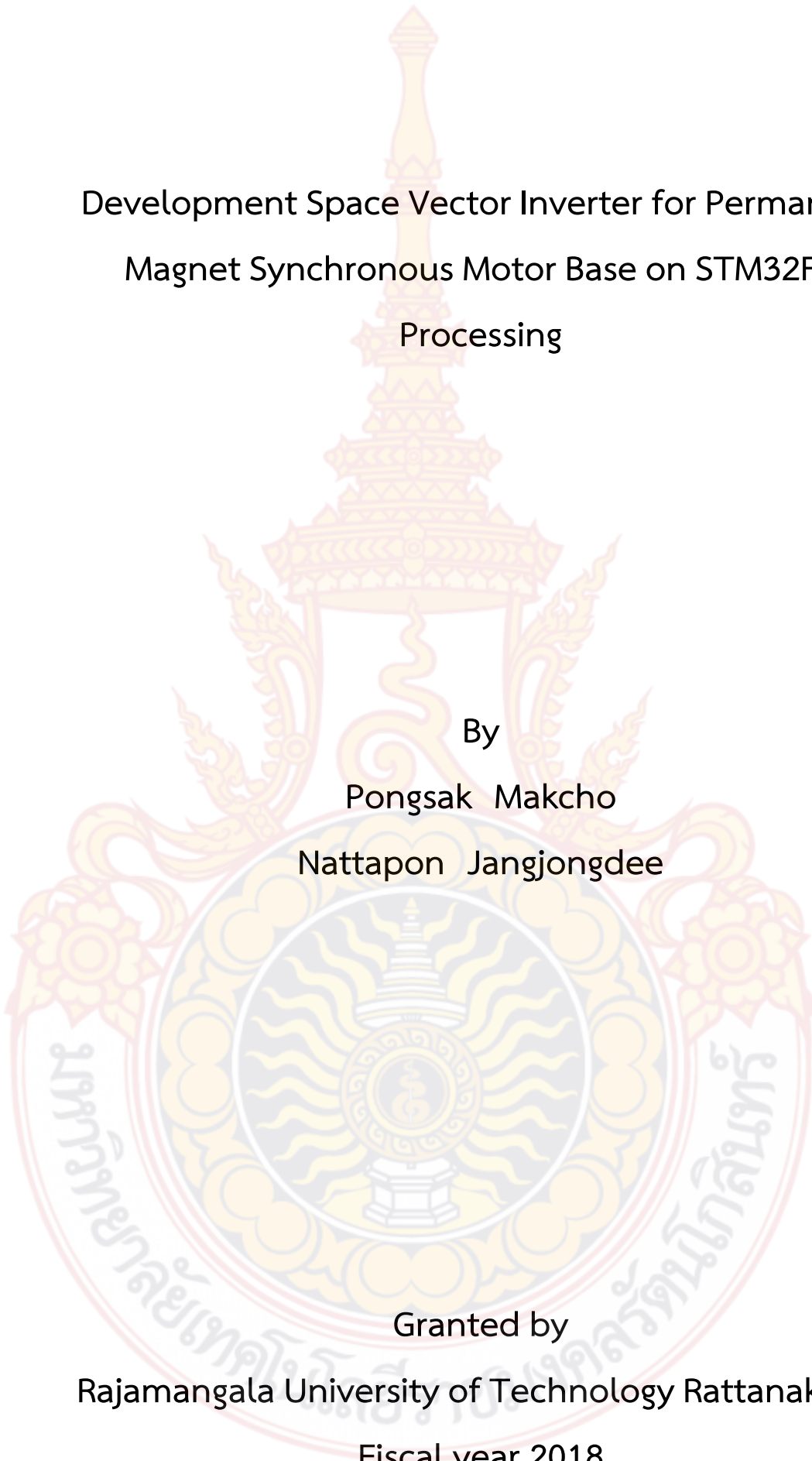




พัฒนาอินเวอร์เตอร์แบบสเปซเวกเตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์  
ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรโดยใช้ STM32F4  
เป็นตัวประมวลผล

โดย  
พงศ์ศักดิ์ มัคโซ  
ณัฐพล แจ้งจงดดี

สนับสนุนงบประมาณโดย  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
ประจำปีงบประมาณ 2561



Development Space Vector Inverter for Permanent  
Magnet Synchronous Motor Base on STM32F4  
Processing

By  
Pongsak Makcho  
Nattapon Jangjongdee

Granted by  
Rajamangala University of Technology Rattanakosin  
Fiscal year 2018

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี ที่เอื้ออำนวยเกี่ยวกับสถานที่ห้องปฏิบัติการ ตลอดจนการติดตามการดำเนินงาน และการจัดส่งเอกสารที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย ผู้จัดทำหวังว่างานวิจัยชิ้นนี้จะก่อประโยชน์ให้กับมหาวิทยาลัยฯ และคณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี เพื่อเป็นองค์ความรู้สำหรับนักศึกษา รวมถึงบุคลากรและผู้ที่เกี่ยวข้อง ขอขอบคุณครับ

นายพงศศักดิ์ มัคโซ และคณะฯ

กันยายน 2561



## บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : A8/2559

ชื่อโครงการ : พัฒนาอินเวอร์เตอร์แบบสเปซเวกเตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรโดยใช้STM32F4 เป็นตัวประมวลผล

ชื่อนักวิจัย : นายพงศศักดิ์ มัคโซ นายณัฏฐพล แจ่มจงดี

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบควบคุมสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM) เริ่มจากการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์และจากนั้นทำการสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อจำลองการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร การควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรโดยวิธีการแบบ Field Oriented Control (FOC) การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับลูปการควบคุมกระแส (iq, id) และลูปการควบคุมความเร็ว (n) และการสร้างชิ้นงานของชุดควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร เพื่อใช้สำหรับการทดสอบการทำงานเปรียบเทียบกับการทำงานโดยโปรแกรม

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมพีไอของลูปการควบคุมกระแส (iq, id) และลูปการควบคุมความเร็ว (n) สามารถรันดีเสถียรภาพของระบบควบคุมได้เป็นอย่างดี เมื่อทำการทดสอบจริงโดยระบบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้น ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการจำลองการทำงานและระบบควบคุมสามารถควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร, STM32F4, อินเวอร์เตอร์แบบสเปซเวกเตอร์

E-mail Address : pongsak-mk@hotmail.com

ระยะเวลาโครงการ : 1 ตุลาคม 2560 - 30 กันยายน 2561

## Abstract

**Code of project** : A8/2559  
**Project name** : Development Space Vector Inverter for Permanent Magnet Synchronous Motor Base on STM32F4 Processing  
**Researcher name** : Mr.Pongsak Makcho Mr.Nattapon Jangjongdee

This research presents the designing and building control system for the permanent magnet synchronous PMSM. For the first is to make the mathematic model of PMSM. And then the model that is made by the Matlab/Simulink software is implemented to simulate the operating of PMSM. Controlling PMSM by using the field oriented control (FOC) is proposed. Designing of the PI controller for the current-loop control and speed-loop control is depicted. Finally, the test bench for testing PMSM is constructed to compare with the simulation by using the software.

The experimental results reflect that the PI controller design of current-loop and speed-loop can guarantee the stability of the control system when the practical test is performed. The result of testing is corresponding with the simulation, and the control system is able to control PMSM effectively.

**Keywords** : Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), STM32F4, SVPWM Inverter

---

**E-mail Address** : pongsak-mk@hotmail.com

**Period of Project** : 1<sup>st</sup> October 2017 – 30<sup>th</sup> September 2018

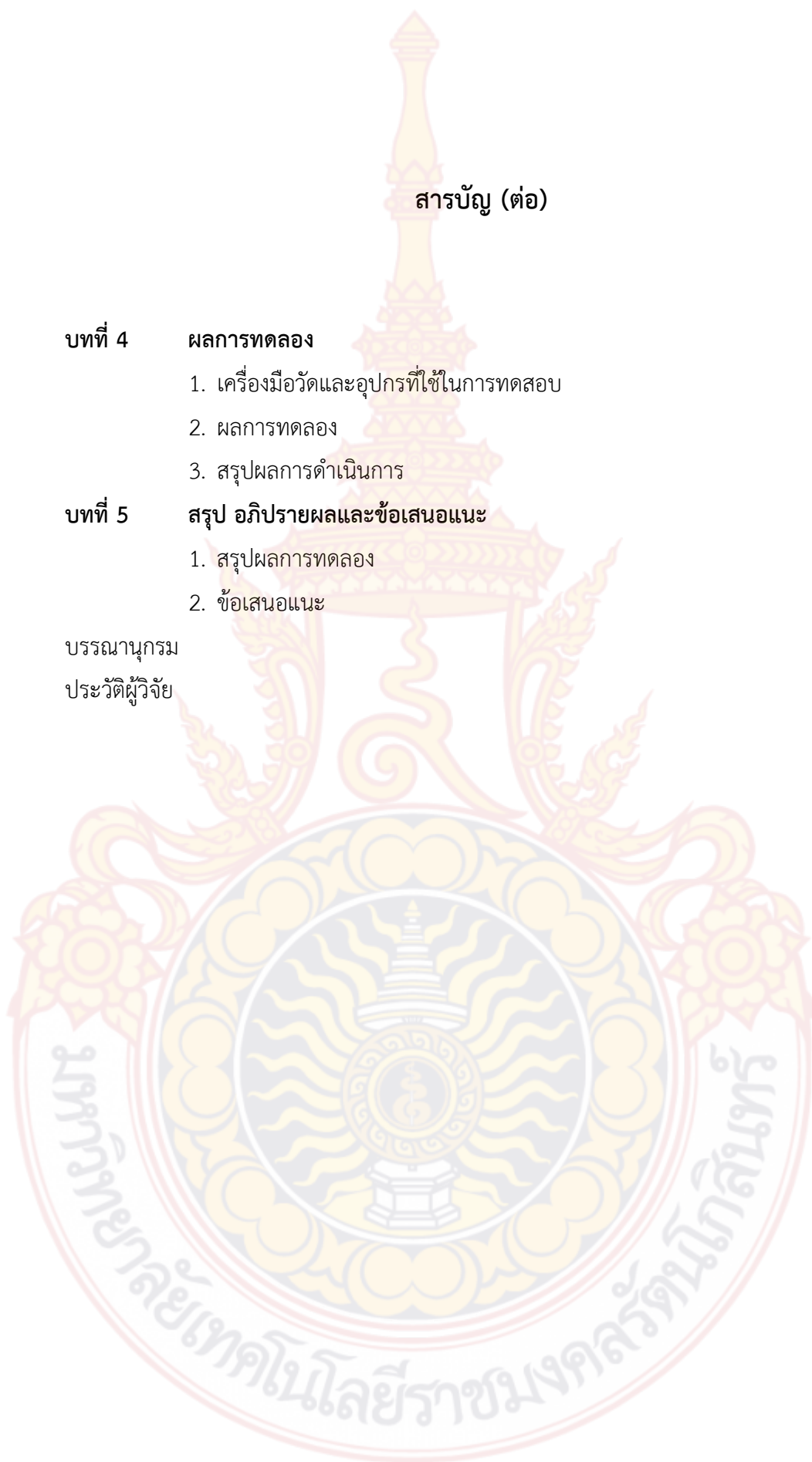


## สารบัญ

	หน้า	
กิตติกรรมประกาศ	ก	
บทคัดย่อภาษาไทย	ข	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค	
สารบัญ	ง	
สารบัญตาราง	ฉ	
สารบัญภาพ	ช	
<b>บทที่ 1</b>	<b>บทนำ</b>	
	1	
	1. หลักการและเหตุผล	1
	2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	6
	3. ขอบเขตของโครงการวิจัย	6
	4. วิธีการดำเนินการวิจัย	6
	5. ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ	7
<b>บทที่ 2</b>	<b>ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	8
	1. มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร	8
	2. ผลการจำลองการทำงานของการทำงานของการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรโดยโปรแกรม Matlab/Simulink	28
	3. การควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธีการ Field Oriented Control (FOC)	33
	4. Maximum torque per ampere control	36
	5. การปรับลูปค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอ (Tuning of the PI current controllers)	41
	6. ผลการจำลองการทำงานของการทำงานของการควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรโดยการใช้วิธีการควบคุมแบบ Field Oriented Control	45
<b>บทที่ 3</b>	<b>วิธีการดำเนินการ</b>	46
	1. การออกแบบวงจรการทำงานของระบบสมองกล	46
	2. ระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้า	48
	3. วงจรตรวจวัดสัญญาณ	49

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการทดลอง</b>	56
	1. เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	56
	2. ผลการทดลอง	57
	3. สรุปผลการดำเนินการ	61
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ</b>	62
	1. สรุปผลการทดลอง	62
	2. ข้อเสนอแนะ	63
บรรณานุกรม		64
ประวัติผู้วิจัย		66



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าพารามอเตอร์ของมอเตอร์ SPMSM	10
2	รูปแบบสวิตช์และค่าแรงดันเทียบจุดสเทินเสมือนของอินเวอร์เตอร์	20
3	ข้อมูลสำหรับการเลือกใช้เซ็นเซอร์กระแส LTS 25-NP	51





## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 การแบ่งชนิดโดยทั่วไปของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร	1
2 การแบ่งชนิดโดยทั่วไปของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร	2
3 โรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรในรถยนต์ Toyota Prius 2006	2
4 สเตเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรในรถยนต์ Toyota Prius 2006	3
5 โครงสร้างของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรของบริษัท General Motor	4
6 ไดอะแกรมส่วนประกอบของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร	4
7 Permanent magnet machines classification[Chandana,2002]	9
8 Cross section showing the differences between the SMPMSM and the IPMSM	9
9 Diagram representation of the simulation model for the SPMSM	13
10 Simulink model expressing the current calculation block	14
11 Simulink model expressing the flux calculation block	14
12 Simulink model expressing the calculation of the shaft speed	15
13 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อน PMSM	15
14 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ 3 เฟส	16
15 หลักการสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชั่น PWM	17
16 ระบบไฟ 3 เฟสที่สมมาตร	18
17 แหล่งจ่ายไฟแบบอินเวอร์เตอร์	19
18 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในแต่ละการทำงานของสวิตช์	21
19 วงจรที่ได้จากการทำงานของสวิตช์และขนาดของแรงดันที่ตกคร่อมโหลด	22
20 ส่วนประกอบการสร้างสัญญาณ PWM บนโปรแกรม MATLAB Simulink	23
21 โครงสร้างภายในบล็อก 6-Switches	24
22 สัญญาณด้านนอกจากวงจรแบบจำลองสวิตช์ทั้งหกตัวหรืออินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	24
23 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากด้านออกของอินเวอร์เตอร์	25
24 เพิ่มบล็อก Voltage Estimate เพื่อสร้างแรงดันเฟส	27
25 ภายในบล็อก Voltage Estimate เพื่อสร้างแรงดันเฟส	27
26 ไดอะแกรมการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีการ V/F	28

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
27 รูปคลื่นแรงดัน $v_a(t)$ , $v_b(t)$ , $v_c(t)$ และกระแส $i_a(t)$ , $i_b(t)$ , $i_c(t)$	29
28 รูปคลื่นกระแส $i_a(t)$ , $i_b(t)$ , $i_c(t)$ , รูปคลื่นกระแส $i_d, i_q$ , รูปคลื่นความเร็ว $\omega_r$ และรูปคลื่นของมุมโรเตอร์ $\theta_r$	30
29 ไดอะแกรมการทดสอบการขับเคลื่อน PMSM แบบ Open-loop	31
30 รูปคลื่นกระแส $i_a(t)$ , $i_b(t)$ , $i_c(t)$ , รูปคลื่นกระแส $i_d, i_q$ , รูปคลื่นความเร็ว $\omega_r$ และรูปคลื่นของมุมโรเตอร์ $\theta_r$	32
31 รูปคลื่นกระแส $i_a(t)$ , $i_b(t)$ , $i_c(t)$ , รูปคลื่นกระแส $i_d, i_q$ , รูปคลื่นความเร็ว $\omega_r$ และรูปคลื่นของมุมโรเตอร์ $\theta_r$	33
32 Phasor diagram illustrating the $dq$ control reference frame	34
33 Field Oriented Control โครงสร้างแบบทั่วไป	35
34 Vector representation of the minimum stator current vector at a given torque level for an PMSM	36
35 MTPA curve for the Sauer-Danfoss motor used in this project	38
36 MTPA curve for the Sauer-Danfoss motor with varying $L_d$ inductance	39
37 MTPA curve for the Sauer-Danfoss motor with varying $L_q$ inductance	39
38 Generation of the reference $i_d^*$ and $i_q^*$ currents (MTPA curve) from the torque reference	40
30 Simulink model of the feed-forward control using look-up tables	40
40 Structure of the PI current controllers	41
41 Design of the $i_d$ and $i_q$ current loop	42
42 บล็อกไดอะแกรมของลูควบคุมความเร็ว	44
43 บล็อกไดอะแกรมของลูกระแสเมื่อพิจารณาตามเงื่อนไข	44
44 ผลการจำลองการทำงานของตัวควบคุมสำหรับลูกระแส $i_q$ , $i_d$ [Ampere] และลูความเร็ว $n$ [rpm]	45
45 ชุดทดสอบที่ใช้สำหรับการทดสอบมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร	46
46 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของชิพเบอร์ STM32F4	47
47 วงจรการทำงานของ STM32F4 สำหรับการควบคุม PMSM	47

## สารบัญภาพ (ต่อ)

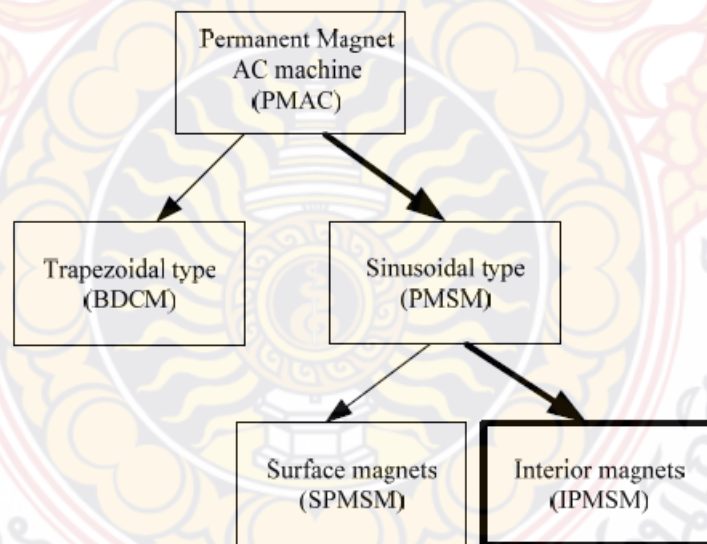
ภาพที่		หน้า
48	วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ	48
49	วงจร Inrush Current วงจรกรองแรงดัน (Filter)	48
50	วงจร 3-phase Inverter	49
51	วงจรใช้ประกอบการสร้างวงจรการใช้งานเซนเซอร์ LTS 25-NP	50
52	วงจรการใช้งาน LTS 25-NP ร่วมกับ STM32F4	52
53	วงจรวัดแรงดัน	53
54	สัญญาณที่ได้จาก Quadrature Encoder Interface	53
55	การเชื่อมต่อ Encoder เบอร์ AEDB-9140-A13 กับ STM32F4	54
56	โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรม	55
57	ชุดฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัย	56
58	ผลการจำลองการทำงานของ PMSM เมื่อควบคุมด้วยวิธีการ FOC	57
59	ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดลองจริงเมื่อทำการสเตปโหลด 2 นิวตันเมตร เพื่อดูผลตอบสนองของกระแส $i_q$ และ ผลตอบสนองต่อแรงบิด $T_L$	57
60	ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดลองจริงเมื่อทำการสเตปโหลด 2 นิวตันเมตร เพื่อดูผลตอบสนองของกระแส $i_q$ และ ผลตอบสนองต่อแรงบิด $v_{TQ}$	58
61	ผลการทดลองการเร่งความเร็วจาก 0 ถึง 1500 รอบต่อนาที	58
62	ผลการทดลองเพื่อดูผลตอบสนองของ PMSM เมื่อสเตปโหลดขนาด 2 นิวตันเมตร	59
63	ผลการทดลองเมื่อทำการกลับทางหมุนมอเตอร์จาก -1000 รอบต่อนาทีไป +1000 รอบต่อนาที	59

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1. หลักการและเหตุผล

มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรนิยมนำไปใช้งานขับเคลื่อนแบบเซอร์โวสำหรับเครื่องมือกล, หุ่นยนต์ เช่น ความคุมความเร็ว, ควบคุมตำแหน่ง ซึ่งเป็นงานที่มีขนาดกำลังไม่เกิน 1 MW ตลอดจนถึงปัจจุบันนี้นำมาใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า ทั้งที่เป็นแบบผสมผสานระหว่างไฟฟ้าและน้ำมัน และแบบใช้ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว มอเตอร์ดังกล่าวมีโครงสร้างที่สเตเตอร์เหมือนกับมอเตอร์เหนี่ยวนำคือ มีขดลวดสามเฟสพันอยู่ในร่องสลิตที่สเตเตอร์แต่ที่โรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร การใช้แม่เหล็กถาวรมีข้อดีหลายประการโดยรวมถึงการจัดของแรงแถวน, สลิปริง (Slip rings) และค่าสูญเสียของตัวนำในโรเตอร์ที่ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก นำไปสู่ค่าประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในส่วนของค่าสูญเสียในลวดทองแดงและแกนเหล็กของสเตเตอร์ การระบายความร้อนของมอเตอร์ผ่านสเตเตอร์มีประสิทธิภาพมากขึ้น จากข้อดีที่กล่าวมาทำให้มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรให้ประสิทธิภาพที่โดยรวมถึงให้กำลังที่สูงกว่าในขณะที่ขนาดเล็กลง [1]

