ์จริงทำได้ยาก

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องอย่างละเอียดก่อนทำงานในแต่ละขั้นตอน
2. เก็บรายละเอียดของงานให้เป็นระบบระเบียบมากกว่านี้
3. ปรับปรุงระบบการทำงานของซอฟต์แวร์ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ให้มีเสถียรภาพ และให้มีความทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Carrilo Arroyo, Enrique L. *Modeling and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System*. Master of Science in Electrical Engineering, University of FUERTO RICO MAYAGUEZ CAMPUS, 2006.
- [2] *พื้นฐานของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้า*, เข้าถึงเมื่อ 9 มีนาคม พ.ศ. 2559, <http://ienergyguru.com/2015/11/มอเตอร์ไฟฟ้า>
- [3] A. Maamoun, Y. M. Alsayed, and A. Shaltout. “*Space-Vector PWM Inverter Feeding a Permanent-Magnet Synchronous Motor*” International Scholarly and Scientific Research & Innovation, 2010
- [4] Bose, Bimal K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. India-Delhi: Pearson Education, 2002.
- [5] *Field Orientated Control of 3-Phase AC-Motors*, เข้าถึงเมื่อ 15 สิงหาคม พ.ศ. 2558, <http://www.ti.com/lit/an/bpra073/bpra073.pdf>
- [6] *Technology for modern CVT transmissions*, เข้าถึงเมื่อ 17 พฤศจิกายน พ.ศ. 2558, <http://www.tsmotor.co.th/ความรู้-เกียร์อัตโนมัติแบบ-cvt-continuously-variable-transmission.html>
- [7] *Meet the CompactRIO Controller, a Rugged Embedded System for Your Control or Monitoring Application*, เข้าถึงเมื่อ 4 เมษายน พ.ศ. 2559, <http://www.ni.com/white-paper/52251/en/>