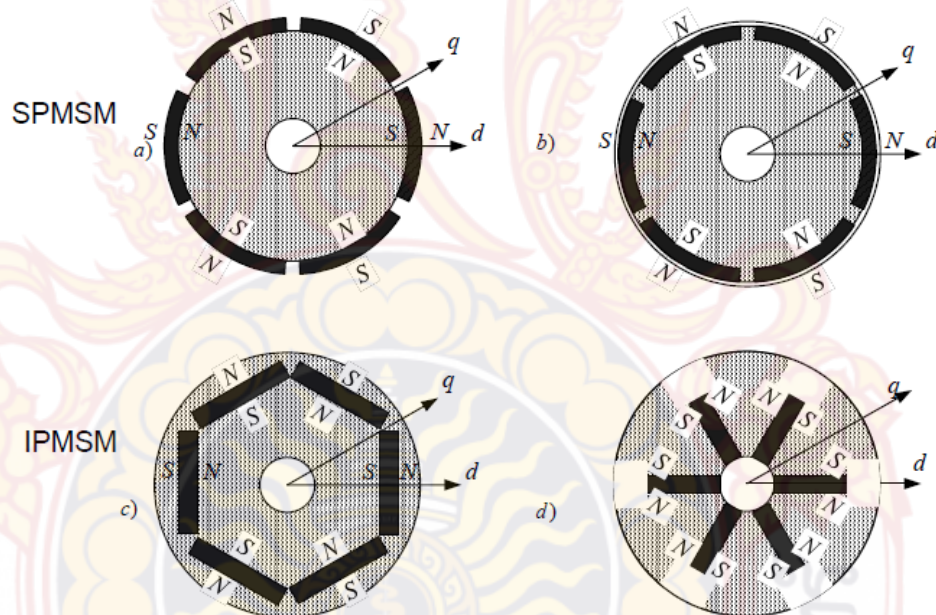


ภาพที่ 1 การแบ่งชนิดโดยทั่วไปของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

โดยทั่วไปมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย ชนิดที่มีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านกลับเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal back



EMF) หรือที่เรียกกันว่ามอเตอร์เซอร์โว-โวลต์ตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน (brushless DC Servomotors) และชนิดที่มีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับเป็นไซน์ (Sinusoidal back EMF) หรือที่เรียกกันว่ามอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet synchronous machine: PMSM) ในงานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาอินเวอร์เตอร์สำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ดังนั้นจะให้ความสนใจกับมอเตอร์ดังกล่าว ซึ่งมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 กลุ่ม โดยแบ่งตามการวางแท่งแม่เหล็กในโรเตอร์ กลุ่มแรกนั้นติดตั้งแท่งแม่เหล็กในโรเตอร์และเรียกว่า Interior permanent synchronous motors (IPMSM) กลุ่มที่ 2 คือติดตั้งแม่เหล็กบนพื้นผิวของโรเตอร์และเรียกว่า Surface permanent magnet synchronous motors (SPMSM) ความแตกต่างดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 2 [6-7]



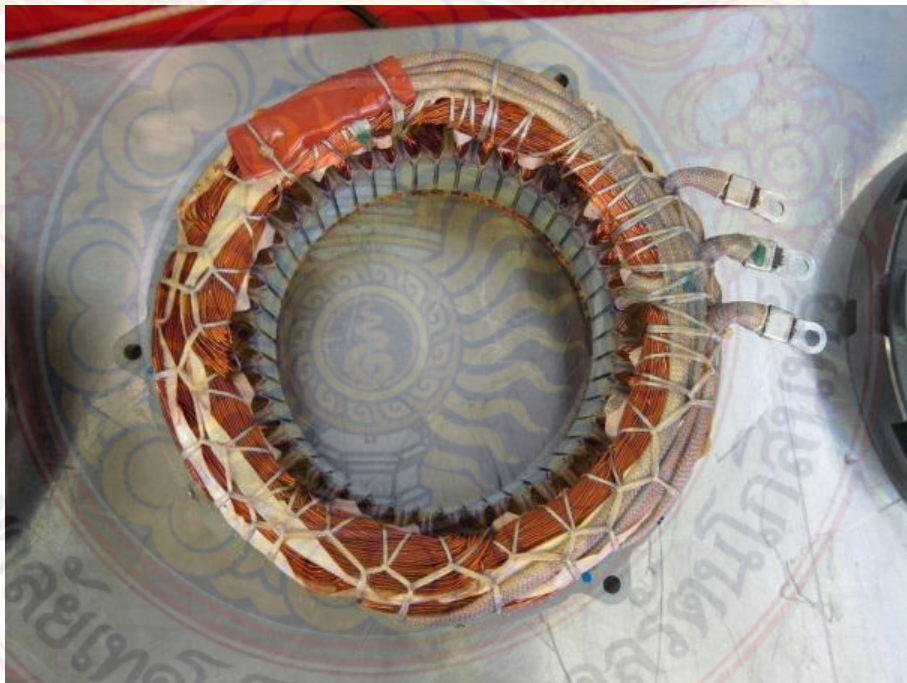
ภาพที่ 2 การแบ่งชนิดโดยทั่วไปของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

จากที่กล่าวในข้างต้นแสดงให้เห็นถึงข้อดีของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร และการนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางโดยเฉพาะในรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นที่สนใจอย่างมากในปัจจุบัน ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างโครงสร้างของมอเตอร์ดังกล่าวประยุกต์ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า





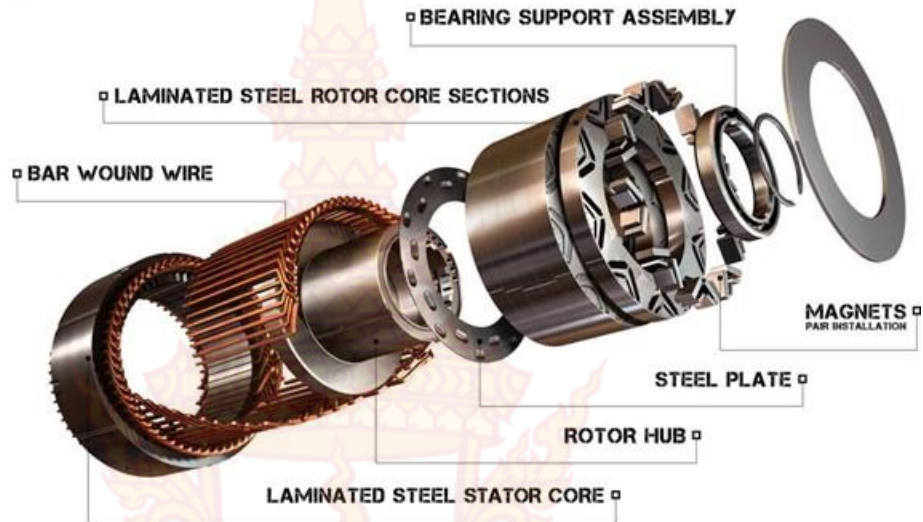
ภาพที่ 3 โรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรในรถยนต์ Toyota Prius 2006



ภาพที่ 4 สเตเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรในรถยนต์ Toyota Prius 2006

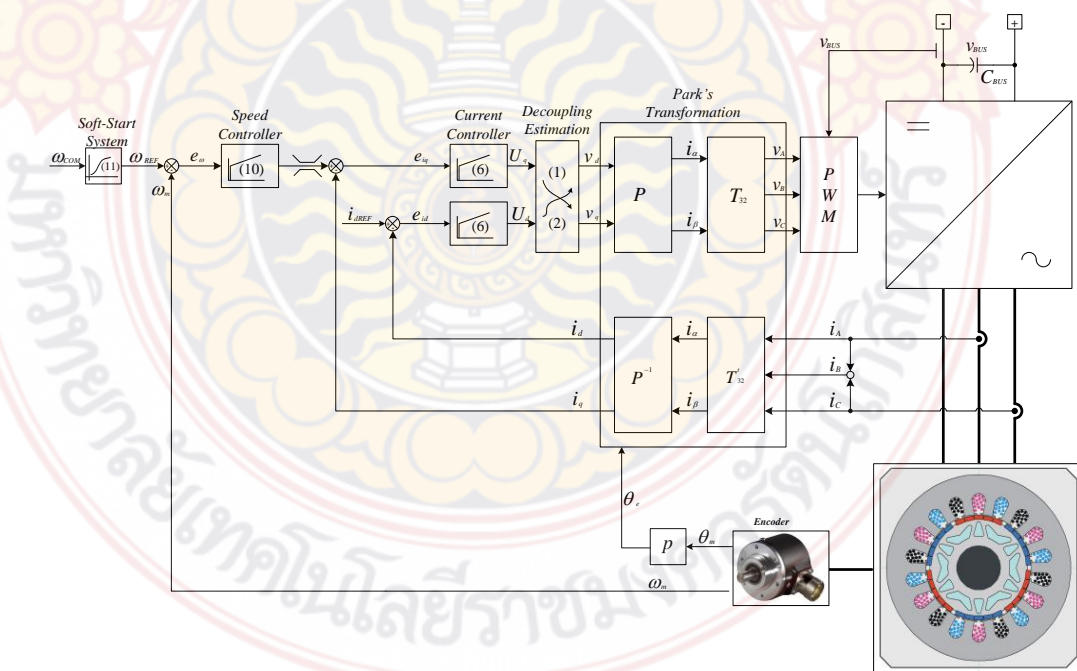


### General Motors Permanent Magnet Electric Motor



ภาพที่ 5 โครงสร้างของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรของบริษัท General Motor

จากข้อดีและโครงสร้างของมอเตอร์ที่เปลี่ยนไป ดังนั้นการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร จึงมีความซับซ้อนขึ้น โดอะแกรมการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โดอะแกรมส่วนประกอบของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

จากภาพที่ 6 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ประกอบด้วยวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหรือ อินเวอร์เตอร์ (Inverter) เป็นอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) และอีกส่วนสำคัญคือ ตัวเข้ารหัสหรือ Encoder สำหรับวัดตำแหน่งมุมของโรเตอร์ และความเร็วของมอเตอร์ เทคนิคในการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรมีการนำดำเนินการได้หลายวิธี อาทิเช่น

- operation with and without mechanical motion sensor,
- fast flux and torque response,
- available maximum output torque in wide range of speed operation region,
- constant switching frequency,
- uni-polar voltage PWM,
- low flux and torque ripples,
- robustness to parameters variation,
- Four quadrant operation.

จะพบว่าการด้านบนนั้นนำเสนอการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่สามารถใช้ได้ในปัจจุบัน [3, 4, 10]

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาอินเวอร์เตอร์แบบสเปซเวกเตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรโดยใช้ STM32F4 เป็นตัวประมวลผล ด้วยการพัฒนาอย่างรวดเร็วของระบบการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลหรือ Digital Signal Processing (DSP) สำหรับควบคุมและสั่งงานในงานต่างๆ และหนึ่งในการประยุกต์ใช้คือ การนำมาควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ความเร็วในการประมวลผลที่เร็วขึ้นจนแทบเรียกได้ว่าทำงานแบบทันเวลา (Real-time) STM32F4 เป็น DSP มีคุณสมบัติที่น่าสนใจ และอีกความน่าสนใจอีกอย่างคือการโปรแกรม สามารถโปรแกรมได้อย่างง่ายโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ในงานสร้างแบบจำลองสำหรับงานควบคุมมอเตอร์ และงานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง งานวิจัยนี้นำ STM32F4 มาเป็นหน่วยประมวลผลและสั่งงานอินเวอร์เตอร์แบบสเปซเวกเตอร์ สำหรับควบคุมมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร เพื่อศึกษาระบบการขับเคลื่อนของมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร และได้อินเวอร์เตอร์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับควบคุมการทำงานของมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร



## 2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

2.1 เพื่อพัฒนาระบบสมองกลฝังตัวสำหรับการควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร โดยใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัลตระกูล STM32F4

2.2 เพื่อสร้างอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่ใช้การควบคุมการสวิตช์แบบ Space Vector Pulse Width Modulation (SPWM) ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

2.3 เพื่อออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบวงปิดดังภาพที่ 6

## 3. ขอบเขตของโครงการวิจัย

3.1 ออกแบบและสร้างระบบสมองกลฝังตัวสำหรับการควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรโดยใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSPs) บอร์ด STM32F4 ขนาด 32 บิต 164 MHz ทำหน้าที่ประมวลผลและสั่งงาน

3.2 ออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่ใช้การควบคุมการสวิตช์แบบ Space Vector Pulse Width Modulation (SPWM) ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ที่มีพิกัดความเร็ว  $\pm 1500$  รอบต่อวินาที กำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์

3.3 ออกแบบและสร้างชุดเชื่อมต่อสัญญาณดังนี้

1. ชุดบัฟเฟอร์สำหรับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล
2. ชุดวัดกระแส 2 ชุด
3. ชุดวัดแรงดันกระแสตรงขนาด 600 โวลต์ จำนวน 1 ชุด
4. ชุดวัดความเร็ว จำนวน 1 ชุด

3.4 ออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบวงปิดดังภาพที่ 6

## 4. วิธีการดำเนินการวิจัย

4.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

4.2 ศึกษาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

4.3 ทำการออกแบบ วิเคราะห์ สังเคราะห์ และจำลองวงจรที่ใช้ในงานวิจัย

4.4 จัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

4.5 ดำเนินการจัดสร้างระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายและชุดสมองกลฝังตัวสำหรับประมวลผลและสั่งการควบคุมต้นแบบ

4.6 ทดสอบการทำงานของวงจรชุดทดลองต้นแบบที่สร้างขึ้น และทำการแก้ไขหากเกิดข้อผิดพลาด

## 5. ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

5.1 ได้ระบบสมองกลฝังตัวสำหรับการควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรโดยใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัลตระกูล STM32F4

5.2 ได้อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่ใช้การควบคุมการสวิตช์แบบ Space Vector Pulse Width Modulation (SPWM) ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

5.3 ได้ระบบควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบวงปิดที่ควบคุมโดยบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

5.4 เผยแพร่ผลงานเพื่อรับรองงานวิจัยในวารสาร หรือการประชุมทางวิชาการในระดับประเทศ





## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

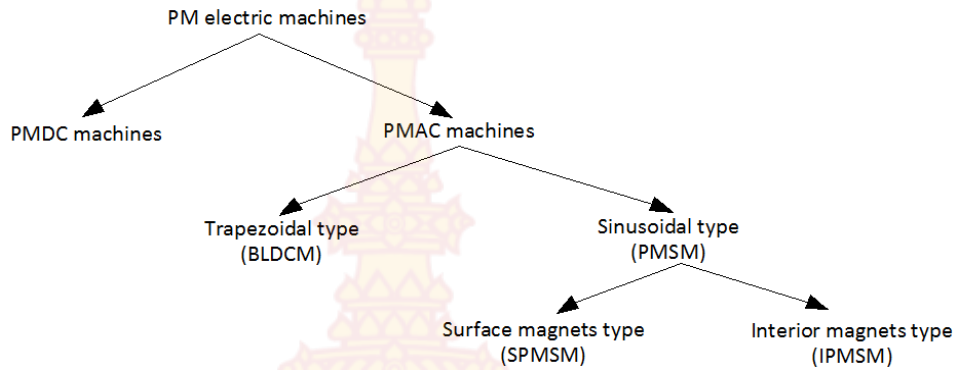
บทนี้เริ่มต้นด้วยการแยกประเภทของเครื่องกลชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet machine: PMSM) ต่อจากนั้นคุณลักษณะหลักของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรถูกนำเสนอ รวมถึงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ถัดจากนั้นแบบจำลองทางกลของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรถูกนำเสนอ บนพื้นฐานของแบบจำลองทางกลของเครื่องกล แบบจำลองพลวัตถูกสร้างโดยโปรแกรม Matlab/Simulink ในตอนท้ายของบทนี้การวัดค่าทำเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ทางกลของเครื่องกล และผลการจำลองการทำงานของแบบจำลองถูกนำเสนอ

#### 1. มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

มอเตอร์ซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet machine: PMSM) กำลังดึงดูดความสนใจเพิ่มมากขึ้นสำหรับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมที่หลากหลาย ตั้งแต่การใช้งานง่ายๆ เช่นปั๊มหรือพัดลมไปจนถึงโดรฟ์ที่มีประสิทธิภาพสูงเช่นเครื่องจักรกลแบบเซอร์โว เนื่องจากลักษณะหลักๆ ของมอเตอร์ดังนี้: ความหนาแน่นของพลังงานสูง, แรงบิดสูงกับอัตราส่วนความเฉื่อย และมีประสิทธิภาพสูง มอเตอร์แม่เหล็กถาวรเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีการกระตุ้นจาก 2 แหล่ง แหล่งกำเนิดแรกของการกระตุ้นคือสนามแม่เหล็กถาวรที่ตั้งอยู่ในโรเตอร์ ขณะที่แหล่งที่สองเป็นสนามที่ผลิตโดยขดลวดสเตเตอร์เมื่อทำการจ่ายพลังงานเข้าขดลวดกับระบบแรงดันไฟฟ้าแบบ 3 เฟส

เมื่อเทียบกับมอเตอร์ซิงโครนัสแบบทั่วไปที่สนามแม่เหล็กโรเตอร์มีการผลิตด้วยขดลวดไฟฟ้า PMSM ไม่มีสายไฟในโรเตอร์ ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียทองแดงของตัวมอเตอร์ นอกจากนี้เนื่องจากการขาดขดลวดโรเตอร์ไม่จำเป็นต้องใช้แปรงถ่านและแหวนสลิป เมื่อพิจารณาเรื่องนี้แล้ว PMSM มีขนาดที่เล็กกว่าและมีประสิทธิภาพสูงกว่าเมื่อเทียบกับมอเตอร์ซิงโครนัสทั่วไป ในทางตรงกันข้าม สนามแม่เหล็กที่ผลิตโดยแม่เหล็กถาวรจะคงที่ และไม่สามารถควบคุมได้ง่ายเหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้าแบบแยกกระตุ้นแบบเดิม โดยการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรสามารถจำแนกได้ตามแผนภาพที่ 1 ประการแรกขึ้นอยู่กับลักษณะของการกระตุ้นสนามแม่เหล็กด้วยสเตเตอร์ มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรสามารถจำแนกเป็น PM ด้วยการกระตุ้นแบบ D.C. (PMDC) หรือ PM ที่มีการกระตุ้นแบบ A.C. (PMAC) มอเตอร์ PMDC มีรูปแบบเหมือนกับเครื่อง DC แบบเดิม ซึ่งมีขดลวดสเตเตอร์, มีแปรงถ่านและมีคอมมิวเตเตอร์ยกเว้นโรเตอร์ ซึ่งขดลวดโรเตอร์ (ฟิลด์) ถูกแทนที่ด้วยแม่เหล็กถาวร เครื่อง PMAC เป็นเครื่องซิงโครนัสโดยไม่มีแปรงถ่านหรือไม่มีคอมมิวเตเตอร์



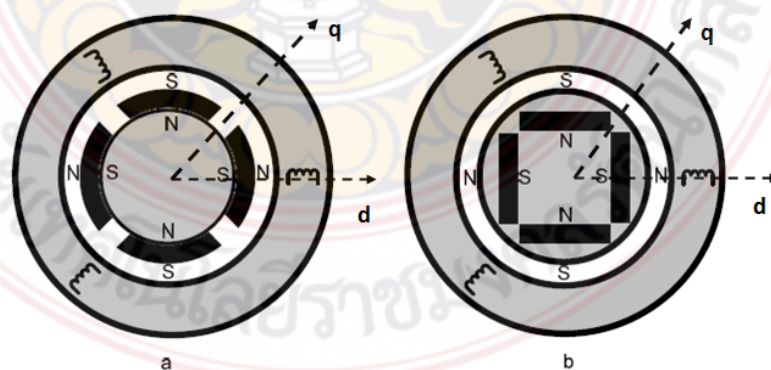
ภาพที่ 7 Permanent magnet machines classification[Chandana,2002]

นอกจากนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดันไฟฟ้า back-EMF ที่เกิดขึ้นในขดลวดสเตเตอร์, PMAC สามารถแยกออกเป็นชนิด PMAC trapezoidal และชนิด PMAC sinusoidal

PMAC trapezoidal หรือที่เรียกว่ามอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDCM) มีรูปแบบรูปคลื่นของ back-EMF เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในขณะที่ชนิด PMAC sinusoidal ต้องการการกระตุ้นด้วยกระแสสลับดังนั้นรูปคลื่นของ back-EMF จะเป็นรูปคลื่นไซน์ (PMAC) หรือที่รู้จักในชื่อ PM synchronous machines (PMSM)

เนื่องจากการเกิดการกระเพื่อมของแรงบิดใน PMAC trapezoidal และการพัฒนาการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector control) ได้กระตุ้นให้มีการใช้มอเตอร์ PMAC sinusoidal หรือที่รู้จักกันในชื่อมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร Permanent Magnet Synchronous Motor: PMSM

PMSM สามารถจำแนกได้ 2 ประเภทขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแม่เหล็กในโรเตอร์ของมอเตอร์ ประเภทที่ 1 ติดตั้งแม่เหล็กบนพื้นผิวหรือเรียกว่า surface mounted PMSM (SPMSM) และประเภทติดตั้งแม่เหล็กในโรเตอร์หรือเรียกว่า interior mounted PMSM (IPMSM) เช่นที่แสดงในรูปที่ 2



ภาพที่ 8 Cross section showing the differences between the SPMSM and the IPMSM

มอเตอร์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ SPMSM ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์มีดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามอเตอร์ของมอเตอร์ SPMSM

Symbol.	PMSM/Inverter specification and parameters	
	Meaning	Value
$P_{RATED}$	RATED POWER	1 kW
$N_{RATED}$	RATED SPEED	3000 RPM
$T_{RATED}$	TORQUE RATED	3 NM
$P$	NUMBER OF POLES PAIR	3
$R_s$	RESISTANCE (MOTOR + INVERTER)	10.1 $\Omega$
$L=L_D=L_Q$	STATOR INDUCTANCE	35.31 MH
$\psi_M$	MAGNETIC FLUX	0.2214 WB
$J$	EQUIVALENT INERTIA	0.0022 KG.M <sup>2</sup>
$B_F$	VISCOUS FRICTION COEFFICIENT	3.5 x 10 <sup>-3</sup> NM.S/RAD
$F_s$	SWITCHING FREQUENCY	10 <sup>3</sup> x 10 <sup>3</sup> HZ

### 1.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบ SPMSM

การพัฒนาแบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบ SPMSM ผ่านความเข้าใจเกี่ยวกับฟิสิกส์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบ SPMSM เป็นความต้องการหลักสำหรับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าทุกชนิด เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีการใช้เครื่อง Synchronous Motor (SPMSM) ประเภทพื้นผิวประเภทพื้นผิว (Surface) สำหรับการตรวจสอบ [9,13,14,15,16] การพัฒนาโมเดลของมอเตอร์นี้อยู่ภายใต้การตั้งสมมติฐานว่า [3]:

- มอเตอร์สามเฟสเป็นแบบสมมาตร
- มีการใช้ฮาร์โมนิกพื้นฐานของแรงขับเคลื่อนแม่เหล็ก (MMF)
- สเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์โรเตอร์เชิงพื้นที่จะถูกแทนที่ด้วยขดลวดที่มีความเข้มข้น
- ผลกระทบ anisotropy, ความอึดตัวของแม่เหล็ก, สูญเสียเหล็กและกระแสนวนไม่ได้คำนึงถึงการพิจารณา
- ความต้านทานของขดลวดและการรีแอ็คเซสจะต้องคงที่



- ในหลาย ๆ กรณีโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาสถานะคงที่กระแสและแรงดันไฟฟ้าจะถือว่าเป็นไซน์ (sinusoidal)
- ผลการระบายความร้อนสำหรับแม่เหล็กถาวรถูกละไว้

แบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสจะนำเสนอในการอธิบายด้วยสเปซเวกเตอร์ รูปแบบเวกเตอร์เวกเตอร์ของสมการของมอเตอร์มีข้อดีหลายอย่างเช่น การอธิบายที่กระชับ, การจัดการเกี่ยวกับพีชคณิตง่ายและการตีความแบบกราฟิกที่เรียบง่าย โดยเฉพาะคำอธิบายนี้จะมีประโยชน์มากเมื่อวิเคราะห์เทคนิคการควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้า AC การแทนสมการสเปซเวกเตอร์ของสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับได้ถูกกล่าวถึงอย่างละเอียดในตำราประกอบการเรียนจำนวนหนึ่ง ([3,4,12])

ค่าชั่วขณะของระบบสามเฟสใดๆ เช่น กระแส, แรงดันและฟลักซ์สามารถถูกแทนที่ด้วยเวกเตอร์ผลลัพธ์หนึ่งอันที่เรียกว่าสเปซเวกเตอร์,

$$\vec{x} = x_a + jx_\beta = K(1 \cdot x_a + x_b \cdot a + x_c \cdot a^2) = \sqrt{\frac{2}{3}}(1 \cdot x_a + x_b \cdot a + x_c \cdot a^2) \quad (2.1)$$

โดยที่  $1, a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, a^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}} = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$

$\sqrt{\frac{2}{3}}$  Normalization factor (เพื่อเป็นการรับประกันว่ารูปคลื่นไซน์สมมาตรค่าแอมพลิจูดของสเปซ-เวกเตอร์เท่ากับแอมพลิจูดของรูปคลื่นเฟสนั้น)

The elements of this space vector satisfy the condition:

$$0 = x_a + x_b + x_c \quad (2.2)$$

สำหรับระบบสามเฟสไม่มีสายนิวทรัล

$$x_a = \hat{x}_a \sin(\omega t + \theta) \quad (2.3)$$

$$x_b = \hat{x}_b \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta) \quad (2.4)$$

$$x_c = \hat{x}_c \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta) \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_\beta \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}_{K=\sqrt{\frac{2}{3}}} \quad (2.6)$$

$$T_{32}T_{32}' = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad T_{32}'T_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = I \quad \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = T_{32}' \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = P^{-1}(\theta) \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = P_{32} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$T_{32}' = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad P^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$P^{-1}(\theta) = P(-\theta) \quad (2.8)$$

$$P_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$S = P + jQ \quad (2.10)$$

$$P = V_d i_d + V_q i_q \quad (2.11)$$

$$Q = V_q i_d + V_d i_q \quad (2.12)$$

### สมการกระแสและแรงดัน

สมการของมอเตอร์ถูกแสดงในกรอบอ้างอิง  $dq$ -axis โดยที่  $d$ -axis ถูกวางตรงกับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากโรเตอร์ สมการของมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแสดงดังนี้

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (v_d - R_s i_d + \omega_e \cdot L_q \cdot i_q) \quad (2.13)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (v_q - R_s i_q - \omega_e \cdot L_d \cdot i_d - \omega_e \cdot \Psi_m) \quad (2.14)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - B_f \cdot \omega_m - T_L) \quad (2.15)$$

โดยที่

$$T_e = p \cdot i_q \cdot (\Psi_m - (L_q - L_d) \cdot i_d) \quad (2.16)$$

$$\omega_e = p \cdot \omega_m$$

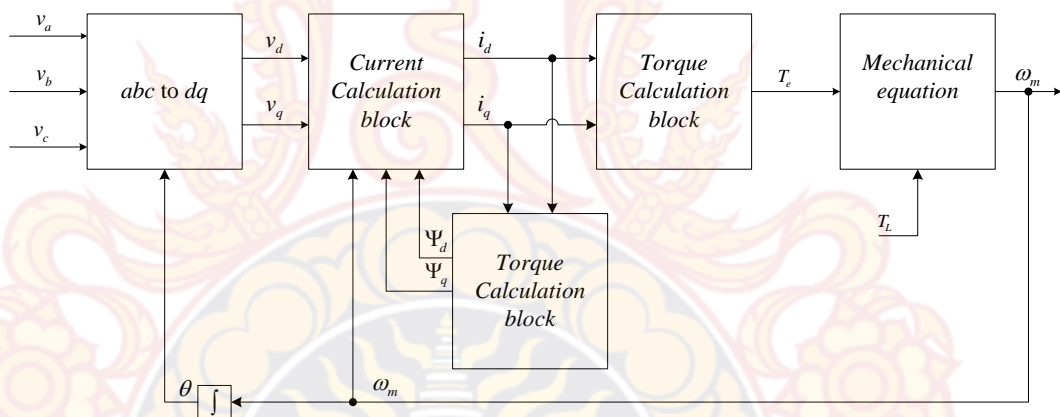
(2.17)



$v_d, v_q$  คือแรงดันในแกนอ้างอิง dq และ  $i_d, i_q$  คือกระแสในแกนอ้างอิง dq และ  $L_d, L_q$  คือค่าความเหนี่ยวนำในแกนอ้างอิง dq และ  $R_s, \Psi_m$  คือค่าความต้านทานและค่าฟลักซ์เชื่อมโยงตามลำดับ และ  $\omega_e, \omega_m, p, T_e, T_L, B_f$  และ  $J$  คือค่าความถี่เชิงมุมไฟฟ้า, ค่าความถี่เชิงมุมทางกล, จำนวนของคู่ขั้วแม่เหล็ก, แรงบิดแม่เหล็ก, แรงบิดโหลด, ค่า viscosity, ค่า inertia ตามลำดับ

## 1.2 การจำลองพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรถูกดำเนินการในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อที่จะตรวจสอบพฤติกรรมของมอเตอร์ โมเดล Simulink ถูกใช้ในการออกแบบระบบควบคุมอีกด้วยซึ่งถูกนำเสนอในบทถัดไป โครงสร้างของโมเดล Simulink ถูกนำเสนอในภาพที่ 2-3

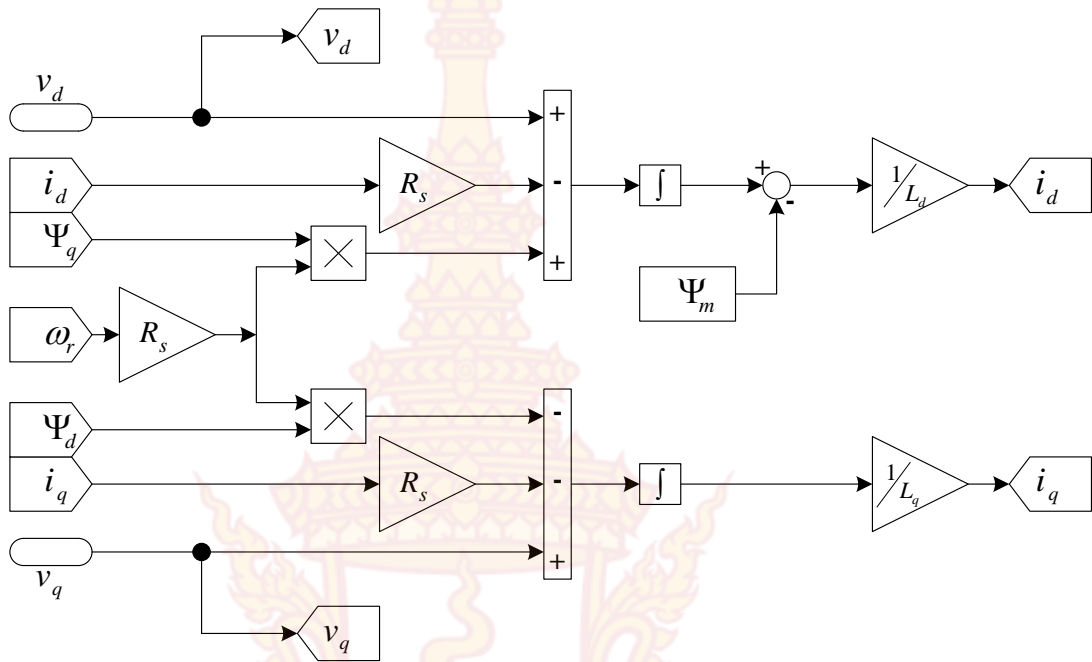


ภาพที่ 9 Diagram representation of the simulation model for the SPMSM

อินพุตของแบบจำลองของ PMSM คือแรงดันเฟส เอาต์พุตของแบบจำลองคือความเร็วที่เพลลาของมอเตอร์และกระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์ แรงดัน  $V_a, V_b$  และ  $V_c$  ถูกแปลงไปสู่กรอบอ้างอิง (dq axis) ด้วยสมการที่ 2.18, 2.19 สมการของกระแสที่ทำการแปลงแล้วเป็นดังนี้

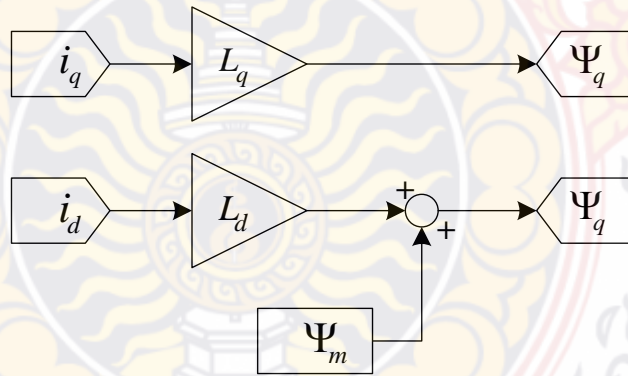
$$i_d = \frac{1}{L_d} (\int v_d - R_s \cdot i_d + \omega_e \cdot L_q \cdot i_q) \quad (2.18)$$

$$i_q = \frac{1}{L_q} (\int v_q - R_s \cdot i_q - \omega_e \cdot L_d \cdot i_d - \omega_e \cdot \Psi_m) \quad (2.19)$$



ภาพที่ 10 Simulink model expressing the current calculation block

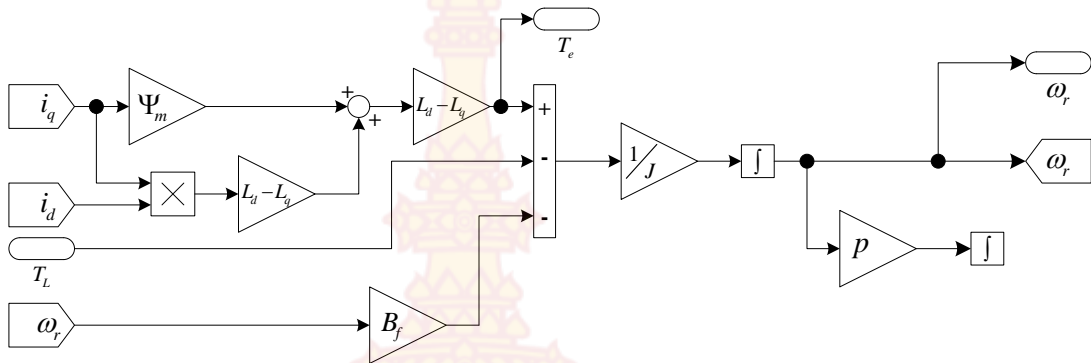
บล็อกคำนวณฟลักซ์เชื่อมโยงแสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 11 Simulink model expressing the flux calculation block

ซึ่งสมการของกระแสทราบเป็นที่เรียบร้อย การกำเนิดแรงบิดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16 ดังนั้นสมการความเร็วที่เพลลาของมอเตอร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.20

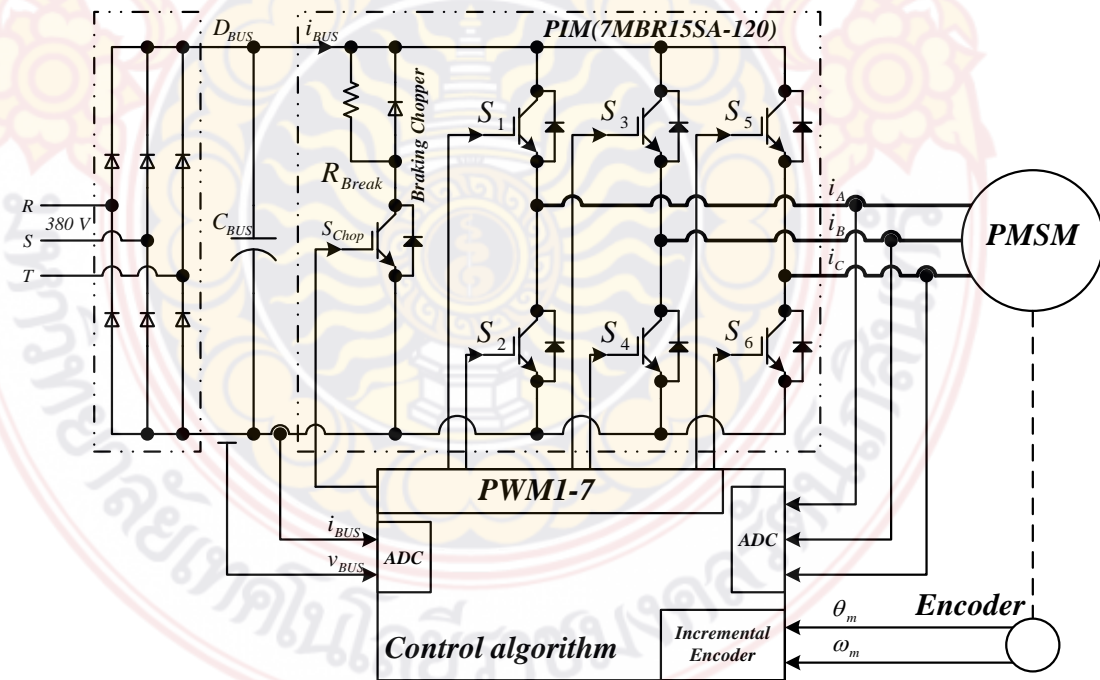
$$\omega_m = \frac{1}{J} (T_e - B_f \cdot \omega_m - T_L) \quad (2.20)$$



ภาพที่ 12 Simulink model expressing the calculation of the shaft speed

### 1.3 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

ในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการกล่าวถึงสมการและการสร้างโมเดลของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink แต่การขับเคลื่อนมอเตอร์ได้นั้นจำเป็นต้องมาอินเวอร์เตอร์ ที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าความถี่และแรงดันในลักษณะ V/F ได้ โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

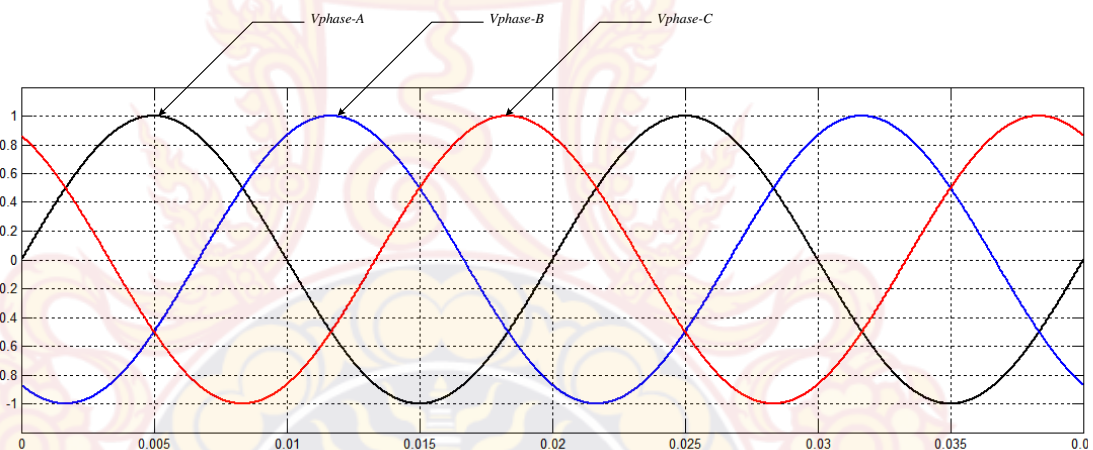


ภาพที่ 13 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อน PMSM

จากภาพอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส, วงจรแปลงผันพลังงานจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง 3 เฟส (3-phase rectifier) และไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือ DSP (Digital signal processing) สำหรับการสร้างพัลส์สวิตมอดูเลชั่น แบบจำลองของอินเวอร์เตอร์เป็นดังนี้

### การสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ (MOSFET/IGBT) ทั้ง 6 ตัว

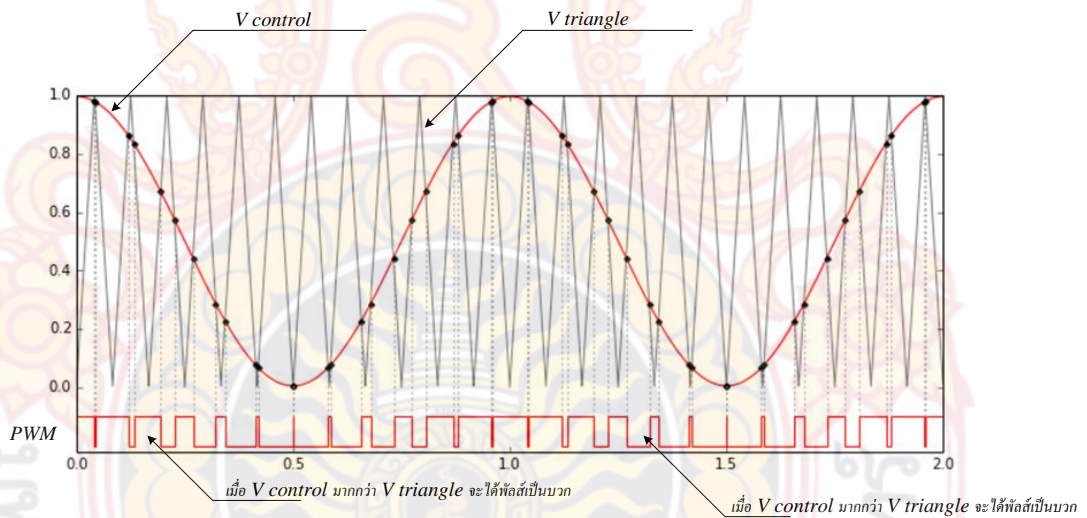
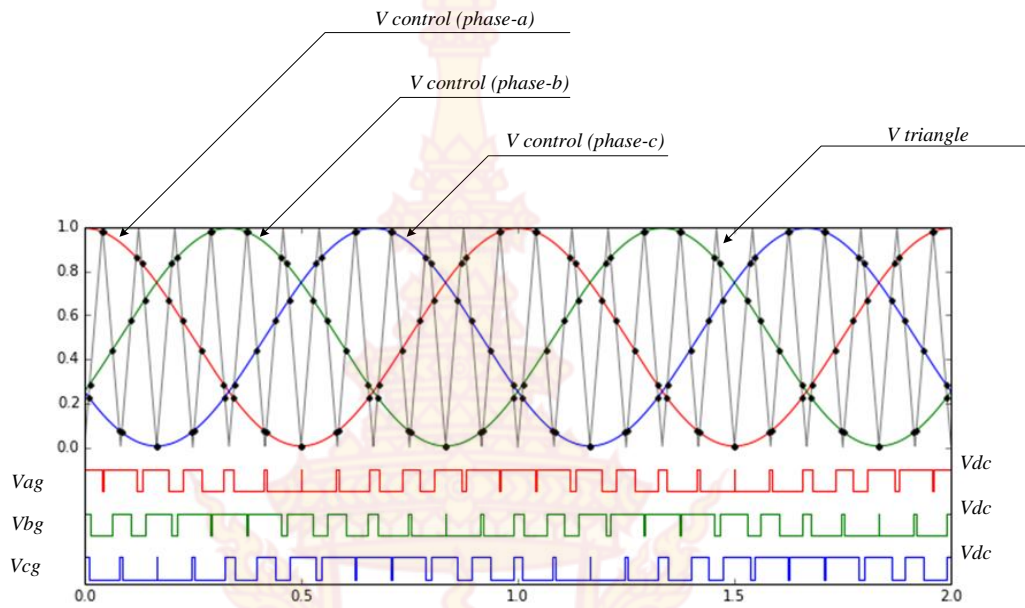
สวิตช์ (MOSFET/IGBT) ทั้ง 6 ตัว จะต้องสร้างสัญญาณขึ้นใหม่จากแหล่งจ่ายกระแสตรง (Vdc) ที่จ่ายเข้ามา ให้เป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ 3 สัญญาณ แต่ละสัญญาณเกิดขึ้นตามลักษณะเดียวกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 14 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ 3 เฟส

ในการสั่งงานให้สวิตช์ (MOSFET/IGBT) ทำงานต้องใช้สัญญาณจากรูปที่ 13 เป็นสัญญาณอ้างอิง จากนั้นการดำเนินการเพื่อสร้างสัญญาณสั่งงานสวิตช์ สัญญาณต้องเป็นสัญญาณแบบ Pulse width Modulation (PWM) การสร้างสัญญาณดังกล่าวนี้มีหลักการดังนี้





ภาพที่ 15 หลักการสร้างสัญญาณพัลส์วิตรึมมอดูเลชั่น PWM

จากภาพที่ 14 การสร้างสัญญาณ PWM นั้นมีหลักการคือ ต้องมีสัญญาณ 2 สัญญาณมาเปรียบเทียบกัน ประกอบด้วยสัญญาณควบคุม  $V_{control}$  ในที่นี้คือสัญญาณรูปคลื่นไซน์ทั้ง 3 สัญญาณ และสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม  $V_{triangle}$  เมื่อทั้ง 2 สัญญาณมาเปรียบเทียบกันจะเกิดสัญญาณด้านออกเป็นสัญญาณแบบ 0 กับ 1 ดังรูป อธิบายได้เป็น 2 กรณีดังนี้

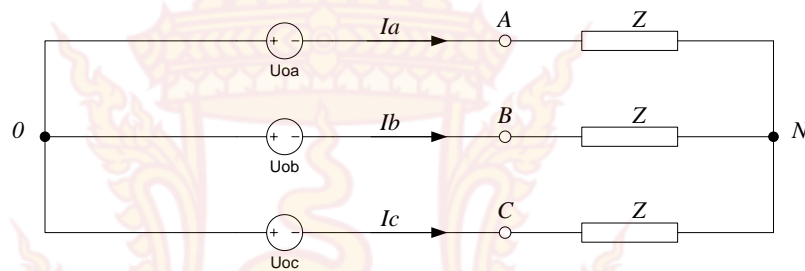
1. กรณีที่  $V_{control}$  มากกว่า  $V_{triangle}$  จะได้สัญญาณเป็น 1
2. กรณีที่  $V_{control}$  น้อยกว่า  $V_{triangle}$  จะได้สัญญาณเป็น 0

วิธีกำเนิดสนามแม่เหล็กหมุนโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดัน 3 แหล่งที่มีลักษณะที่เป็นอิสระต่อกันมี มุมห่างกัน 120 องศาจ่ายให้กับมอเตอร์แสดงดังรูปที่ 2 ในมาตรฐานระบบไฟ 3 เฟส แรงดันไซน์ถูก จ่ายให้กับมอเตอร์กำเนิดกระแสที่เป็นไซน์มีแรงดันเฟสแสดงได้ดังนี้

$$u_{0a}(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos(\omega t) \quad (2.21)$$

$$u_{0b}(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.22)$$

$$u_{0c}(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2.23)$$



ภาพที่ 16 ระบบไฟ 3 เฟสที่สมมาตร

คำนวณแรงดันเฟสเทียบกับนิวทรัล ( $U_{an}$ ,  $U_{bn}$ ,  $U_{cn}$  ตามลำดับ) จากแหล่งจ่ายแรงดันที่จ่าย ให้มอเตอร์ ( $u_{0a}$ ,  $u_{0b}$ ,  $u_{0c}$  ตามลำดับ) ถ้าระบบสมมาตรได้สมการดังนี้

$$u_{0n} = u_{0a} + ZI_a \quad (2.24)$$

$$u_{0n} = u_{0b} + ZI_b \quad (2.25)$$

$$u_{0n} = u_{0c} + ZI_c \quad (2.26)$$

ดังนั้น

$$3u_{0n} = u_{0a} + u_{0b} + u_{0c} + Z(I_a + I_b + I_c) \quad (2.27)$$

$$\therefore u_{0n} = \frac{1}{3}(u_{0a} + u_{0b} + u_{0c}) \quad (2.28)$$

แรงดันเฟส A เทียบกับนิวทรัลสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$u_{0n} = u_{an} + u_{0a} \quad (2.25)$$

$$\therefore u_{an} = u_{0n} + u_{0a} = \frac{1}{3}(u_{0a} + u_{0b} + u_{0c}) - u_{0a} \quad (2.26)$$

$$\therefore u_{an} = u_{0n} + u_{0a} = -\frac{2}{3}u_{0a} + \frac{1}{3}u_{0b} + \frac{1}{3}u_{0c}$$

$$\therefore u_{an} = u_{0n} + u_{0a} = \frac{2}{3}u_{0a} - \frac{1}{3}u_{0b} - \frac{1}{3}u_{0c} \quad (2.27)$$

คำนวณแรงดันเฟสอื่นได้เช่นเดียวกันคือ

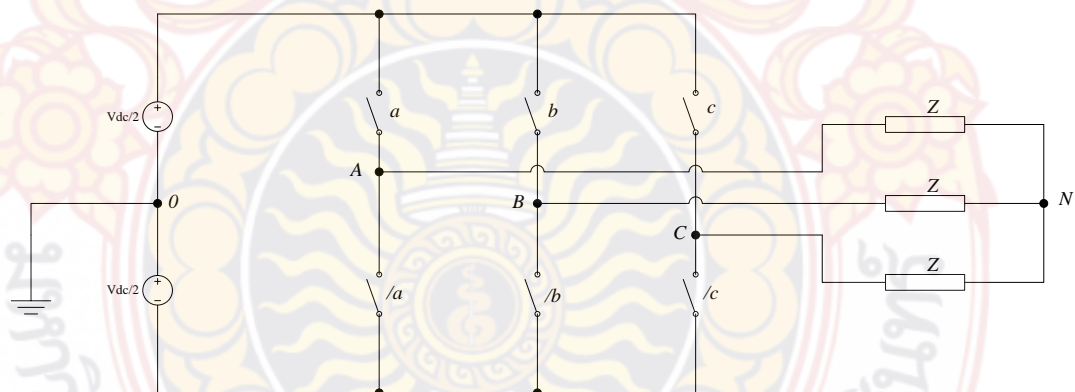
$$u_{an} = \frac{1}{3}(2 \cdot u_{a0} - u_{b0} - u_{c0}) \quad (2.28)$$

$$u_{bn} = \frac{1}{3}(2 \cdot u_{b0} - u_{a0} - u_{c0}) \quad (2.29)$$

$$u_{cn} = \frac{1}{3}(2 \cdot u_{c0} - u_{a0} - u_{b0}) \quad (2.30)$$

### ระบบแหล่งจ่ายไฟแบบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เป็นตัวทำหน้าที่จ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์ ประกอบด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ 6 ตัวทำหน้าที่เปิด/ปิดวงจรดังแสดงในภาพที่ 16 โดยที่แหล่งจ่ายแรงดันเป็นไฟตรงอินพุตมาจากวงจรเรกติไฟเออร์ สวิตช์ตัวที่อยู่ในกิ่งเดียวกันต้องไม่ปิดวงจรพร้อมกันเพื่อป้องกันการลัดวงจรไฟตรง ดังนั้นสวิตช์ทรานซิสเตอร์กำลัง 2 ตัว ในกิ่งเดียวกันจะทำให้เกิดสองสถานะคือสถานะ '0' เมื่อสวิตช์ตัวเปิดวงจร ตัวล่างปิดวงจร และสถานะ '1' เมื่อสวิตช์ตัวบนปิดวงจรตัวล่างเปิดวงจร การเปิดสวิตช์ทั้ง 3 ตัวทำให้เกิดสถานะแตกต่างกัน 8 สถานะ ซึ่งอาจจะเรียกชื่อได้เป็น U0 ถึง U7 ดังแสดงในตารางที่ 2



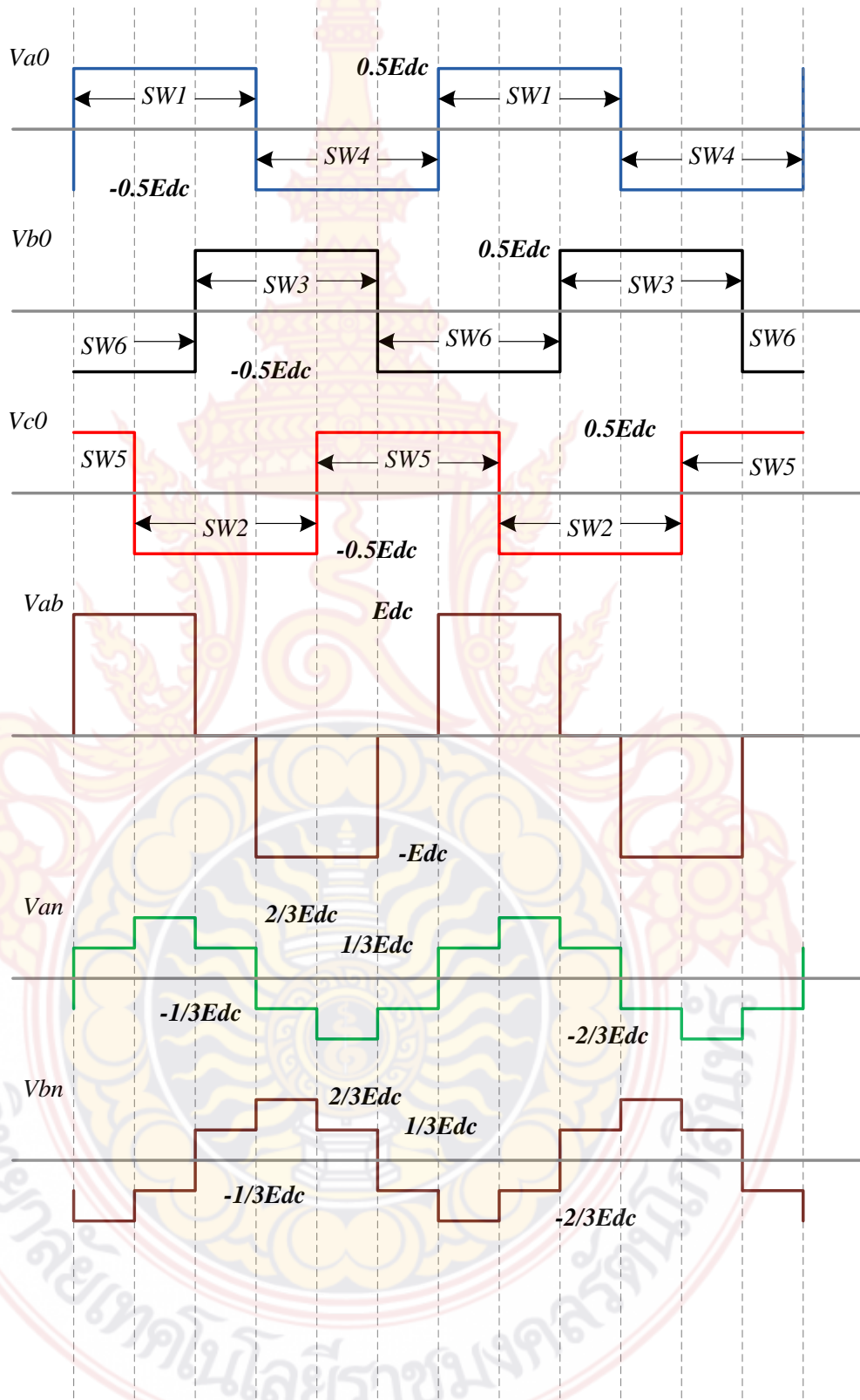
ภาพที่ 17 แหล่งจ่ายไฟแบบอินเวอร์เตอร์

ตารางที่ 2 รูปแบบสวิตช์และค่าแรงดันเทียบจุดสเทินเสมือนของอินเวอร์เตอร์

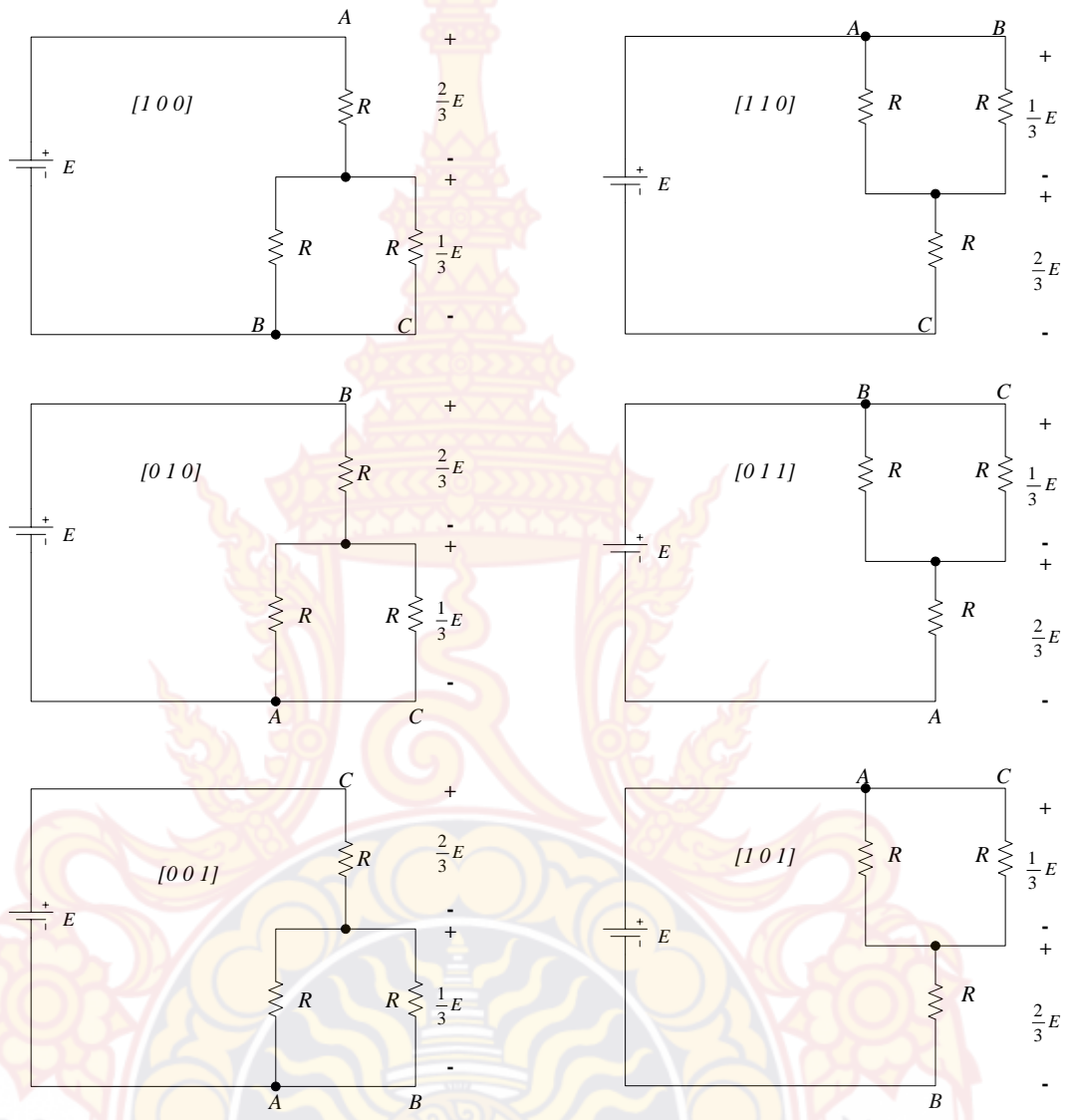
Voltage Vectors	Switching Vectors			Line to neutral Voltage			Line to Line Voltage		
	a	b	c	$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$	$V_{ab}$	$V_{ca}$	$V_0$
V0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V1	1	0	0	$2/3$	$-1/3$	$-1/3$	1	0	-1
V2	1	1	0	$1/3$	$1/3$	$-2/3$	0	1	-1
V3	0	1	0	$-1/3$	$2/3$	$-1/3$	-1	1	0
V4	0	1	1	$-2/3$	$1/3$	$1/3$	-1	1	1
V5	0	0	1	$-1/3$	$1/3$	$2/3$	0	-1	1
V6	1	0	1	$1/3$	$-2/3$	$1/3$	1	-1	0
V7	1	1	1	0	0	0	0	0	0





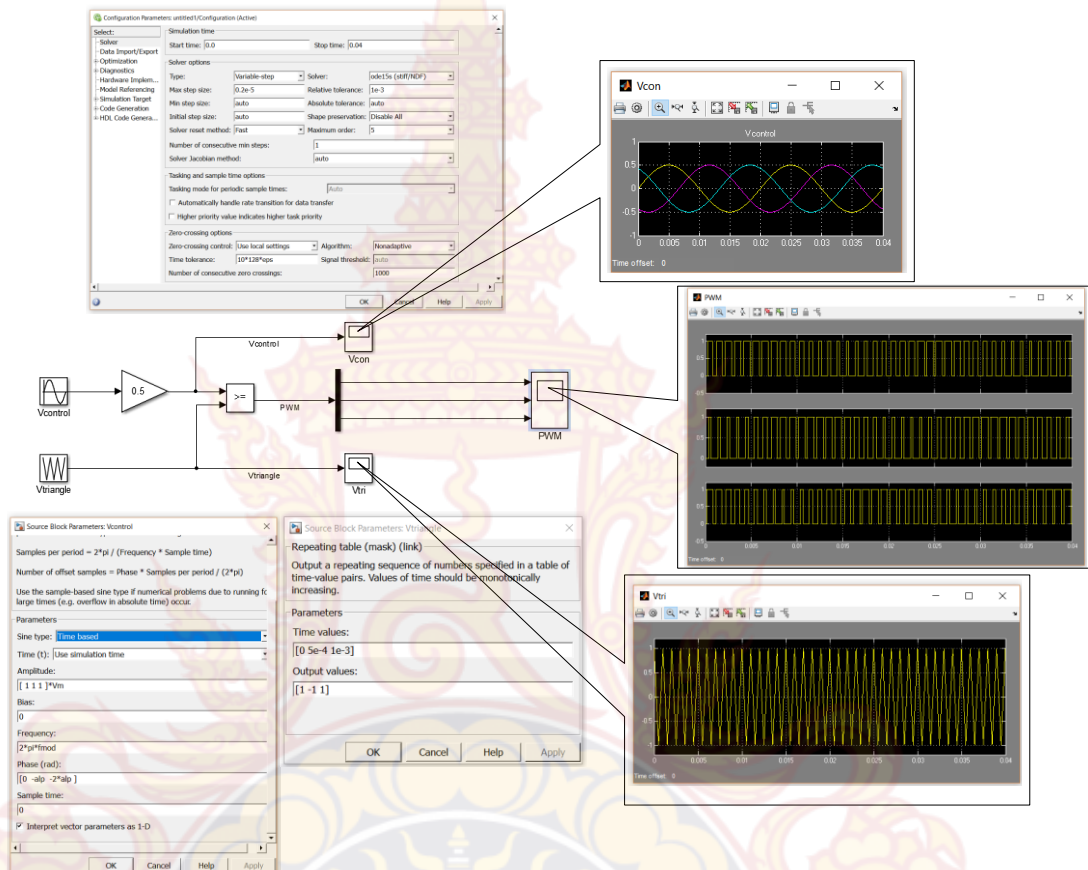


ภาพที่ 18 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในแต่ละการทำงานของสวิตช์



ภาพที่ 19 วงจรที่ได้จากการทำงานของสวิตช์และขนาดของแรงดันที่ตกคร่อมโหลด

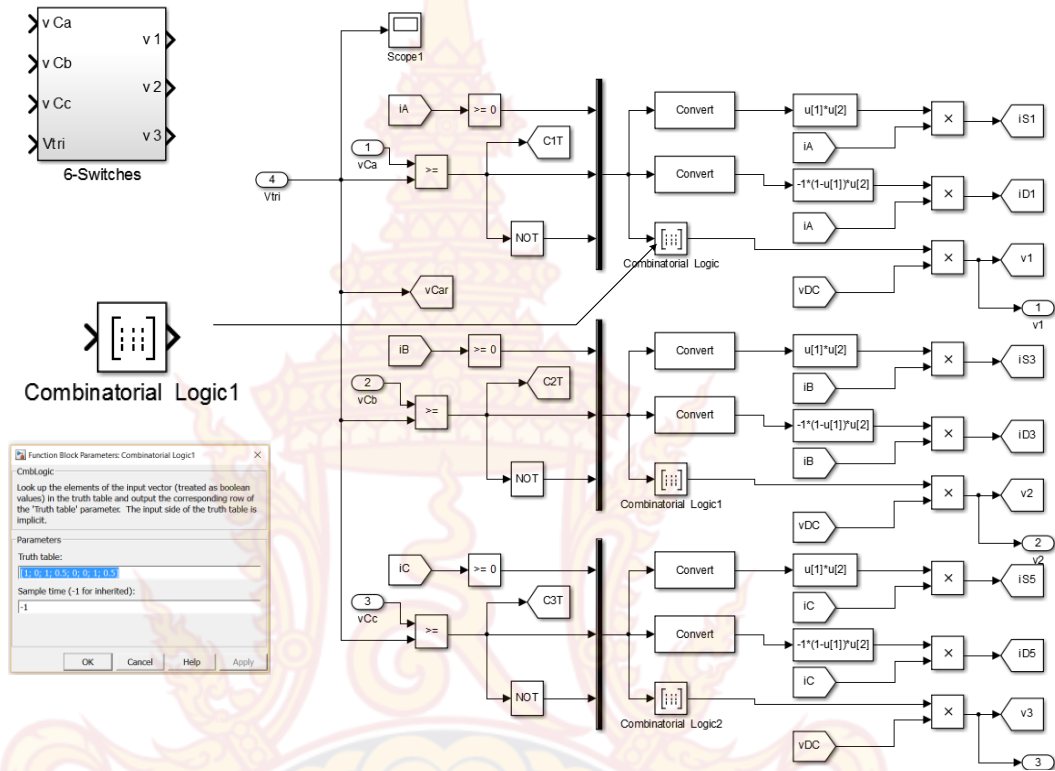
## การจำลองการสร้างสัญญาณ PWM บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK



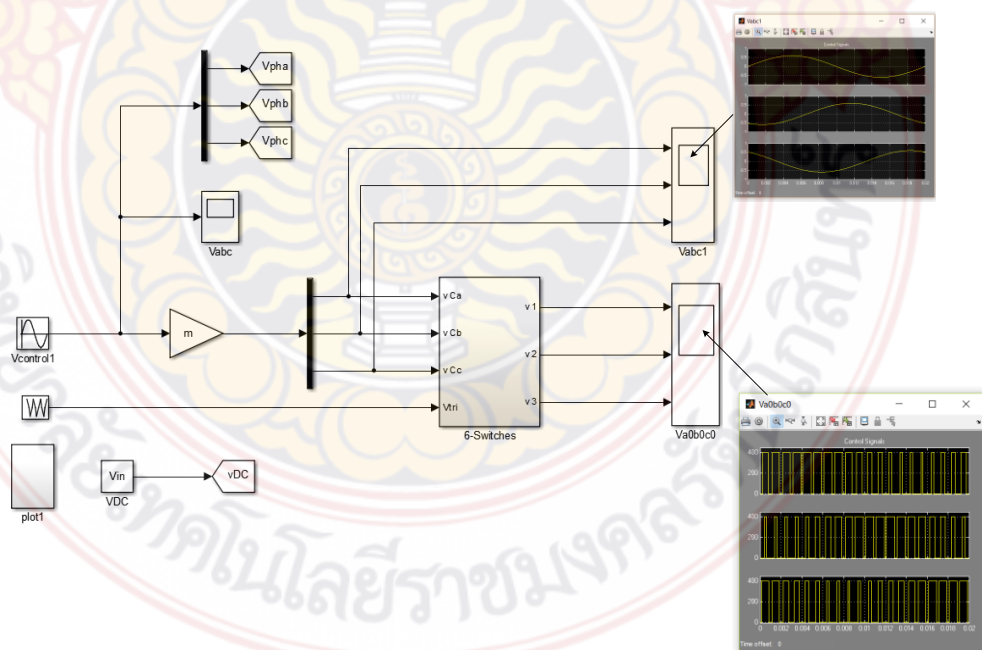
ภาพที่ 20 ส่วนประกอบการสร้างสัญญาณ PWM บนโปรแกรม MATLAB Simulink

จากรูปที่ 19 กำหนดค่าความถี่ของสัญญาณแรงดันสามเหลี่ยมเท่ากับ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ และความถี่ของสัญญาณแรงดันไซน์เท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ เป็นไปตามหลักการที่กล่าวในข้างต้น ในขั้นนี้สัญญาณสำหรับสั่งงานสวิตซ์ทั้ง 6 ตัวก็พร้อมแล้ว

แบบจำลองสวิตช์ทั้งหกตัวหรืออินเวอร์เตอร์ 3 เฟส บนโปรแกรม MATLAB/Simulink



ภาพที่ 21 โครงสร้างภายในบล็อก 6-Switches



ภาพที่ 22 สัญญาณด้านนอกจากวงจรแบบจำลองสวิตช์ทั้งหกตัวหรืออินเวอร์เตอร์ 3 เฟส



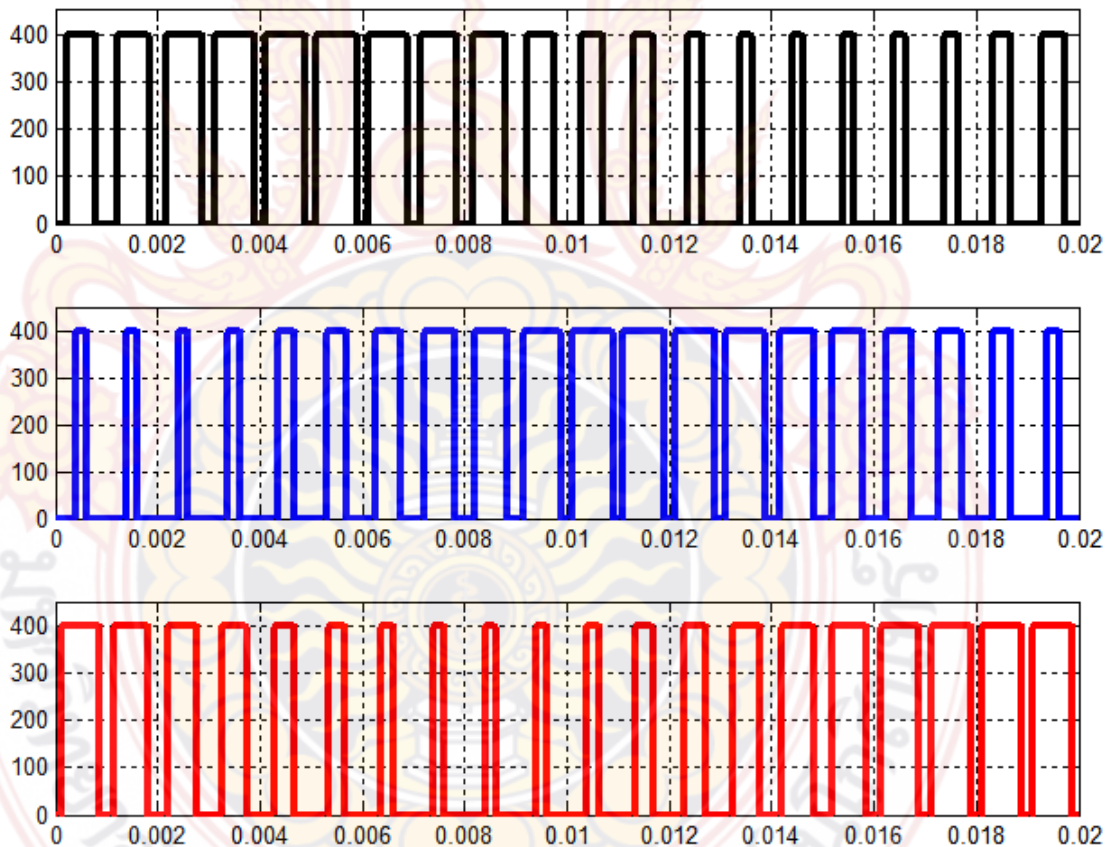
จากรูปสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากแบบจำลองสวิตซ์ทั้งหกตัวหรืออินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการ

$$(V_{AN})_1 = m_a \cdot \frac{V_d}{2}$$

โดยที่  $V_d$  คือ แรงดันเชื่อมโยงกระแสตรง

โดยที่  $m_a$  คือ อัตราส่วนระหว่างขนาดแรงดันของสัญญาณรูปคลื่นไซน์ และสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม กำหนดให้  $m_a$  นั้น มีค่าอยู่ในช่วง  $m_a \leq 1$  เนื่องจากเป็นช่วงที่อินเวอร์เตอร์ทำงานในย่านมอดูเลชันเชิงเส้น ในย่านเชิงเส้นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลในหนึ่งเฟสจะมีค่าดังสมการ

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}}$$



ภาพที่ 23 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากด้านออกของอินเวอร์เตอร์

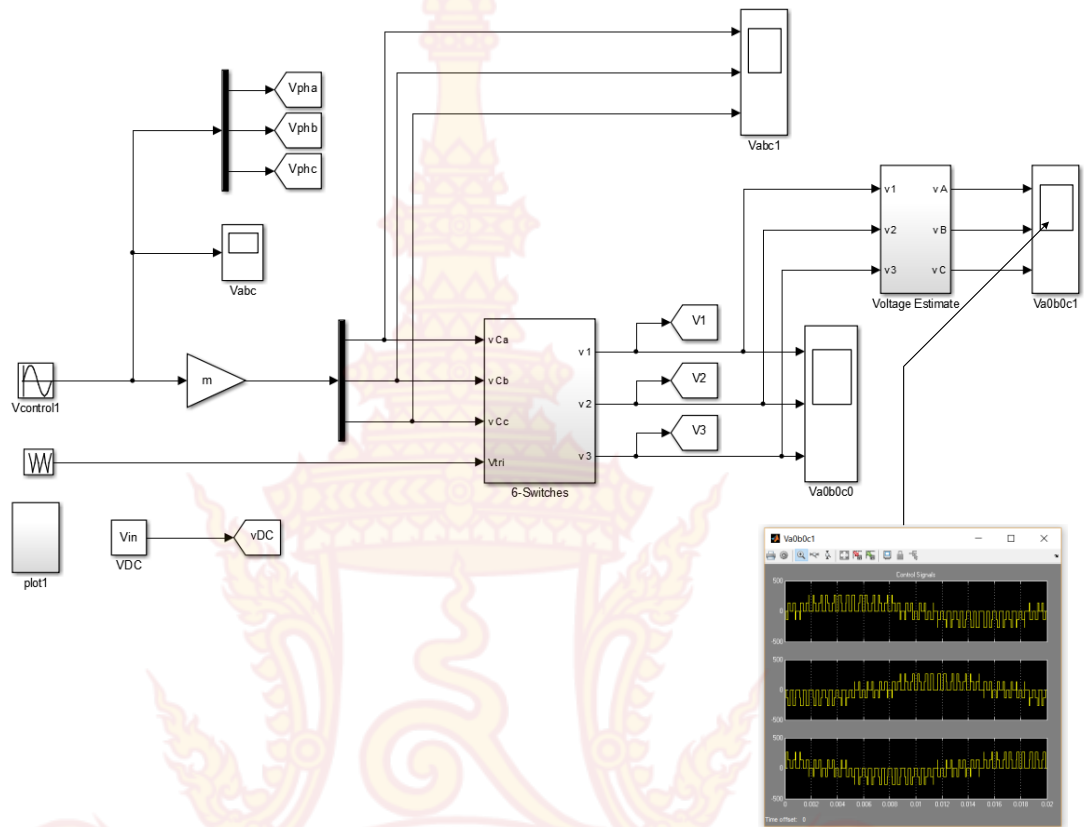
ในขั้นต่อไปคือการคำนวณหาแรงดัน  $V_{L-to-L}$  หรือ  $V_{AB}$  นั้นจะมีค่าตามสมการ

$$V_{L-to-L} = V_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (V_{AN})_1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot m_a \cdot \frac{V_d}{2} = 0.612 \cdot m_a \cdot V_d \quad (2.31)$$

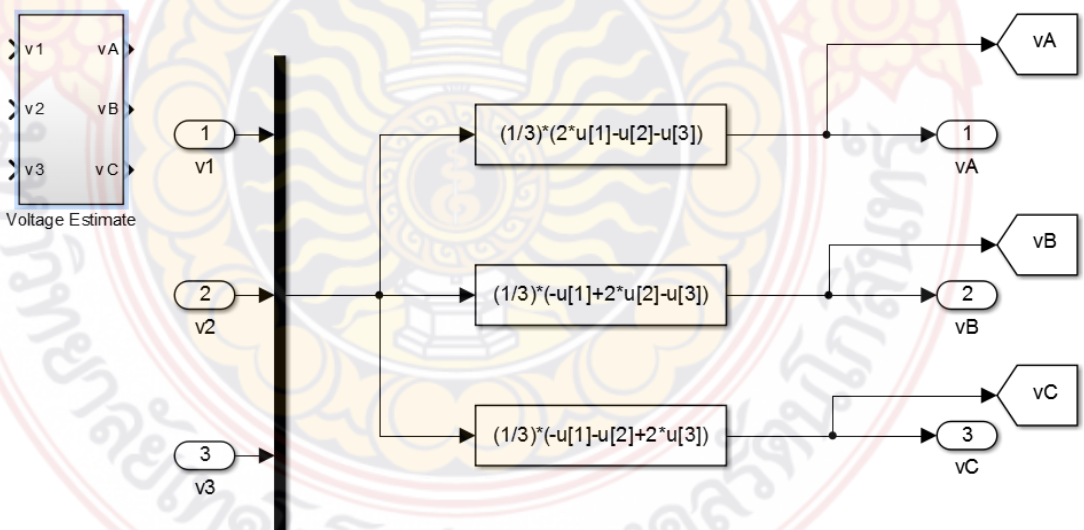
ความหมายของการทำงานในย่านเชิงเส้น ตัวอย่างเช่น หากจ่ายแรงดันเชื่อมโยง 311 โวลต์ เมื่อปรับ  $m_a = 0.5$  จะได้แรงดันเท่ากับ  $0.612 \times 0.5 \times 311 = 95.17$  โวลต์ การกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม  $f_{carrier}$  นั้นจะคำนึงถึงการเกิดฮาร์โมนิกของแรงดันด้านออก ซึ่งการกำหนดค่าความถี่นั้นจะสามารถกำหนดการเกิดของฮาร์โมนิกได้ โดยจะกำหนดให้เกิดห่างจากค่าความถี่หลักมูล เพื่อป้องกันการสร้างวงจรกรองฮาร์โมนิก การเกิดของฮาร์โมนิกจะเป็นฮาร์โมนิกเลขคี่เกิดขึ้นที่ไซด์แบนของ  $m_f$  และจำนวนเท่าของ  $m_f$  และผลจากค่าของแรงดัน  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$  และ  $V_{CN}$  นั้นมีเฟสต่างกัน 120 องศา ส่งผลให้เฟสจะเท่ากันทุกๆ  $3m_f$  ทำให้แรงดันไฟฟ้าจะไม่มีฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ทารลงตัว เช่น 3, 9, 15, 21 เป็นต้น นอกจากนี้สำหรับในกรณีแรงดันเฟสที่มีโพลสมดุล ค่าแรงดันระหว่างสายจะไม่มีฮาร์โมนิกเลขคู่ เช่น ฮาร์โมนิก 2, 4, 6, 8 เป็นต้น สามารถสรุปประเด็นสำคัญของอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิค SPWM ได้ดังนี้

- ที่ค่า  $m_f \leq 21$  หากต้องการกำจัดฮาร์โมนิกเลขคู่จะต้องใช้การสวิตซ์ซิงแบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ซิงโครไนส์ หมายถึง  $m_f$  จะต้องเป็นจำนวนเต็มและความถี่หลักมูลจะเริ่มและจบคาบพร้อมกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม และ  $m_f$  ต้องเป็นจำนวนเลขคี่
- ที่ค่า  $m_f \geq 21$  ฮาร์โมนิกย่อยที่เกิดขึ้นจากการสวิตซ์ซิงแบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ไม่ซิงโครไนส์ ( $m_f$  ไม่เป็นจำนวนเต็ม) จะมีค่าน้อยแต่ต้องตระหนักว่าควรหลีกเลี่ยงการสวิตซ์ซิงแบบพีดับเบิลยูเอ็มแบบไม่ซิงโครไนส์ เพราะจะทำให้เกิดฮาร์โมนิกย่อยใกล้กับความถี่หลักมูล
- ที่ค่า  $m_a > 1$  หากไม่พิจารณาค่าของ  $m_f$  จะมีผลเช่นเดียวกับกรณีที่ 1

ทั้งหมดที่กล่าวในข้างต้นคือหลักการที่เกี่ยวข้องของการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิคการมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์ ซึ่งเห็นว่าการสร้างสัญญาณด้วยหลักการดังกล่าวนี้มีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน และง่ายต่อการสร้างเพื่อใช้งาน แต่จากสมการที่ 2.31 จะเห็นว่าการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิคมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์นั้นแรงดันด้านออกจะมีค่าน้อย และในการสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมนั้นอาจเกิดกรณีที่ไม่ซิงโครไนส์ อันเนื่องมาจากกระบวนการทำงานของฮาร์ดแวร์ จึงอาจก่อให้เกิดปัญหาเรื่องของฮาร์โมนิกย่อยที่เกิดขึ้นใกล้กับความถี่หลักมูล จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการคิดค้นเทคนิคการสวิตซ์ซิงในรูปแบบใหม่โดยจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 24 เพิ่มบล็อก Voltage Estimate เพื่อสร้างแรงดันเฟส

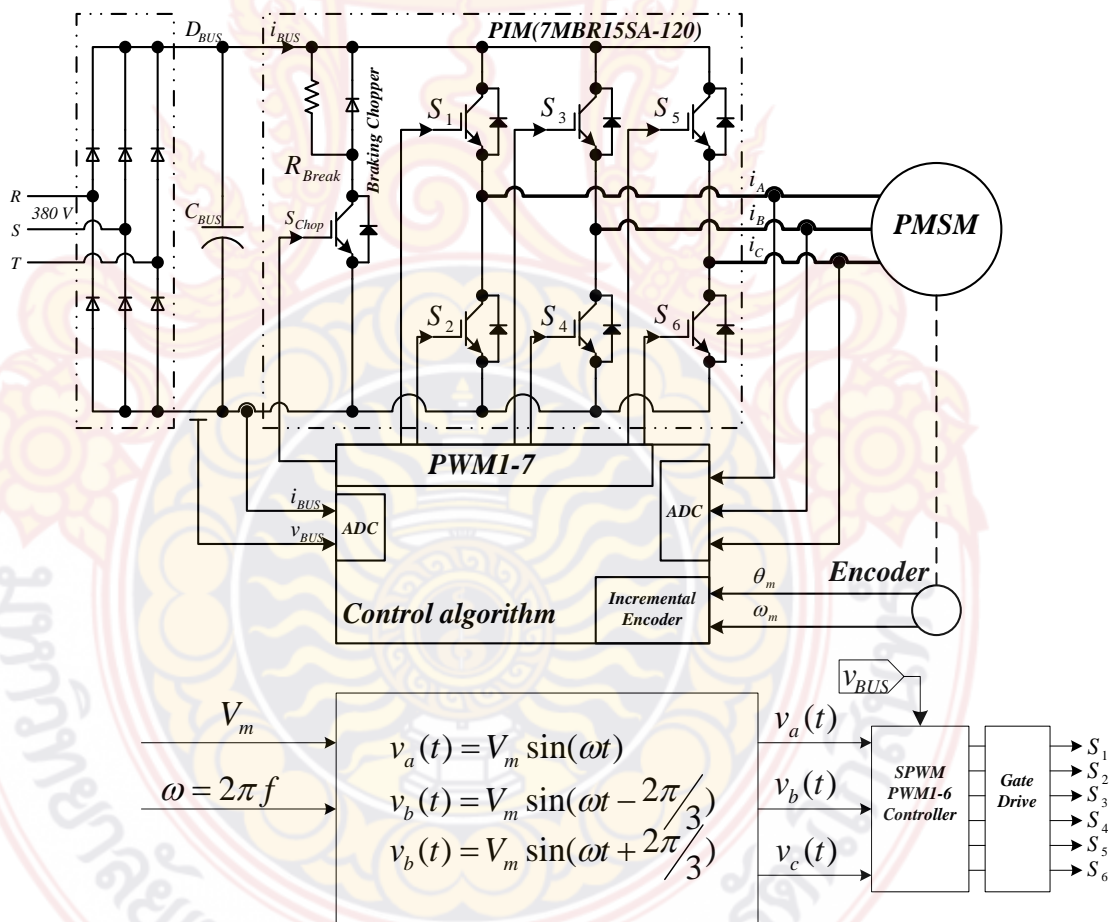


ภาพที่ 25 ภายในบล็อก Voltage Estimate เพื่อสร้างแรงดันเฟส

## 2. ผลการจำลองการทำงานของ การขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรโดยโปรแกรม Matlab/Simulink

จากการดำเนินการสร้างโมเดลของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรจากสมการที่ทำการพิจารณาในข้างต้น และแบบจำลองของอินเวอร์เตอร์สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ตอนนี้นำพร้อมที่จะทำการจำลองการทำงานเพื่อดูผลการทำงานของระบบ สำหรับค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์จะใช้ค่าในตารางที่ 1

ในตอนเริ่มต้นนั้นไม่สามารถทราบค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมดังนั้นการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีการแบบ Field oriented control (FOC) นั้นจะยังไม่สามารถกระทำได้ การดำเนินการคือ การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีการแบบ V/F ดังแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมในภาพที่ 25

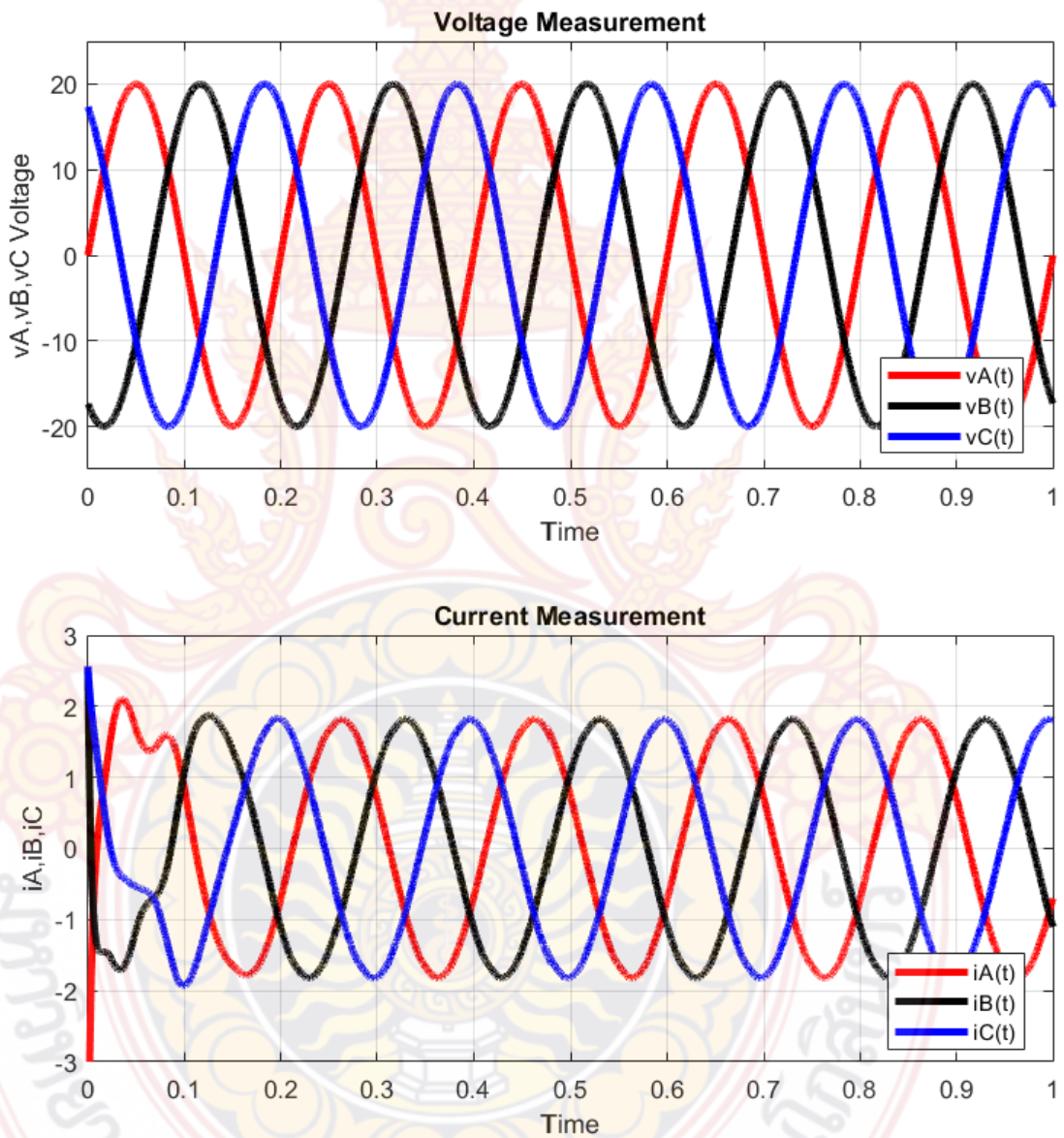


ภาพที่ 26 ไดอะแกรมการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีการ V/F

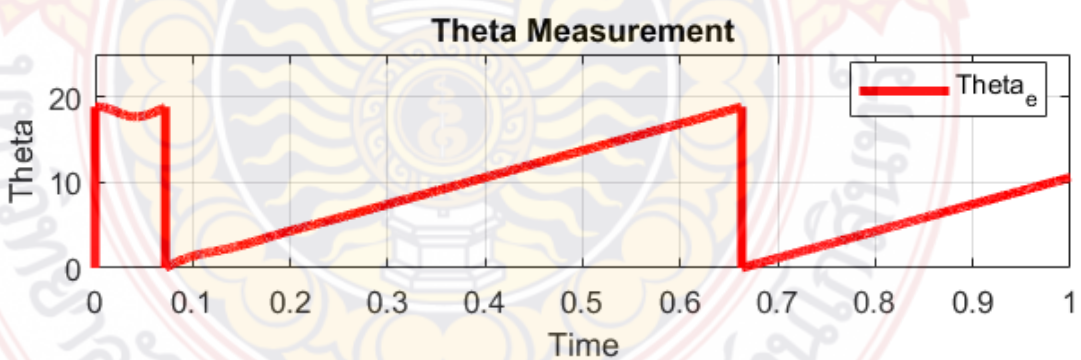
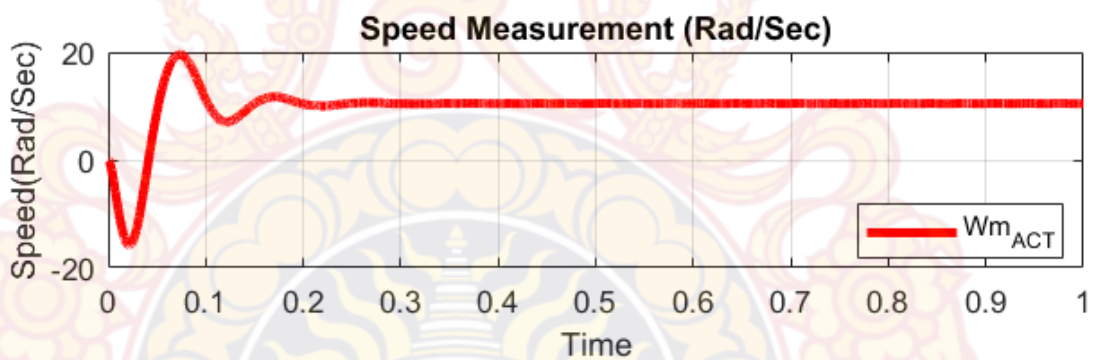
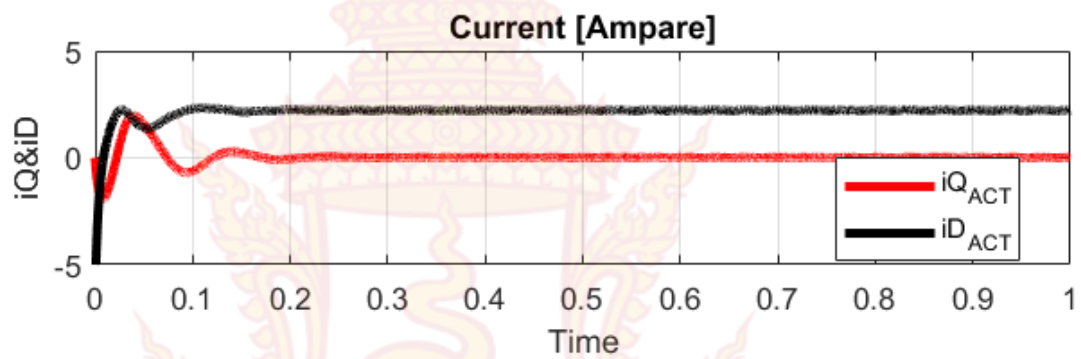
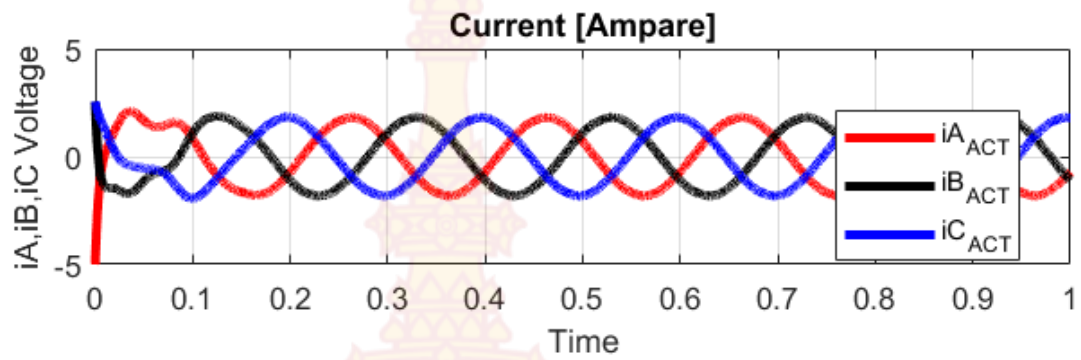


ผลการจำลองการทำงานเป็นดังนี้

ทำการเซตค่าความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ , แรงแดัน  $V_m = 20 \text{ โวลต์}$  และแรงดันบัส  $V_{BUS} = 50 \text{ โวลต์}$   
แรงดันเฟส  $v_a(t)$ ,  $v_b(t)$  และ  $v_c(t)$  รวมถึงกระแส  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$  และ  $i_c(t)$  ที่ได้แสดงดังภาพที่ 26



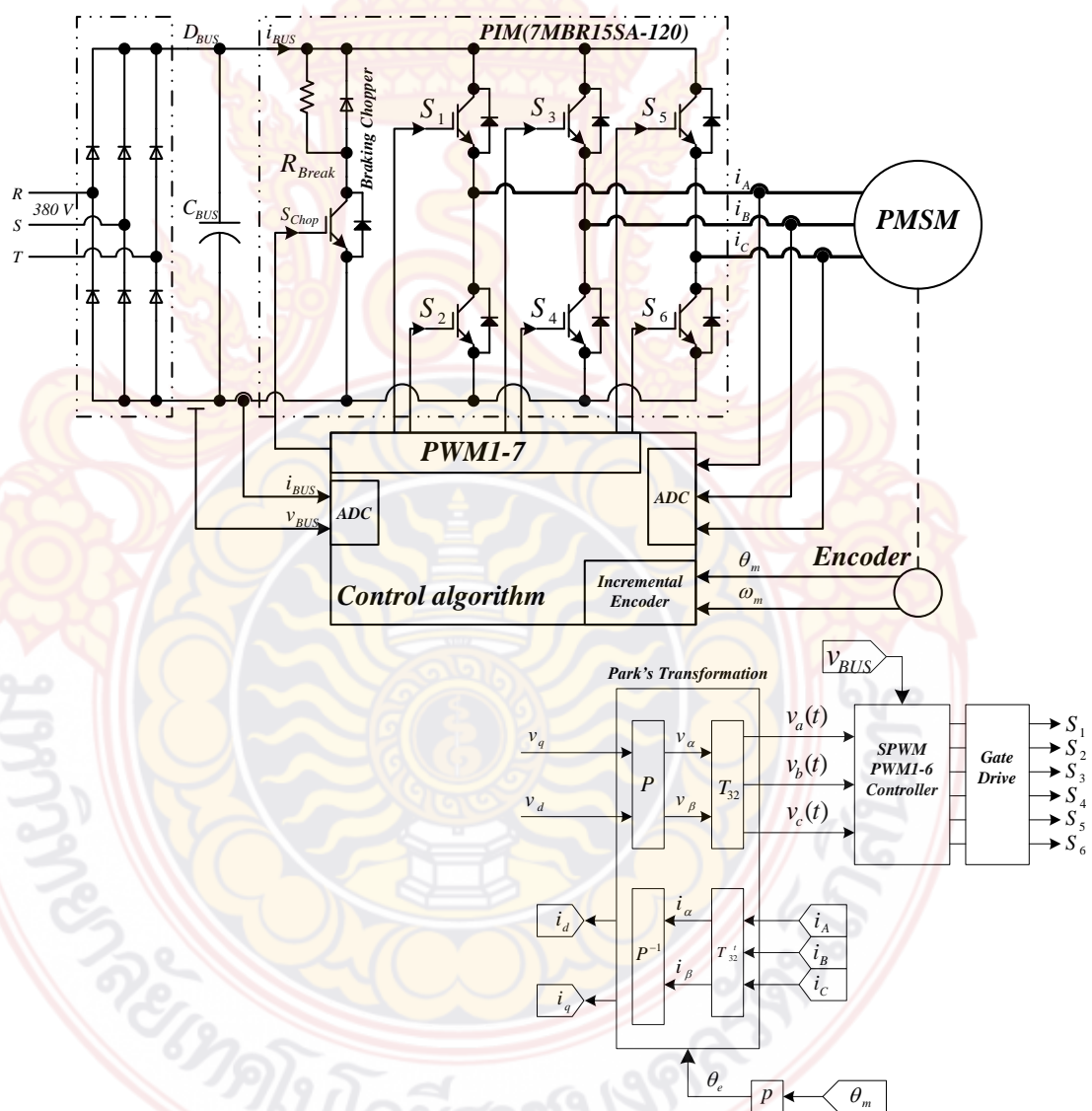
ภาพที่ 27 รูปคลื่นแรงดัน  $v_a(t)$ ,  $v_b(t)$ ,  $v_c(t)$  และกระแส  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$ ,  $i_c(t)$



ภาพที่ 28 รูปคลื่นกระแส  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$ ,  $i_c(t)$ , รูปคลื่นกระแส  $i_d, i_q$ , รูปคลื่นความเร็ว  $\omega_r$  และรูปคลื่นของมุมโรเตอร์  $\theta_r$

จากการทดลองขับเคลื่อนมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรด้วยวิธีการ  $V/F$  นั้นทำเพื่อทดสอบระบบทั้งหมดคือ การทำงานของเซ็นเซอร์ต่างๆ ประกอบด้วยเซ็นเซอร์กระแส, เซ็นเซอร์แรงดัน และ Encoder รวมทั้งการแปลงแกนจาก 3 แกนเป็น 2 แกน เพื่อให้ได้กระแส  $i_d$  และ  $i_q$  จาก การทดลองแสดงให้เห็นว่าทั้งหมดที่กล่าวมาสามารถทำงานได้เป็นอย่างดี

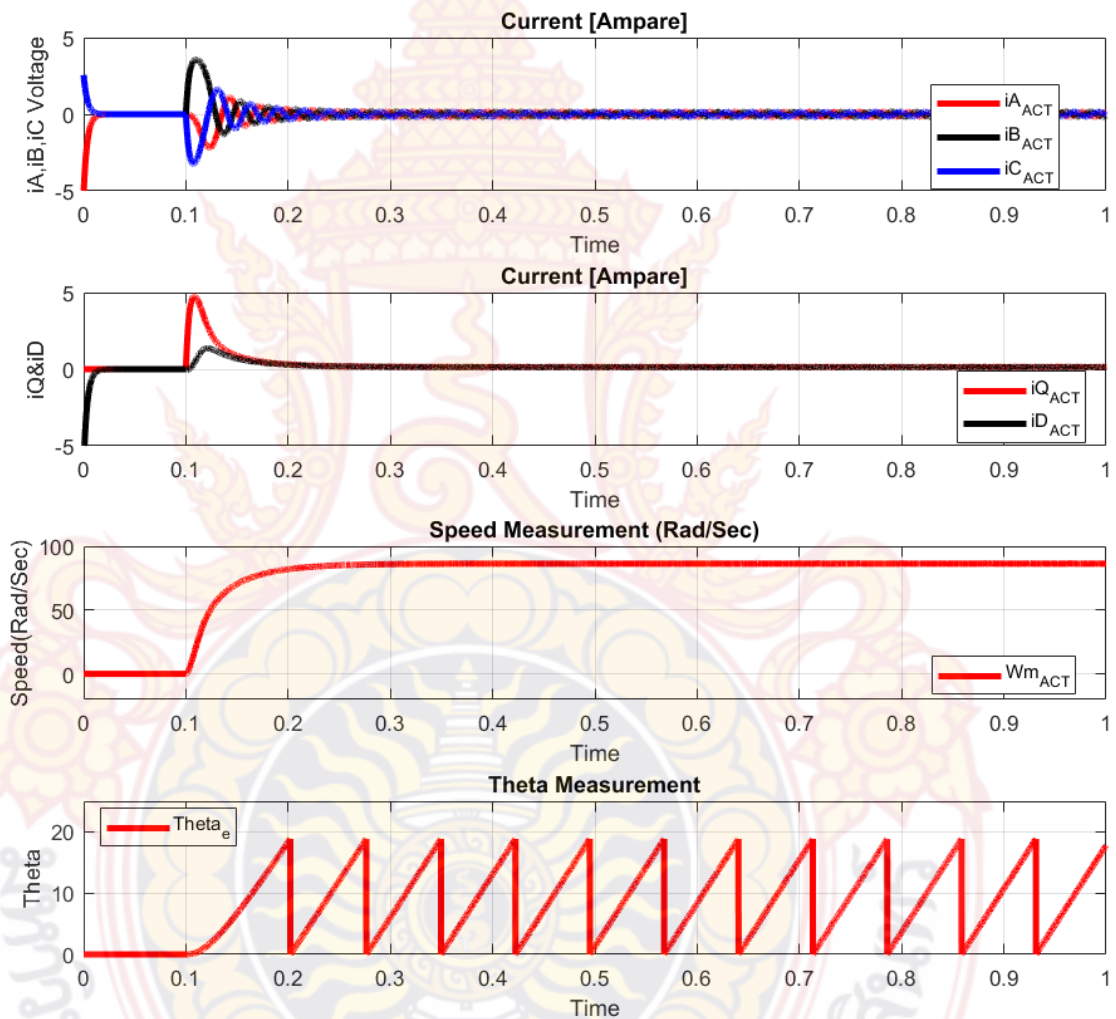
ลำดับขั้นตอนต่อไปคือการขับเคลื่อนมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบ *Open-loop* โดยทำการกำหนดค่า  $V_d$  และ  $V_q$  เพื่อดูการทำงานทั้งมอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา และขณะที่มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา โดยการทดลองกำหนดค่าแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมดังภาพที่ 28



ภาพที่ 29 ไดอะแกรมการทดสอบการขับเคลื่อน PMSM แบบ Open-loop

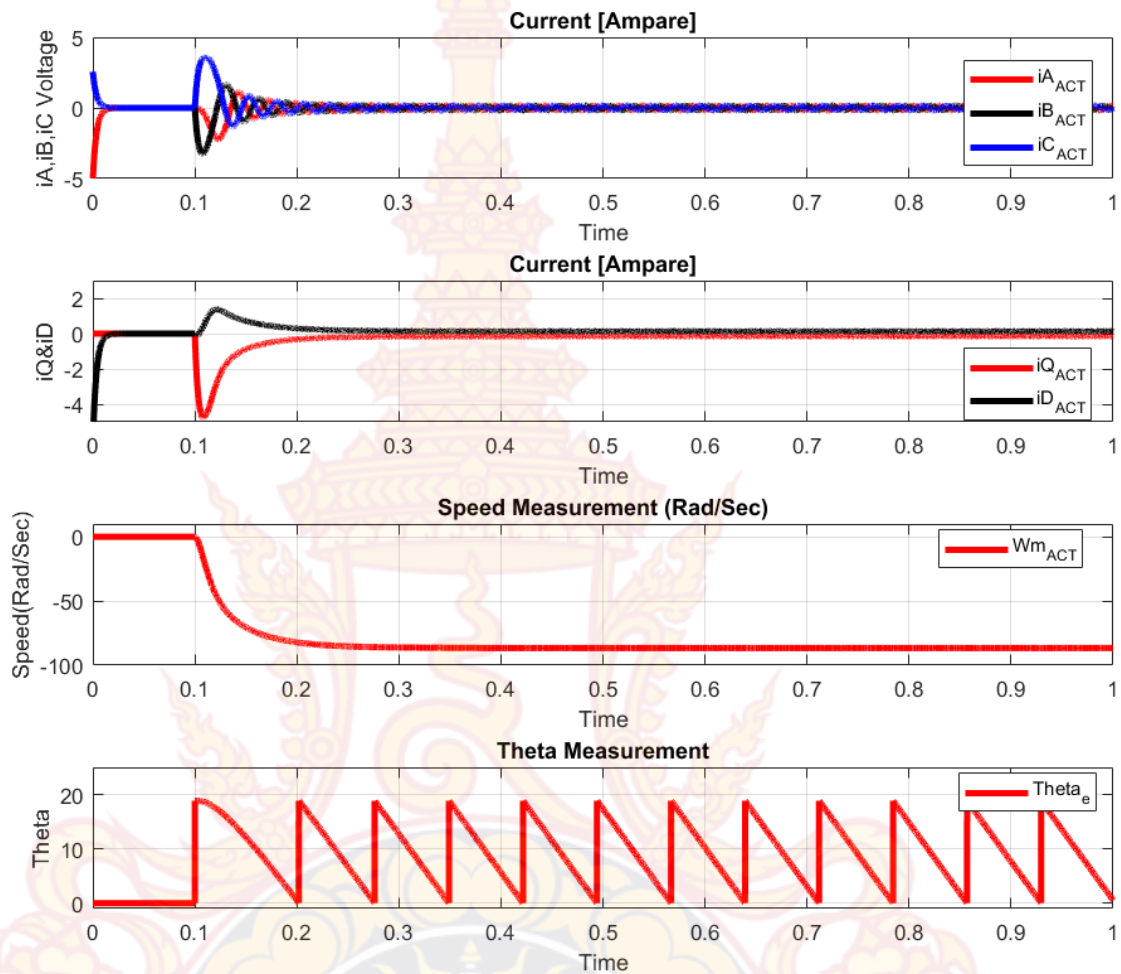
### ผลการทดลอง

ภาพที่ 29 แสดงผลการทดลองเมื่อทำการจ่าย  $V_d = 0$  และ  $V_q = 60$  จากนั้นภาพที่ 30 ทำการพิจารณากระแส  $i_q$  และความเร็วของมอเตอร์  $\omega$ , เมื่อจ่ายแรงดัน  $V_q$  เป็นบวกและเป็นลบ เพื่อตรวจสอบทิศทางการหมุนของมอเตอร์และกระแสที่สอดคล้องกัน



ภาพที่ 30 รูปคลื่นกระแส  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$ ,  $i_c(t)$ , รูปคลื่นกระแส  $i_d, i_q$ , รูปคลื่นความเร็ว  $\omega$ , และรูปคลื่นของมุมโรเตอร์  $\theta_r$





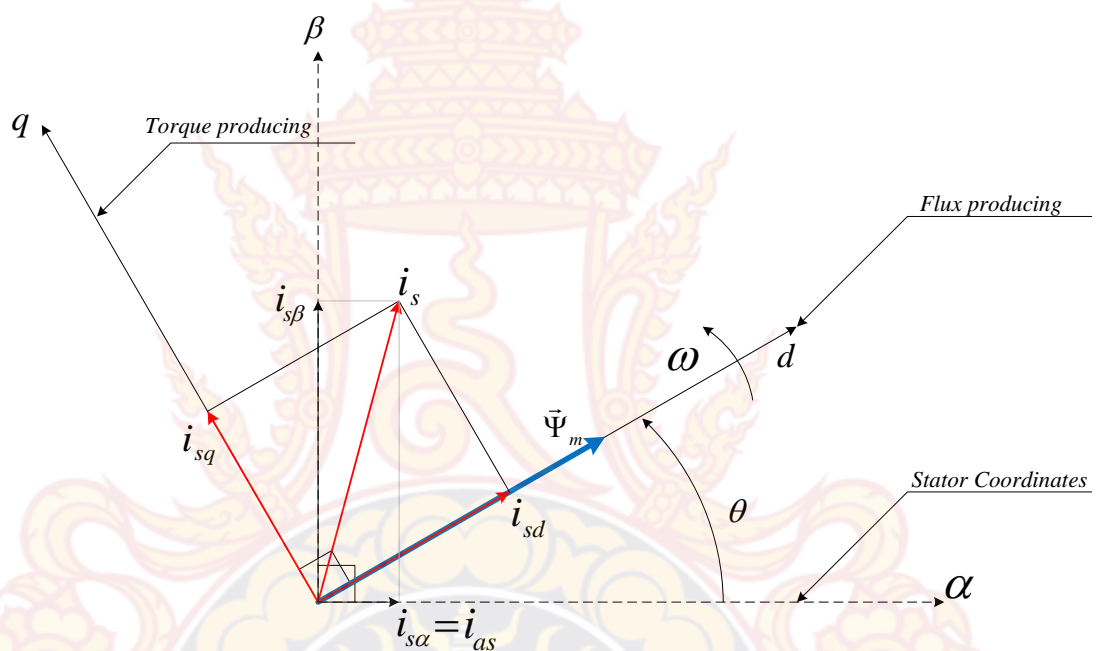
ภาพที่ 31 รูปคลื่นกระแส  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$ ,  $i_c(t)$ , รูปคลื่นกระแส  $i_d, i_q$ , รูปคลื่นความเร็ว  $\omega_r$ , และรูปคลื่นของมุมโรเตอร์  $\theta_r$

### 3. การควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธีการ Field Oriented Control (FOC)

การควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธีการ Field Oriented Control (FOC) เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมสำหรับแอปพลิเคชันที่ความเร็วต่ำ เช่น เครื่องและเครื่องจักรที่ประสิทธิภาพสูง การควบคุมชนิดนี้เป็นการควบคุมแบบวงปิด (Close-loop control) มันต้องใช้ค่าความเร็วของเพลามอเตอร์ซึ่งถูกวัดโดย Encoder ในฐานะของตัวป้อนกลับในการกลยุทธ์การควบคุม นอกจากรูปคลื่นความเร็วแล้วยังมีรูปกระแสอีกด้วยซึ่งควบคุมแรงบิดแม่เหล็กที่กำเนิดโดยมอเตอร์ ด้วยเหตุผลที่ว่านี้ FOC จึงถูกเรียกว่าการควบคุมแบบอ้อม (Indirect control) คือแรงบิดถูกควบคุมอย่างอ้อมโดยผ่านการควบคุมกระแสตัวเอง ข้อดีหลักของการควบคุมแบบนี้คือ มันมีความถูกต้องของการควบคุมความเร็ว มันมีผลตอบสนองของแรงบิดที่ดี และมันบรรลุวัตถุประสงค์ของแรงบิดอย่างเต็มที่ที่ความเร็วเท่าศูนย์

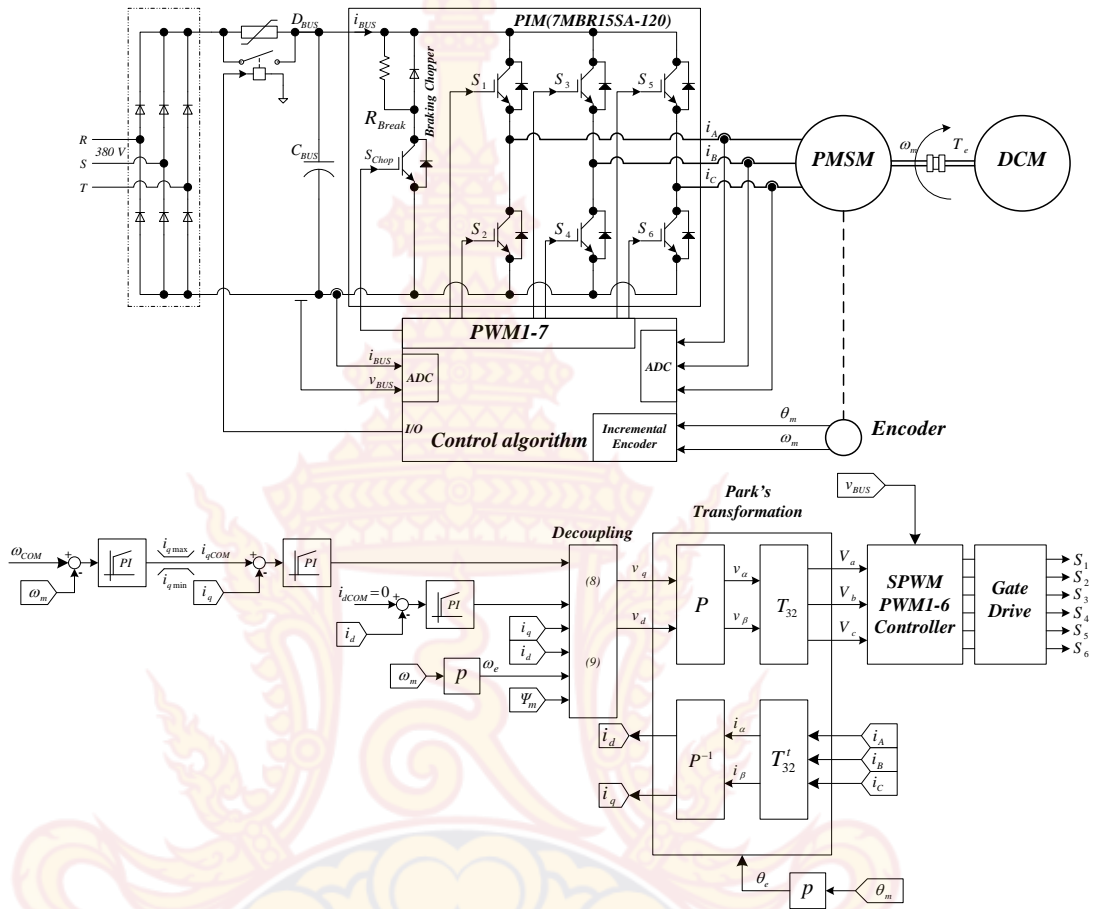
ข้อเสียหลักของการควบคุมแบบนี้คือ มีราคาแพง และเพื่อที่จะขับเคลื่อนมอเตอร์เทคนิคการมอดูเลชันสัญญาณเป็นสิ่งจำเป็น คือต้องถูกใช้เพื่อควบคุมอินเวอร์เตอร์

อัลกอริทึมการควบคุมถูกแสดงในกรอบอ้างอิงการหมุนของโรเตอร์  $dq$  ซึ่งมีแกน  $d$  ตรงกับทิศทางของฟลักซ์เชื่อมโยงของแม่เหล็กถาวร  $\Psi_m$  เฟสเซอร์ไดอะแกรมที่แสดงกรอบอ้างอิง  $dq$  ที่ถูกเลือกแสดงในภาพที่ 31



ภาพที่ 32 Phasor diagram illustrating the  $dq$  control reference frame

เพื่อที่จะดำเนินการควบคุมนี้เทคนิคการมอดูเลชันสำหรับการควบคุมสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ต้องถูกนำไปใช้ด้วย สเปกตรัมของมอดูเลชันถูกเลือกในฐานะวิธีการควบคุมสำหรับอินเวอร์เตอร์ โครงสร้างของระบบควบคุมทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 32



ภาพที่ 33 Field Oriented Control โครงสร้างแบบทั่วไป

มีการควบคุม 2 ลูป คือ ลูปความเร็วซึ่งควบคุมความเร็วของมอเตอร์ และลูปกระแส สำหรับ ทั้ง  $i_d$  และ  $i_q$  ซึ่งควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ เพื่อที่จะสมมติว่าลูปควบคุมกระแสไม่มีอิทธิพลต่อลูปความเร็ว แบนวิดธ์ของลูปกระแสควรสูงอย่างน้อย 6-8 เท่าของลูปความเร็ว ความเร็วที่ต้องการของมอเตอร์เป็นอินพุตของระบบควบคุม ดังที่แสดงในภาพที่ 32 การใช้การวัดความเร็ว ค่าความผิดพลาดระหว่างความเร็วอ้างอิงและความเร็วจริงของมอเตอร์ถูกป้อนเข้าสู่ตัวควบคุมความเร็ว เอาต์พุตของตัวควบคุมคือ คำสั่งแรงบิด  $T_e^*$  จากตรงนี้คำสั่งแรงบิดกระแสอ้างอิง  $i_d$  และ  $i_q$  ถูกพิจารณาบนพื้นฐานของการควบคุมหนึ่งในกลยุทธ์การควบคุมต่อไปนี้

- Constant torque angle control  $\alpha = \pi / 2$  (CTA)
- Maximum torque per ampere control (MTPAC)
- Unity power factor control (UPFC)
- Constant stator flux control (CSTC)

จากกลยุทธ์ที่กล่าวถึงข้างบน การควบคุมที่ถูกเลือกคือ Maximum torque per ampere (MTPA) ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าอ้างอิงกระแส dq ที่ถูกเลือกโดยอัลกอริทึม MTPA และกระแสที่วัดมาได้ถูกป้อนกลับเข้าสู่ตัวควบคุมกระแส

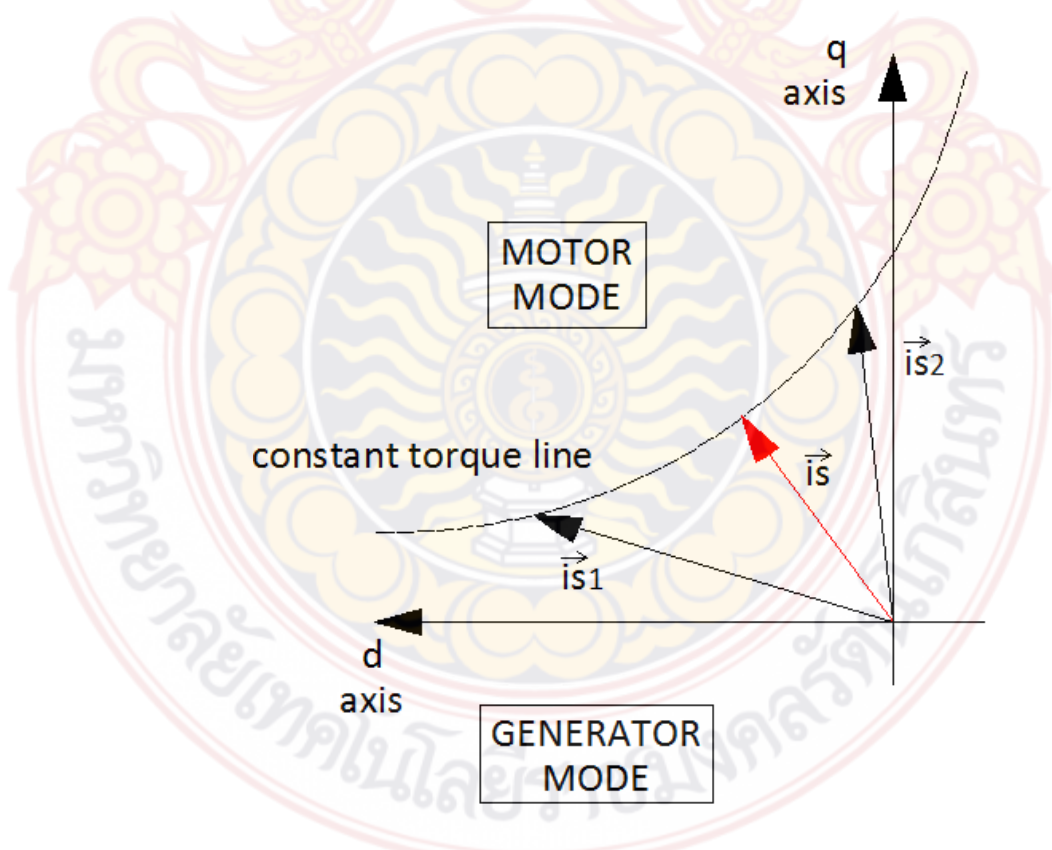
เอาต์พุตของตัวควบคุมกระแสเป็นส่วนที่ตรงกับแรงดันอ้างอิง dq บนพื้นฐานของแรงดันสเตเตอร์ของมอเตอร์ การมอดูเลชันแบบสเปซเวกเตอร์ถูกใช้เพื่อควบคุมสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

ตัวควบคุมที่ใช้ในอัลกอริทึมควบคุมที่ถูกเลือกเป็นตัวควบคุมแบบ Proportional-Integrator (PI)

อัลกอริทึมที่แสดงในกรอบอ้างอิงโรเตอร์ที่กระแสและแรงดันถูกพิจารณา เพื่อที่ตัวควบคุมพีไอสามารถกำจัดค่า steady-state error

#### 4. Maximum torque per ampere control

กลยุทธ์การควบคุม MTPA ยืนยันว่ารระดับแรงบิดที่ต้องการจะมีการใช้กระแสไฟฟ้าขั้นต่ำของสเตเตอร์ เมื่อทำเช่นนี้การสูญเสียทองแดงจะลดลงและประสิทธิภาพโดยรวมของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 34 Vector representation of the minimum stator current vector at a given torque level for an PMSM



ดังที่นำเสนอในรูปที่ 33 โดยที่แรงบิดที่กำหนดจากความเป็นไปได้ต่างๆของเวกเตอร์กระแสสเตเตอร์ (เช่น  $i_{s1}$ ,  $i_{s2}$ ) ที่สามารถสร้างระดับแรงบิดที่ต้องการได้จะเป็นสีแดงที่น้อยที่สุด ทุกจุดที่กำหนดโดยการตัดกันของเวกเตอร์กระแสต่ำสุดและระดับแรงบิดที่สอดคล้องกันให้เส้นโค้ง MTPA จุดเริ่มต้นของการได้รับ MTPA curve สำหรับ PMSM คือสมการแรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot P \cdot (\Psi_m \cdot i_q) + \frac{3}{2} \cdot P \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q \quad (2.33)$$

นอกเหนือจากสมการนี้ต้องเพิ่มข้อจำกัดอีกข้อหนึ่งคือ ข้อจำกัดของกระแสสเตเตอร์ เนื่องจากข้อจำกัดทางกายภาพของอินเวอร์เตอร์

$$I_{smax}^2 = i_d^2 + i_q^2 \quad (2.34)$$

โดยที่

$I_{smax}$  คือค่าแอมป์ริจูดสูงสุดของกระแสที่ถูกจ่ายโดยอินเวอร์เตอร์ ถ้า  $i_q$  ถูกอธิบายจากสมการที่ 2.34 และแทนที่ด้วยสมการของแรงบิด 2.33 จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot P \cdot (\Psi_m \cdot \sqrt{I_{smax}^2 - i_d^2}) + \frac{3}{2} \cdot P \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot \sqrt{I_{smax}^2 - i_d^2} \quad (2.34)$$

เพื่อที่จะหากระแส  $i_d$  ขั้นต่ำที่ทำให้ความพึงพอใจให้สมการของแรงบิด  $T_e$  สมการแรงบิดต้องถูกดิฟด้วยกระแส  $i_d$  การแสดงของการแปรเปลี่ยนของแรงบิดกับการพิจารณากับกระแสโรเตอร์ในแกน  $d$  คือ

$$\frac{dT_e}{di_{d_e}} = \frac{3}{2} \cdot P \cdot \frac{-i_d \Psi_m + (L_d - L_q)(I_{smax} - 2i_d)}{\sqrt{I_{smax}^2 - i_d^2}} \quad (2.35)$$

นำไปสู่

$$2i_d^2 + \frac{\Psi_m}{L_d - L_q} i_d - I_{smax}^2 = 0 \quad (2.36)$$

จากสมการนี้กระแส  $i_d$  ต่ำสุดที่ทำให้ความพอใจให้สมการแรงบิด  $T_e$  ถูกหาได้

$$i_d = \frac{-\Psi_m + \sqrt{\Psi_m^2 + 8(L_d - L_q)^2 I_{smax}^2}}{4(L_d - L_q)} \quad (2.37)$$

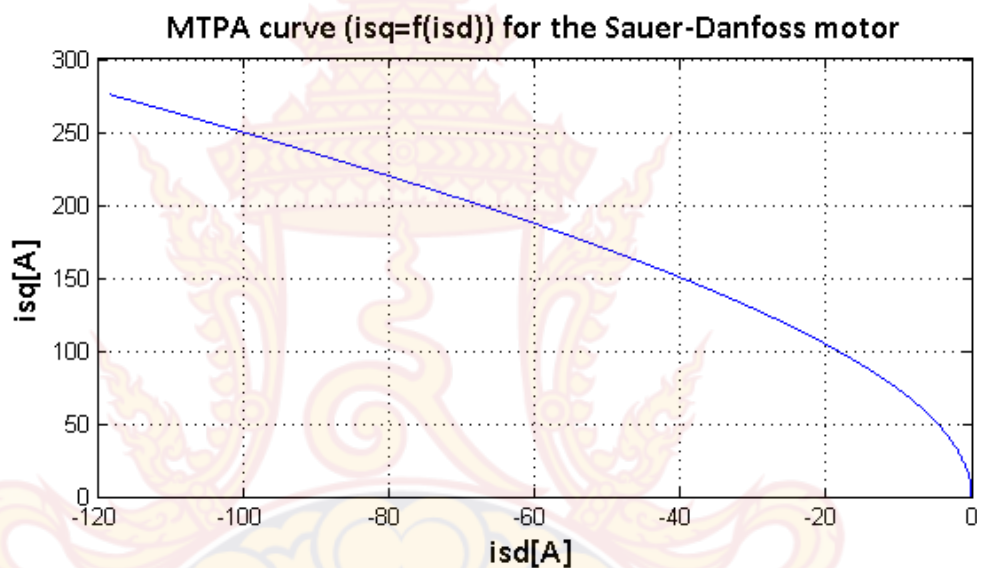
สุดท้ายชุดของสมการซึ่งให้เส้นโค้ง MTPA ของ PMSM และความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดอ้างอิงและกระแสสเตเตอร์ที่เกี่ยวข้องกันประกอบด้วย  $i_d^* = f(T_e^*)$  และ  $i_q^* = f(T_e^*)$  คือ

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot P \cdot (\Psi_m \cdot i_q) + \frac{3}{2} \cdot P \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q$$

$$i_d = \frac{-\Psi_m + \sqrt{\Psi_m^2 + 8(L_d - L_q)^2 I_{smax}^2}}{4(L_d - L_q)} \quad (2.38)$$

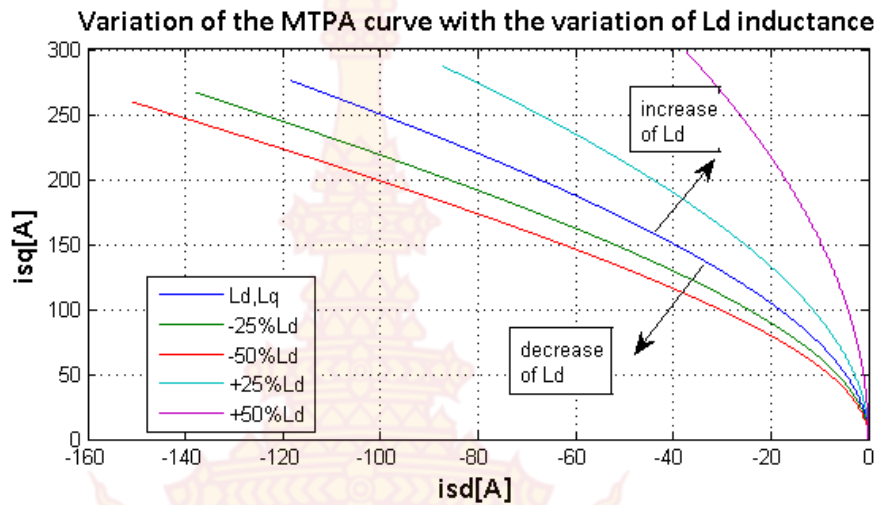
$$i_q = \sqrt{I_{smax}^2 - i_d^2}$$

ดังที่แสดงไว้ในสมการที่ 2.38 เส้น MTPA ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของมอเตอร์: ฟลักซ์เชื่อมโยงของแม่เหล็กถาวรและความเหนี่ยวนำแกน  $d$  และ  $q$  ใช้โปรแกรม Matlab เพื่อหาเส้นทาง MTPA สำหรับ PMSM ที่ใช้ในโครงการนี้พารามิเตอร์มอเตอร์เป็นข้อมูลที่น่าเสนอในบทที่ 2 ขนาดกระแสสูงสุดที่กำหนดไว้คือ  $I_{smax} = 10$  Ampere และ  $L_d = 35.10$  [mH],  $L_q = 35.10$  [mH],  $\psi_m = 0.2224$  [Wb]



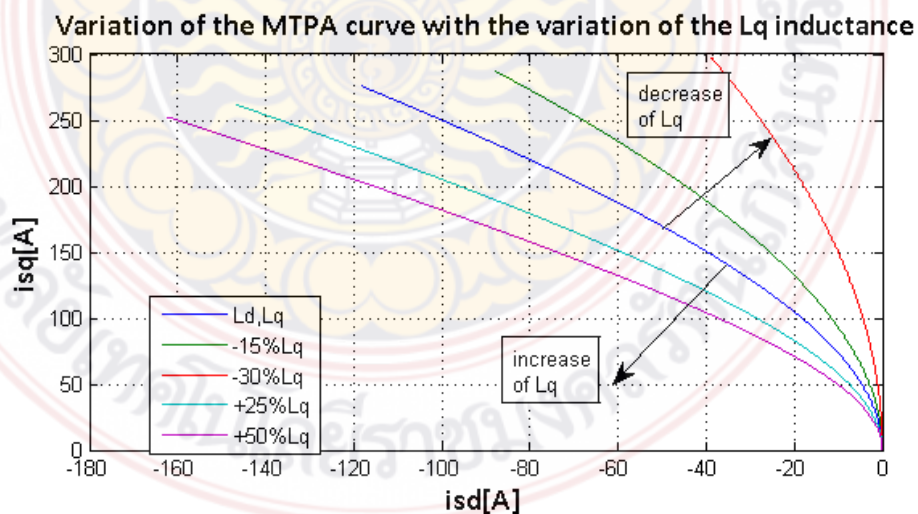
ภาพที่ 35 MTPA curve for the Sauer-Danfoss motor used in this project

มอเตอร์พารามิเตอร์  $L_d = 35.10$  [mH],  $L_q = 35.10$  [mH],  $\psi_m = 0.2224$  [Wb] ที่กำหนดรูปร่างของเส้นโค้ง MPTA ถูกพิจารณาให้คงที่ การแปรเปลี่ยนของค่า  $L_d = 35.10$  [mH],  $L_q = 35.10$  [mH] เนื่องจากการแปรเปลี่ยนของกระแส หรือการอิมิตัวไม่ถูกพิจารณา นี้อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการควบคุม MTPA ในแอ็พพลิเคชันระบบจริงเนื่องจากการแปรเปลี่ยนของตัวแปรมอเตอร์ในระหว่างการทำงานของมอเตอร์ เพื่อคู่อธิพลของพารามิเตอร์มอเตอร์ในเส้นโค้ง MTPA ความเหนี่ยวนำ  $L_d$  และ  $L_q$  ถูกปรับเปลี่ยนค่าขึ้นลงและเส้นโค้งของ MTPA ถูกพล็อต การแปรเปลี่ยนของเส้นโค้ง MTPA ด้วยการแปรเปลี่ยนค่า  $L_d$  ถูกนำเสนอในภาพที่ 35



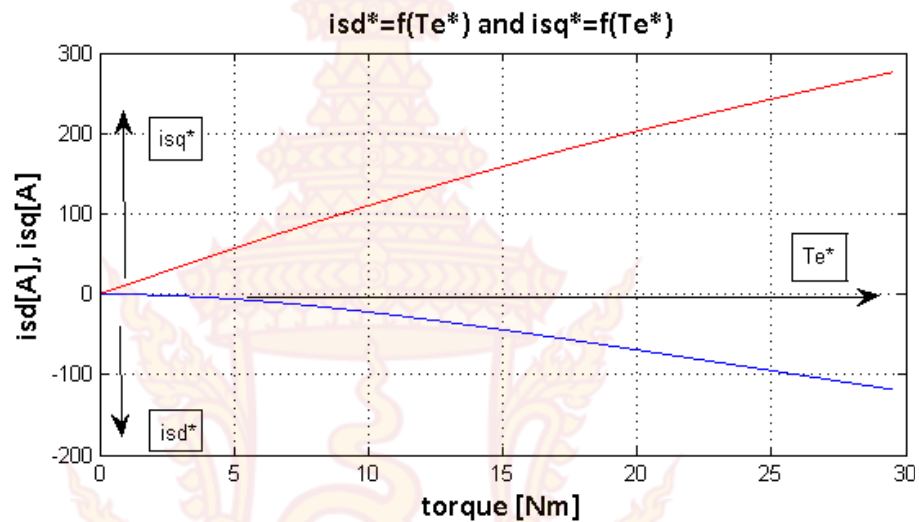
ภาพที่ 36 MTPA curve for the Sauer-Danfoss motor with varying  $L_d$  inductance

ถ้าค่า  $L_d$  ลดลงความชันของเส้นโค้ง MTPA ลดลงด้วย แปลงไปเป็นแกนกระแส  $d$  และ  $q$  หมายความว่าสำหรับแรงบิดที่กำหนด  $i_d$  (กระแสฟลักซ์) จะเพิ่มขึ้นและ  $i_q$  (torque current) จะลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้าการเปลี่ยนแปลงค่าของ  $L_d$  เป็นบวกความชันของเส้นจะเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้ง MTPA ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่า  $L_q$  ดังแสดงในภาพที่ 36 จากรูปถ้า  $L_q$  ลดลงความชันของเส้นโค้งจะเพิ่มขึ้น แปลงไปสู่แกนกระแส  $dq$  มันหมายความว่าแรงบิดกระแส  $i_q$  เพิ่มขึ้นขณะที่กระแส  $i_d$  ลดลง เมื่อเปลี่ยนค่า  $L_q$  เป็นบวกความชันของเส้นโค้งจะลดลง ดังนั้นสำหรับแรงบิดที่เท่ากันกระแส  $i_d$  เพิ่มขึ้นขณะที่  $i_q$  ลดลง ขณะที่สังเกตว่าการเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้ง MTPA สูงกว่าด้วยการลดค่า  $L_q$



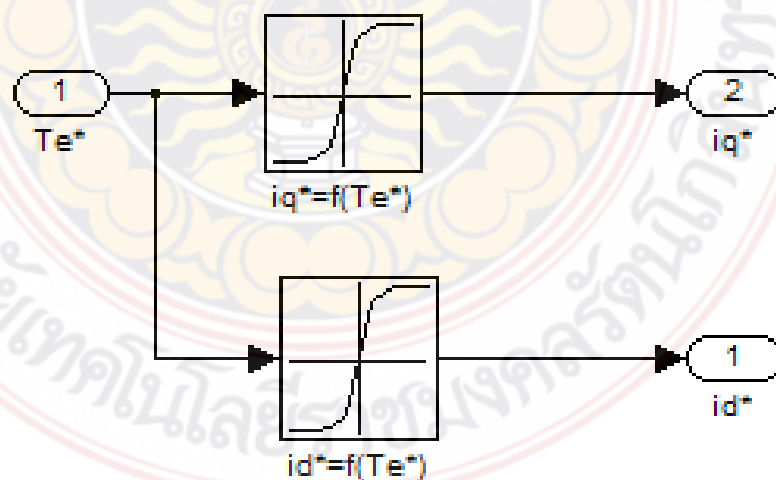
ภาพที่ 37 MTPA curve for the Sauer-Danfoss motor with varying  $L_q$  inductance

ถ้าเส้นโค้ง MTPA ถูกทราบแล้วการใช้ความสัมพันธ์  $i_d^*=f(T_e^*)$  และ  $i_q^*=f(T_e^*)$  ต้องการสำหรับการควบคุม FOC สามารถถูกกำหนด การเปลี่ยนแปลงของแรงบิดที่เกี่ยวข้องกับเส้นโค้ง MTPA ถูกนำเสนอในภาพที่ 37



ภาพที่ 38 Generation of the reference  $i_d^*$  and  $i_q^*$  currents (MTPA curve) from the torque reference

ข้อมูลนี้เกี่ยวกับกระแสอ้างอิงจากคำสั่งแรงบิดอ้างอิงถูกใช้ในการจำลองการทำงาน FOC ในฐานะการควบคุมป้อนกลับ ข้อมูล  $i_d^*=f(T_e^*)$  และ  $i_q^*=f(T_e^*)$  ถูกเก็บใน look-up table โดยการสร้างจากโปรแกรม Matlab/Simulink



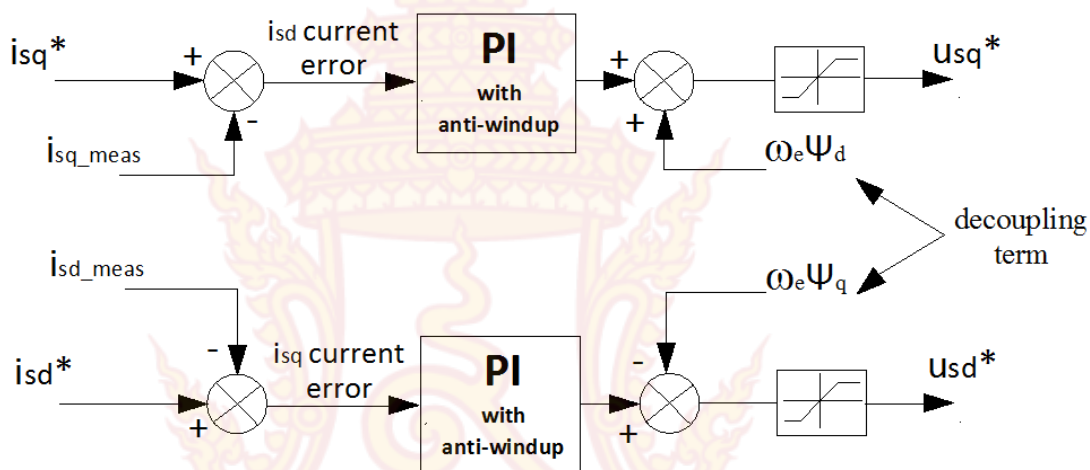
ภาพที่ 39 Simulink model of the feed-forward control using look-up tables



## 5. การปรับค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบพีไอ (Tuning of the PI current controllers)

### 5.1 การปรับค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบพีไอลูกระแส

ลูกระแสภายใน 2 ลูบ สำหรับ  $i_d$  และ  $i_q$  เร็วกว่าลูบความเร็วมาก บนพื้นฐานนี้ตัวควบคุมแบบพีไอของกระแสถูกปรับจนเป็นอันดับแรก โดยอะแกรมที่แทนโครงสร้างตัวควบคุมแบบพีไอถูกแสดงในภาพที่ 39



ภาพที่ 40 Structure of the PI current controllers

ค่าผิดพลาดระหว่างกระแสอ้างอิงในแกน dq และกระแสที่วัดได้ถูกป้อนกลับเข้าสู่ตัวควบคุมแบบพีไอ เอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพีไอเป็นความสัมพันธ์แรงดัน d และ q เอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพีไอถูกจำกัด ดังนั้นการกำหนดพีไอด้วย anti-windup ถูกใช้ เทอม Decoupling ถูกใช้บนลูกระแสทั้งสอง เพื่อที่จะควบคุม  $i_d$  และ  $i_q$  อย่างอิสระ เทอม Decoupling Back-emf  $\omega \Psi_m$  ถูกอธิบายจากสมการแรงดันของ PMSM

$$v_d = R_s \cdot i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \cdot \psi_q \quad (2.39)$$

$$v_q = R_s \cdot i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \cdot \psi_d \quad (2.40)$$

สมการแรงดันทั้ง 2 ถูกคล้อยด้วยเทอมของ Back-emf การแยกเทอมนี้ในลูกระแสทำให้กระแส  $i_d$  และ  $i_q$  สามารถถูกควบคุมได้อย่างอิสระ ทราบเฟอร์ฟังก์ชันอย่างง่ายของลูกระแส  $i_d$  และ  $i_q$  ซึ่งสมการแรงดันถูกแสดงใน s-plane คือ

$$V_d(s) = R_s \cdot i_d(s) + s \cdot L_d \cdot i_d(s) \quad (2.41)$$

$$V_q(s) = R_s \cdot i_q(s) + s \cdot L_q \cdot i_q(s) \quad (2.42)$$

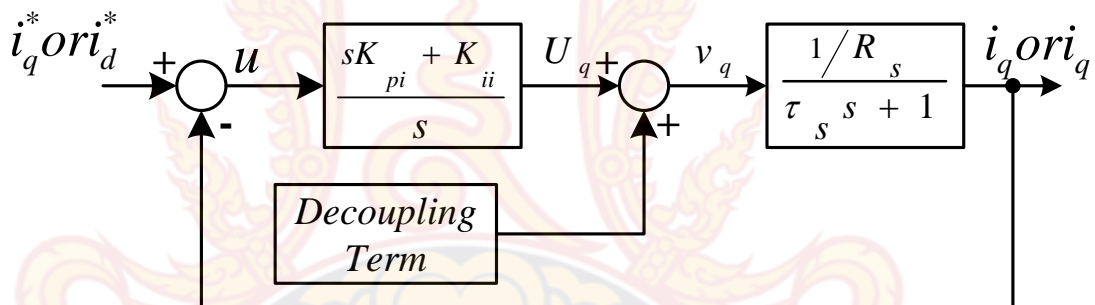
จากสมการนี้จะได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของ PMSM สำหรับลูกระแสดังนี้

$$\frac{i_d(s)}{V_d(s)} = \frac{1/R_s}{s \cdot \frac{L_d}{R_s}} \quad (2.43)$$

$$\frac{i_q(s)}{V_q(s)} = \frac{1/R_s}{s \cdot \frac{L_q}{R_s}} \quad (2.44)$$

กำหนดให้  $T_s = L_q/R_s$

จากสมการสามารถเขียนเป็นไดอะแกรมได้ดังภาพที่ 40



ภาพที่ 41 Design of the  $i_d$  and  $i_q$  current loop

เขียนฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงรอบปิด เพื่อจะได้สมการอนุพันธ์อันดับสองสำหรับการออกแบบตัวควบคุมกระแสได้ดังสมการ

$$\frac{i_q(s)}{i_q^*(s)} = \frac{i_d(s)}{i_d^*(s)} = \frac{(sK_{pi} + K_{ii}) / R_s \tau_s}{s^2 + \left(\frac{R_s + K_{pi}}{R_s \tau_s}\right) s + \frac{K_{ii}}{R_s \tau_s}} \quad (2.45)$$

ระบบมาตรฐานอันดับสองของระบบควบคุมแบบวงปิด มีฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงได้ดังนี้

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.46)$$

ดังนั้น ในการออกแบบตัวควบคุมของลูกระบบกระแสทำได้โดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ตัวหารระหว่างสมการที่ (2.45) และสมการที่ (2.46) ได้ดังนี้

$$\frac{R_s + K_{pi}}{R_s \tau_s} = 2\zeta\omega_n \quad (2.47)$$

$$\frac{K_{ii}}{R_s \tau_s} = \omega_n^2 \quad (2.48)$$

จากสมการที่ 2.47 และสมการที่ 2.48 สามารถจัดรูปสมการได้ใหม่ เพื่อง่ายต่อการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้ดังนี้

$$K_{pi} = 2\zeta R_s \tau_s \omega_n - R_s \quad (2.49)$$

$$K_{ii} = R_s \tau_s \omega_n^2 \quad (2.50)$$

นำค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 1 มาทำการคำนวณหาค่า และกำหนดค่า  $\zeta = 1$  และ  $\omega_n = 1/T_s$  rad/sec และค่า  $T_s = L_s/R_s = 0.0035$  ดังนั้นจะได้

$$K_{pi} = 2\zeta R_s \left(\frac{L_s}{R_s}\right) \omega_n - R_s \quad (2.51)$$

$$K_{pi} = 2\zeta L_s \left(\frac{R_s}{L_s}\right) - R_s$$

$$K_{pi} = 2\zeta R_s - R_s$$

ดังนั้น

$$K_{pi} = R_s (2\zeta - 1) \cong R_s \quad (2.52)$$

และ

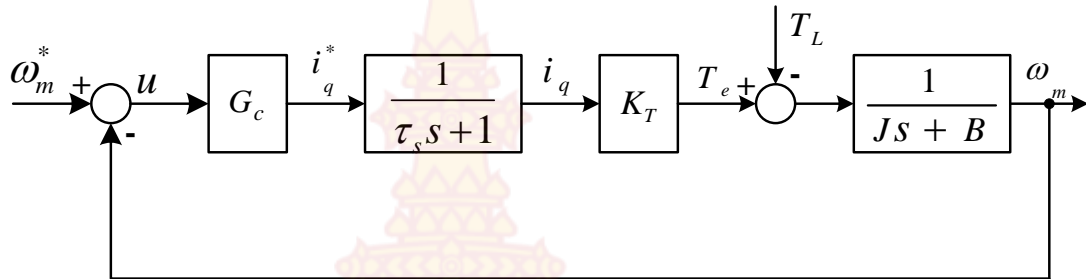
$$K_{ii} = \frac{R_s^2}{L_s} \quad (2.53)$$

## 5.2 การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบพีไอดูปความเร็ว

จากการศึกษาโครงสร้างและหลักการทางานของการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรด้วยวิธีการควบคุมแบบ FOC พบว่าการควบคุมความเร็วจะถูกควบคุมอยู่บนแกน  $q$  เท่านั้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับสมการแรงบิดของมอเตอร์ในสมการที่ (2.33) โดยที่กระแส  $i_d$  มีหน้าที่ควบคุมปริมาณสนามแม่เหล็กเท่านั้นและถูกกำหนดให้เท่ากับศูนย์ ( $i_d = 0$ ) ดังนั้นการควบคุมแรงบิดทางไฟฟ้าจึงขึ้นอยู่กับกระแส  $i_q$  เพียงอย่างเดียว การออกแบบตัวควบคุมความเร็วจะเริ่มจากการหาสมการอนุพันธ์ที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วที่โรเตอร์ เพื่อที่จะปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของพีไอของตัวควบคุมความเร็วพลานต์ของมอเตอร์จำเป็นต้องทราบ พลานต์ของมอเตอร์ถูกคำนวณจากสมการเชิงกลของมอเตอร์ดังนี้

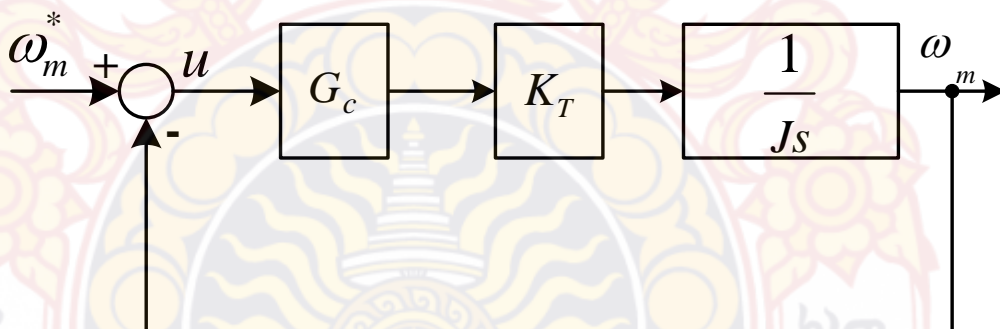
$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - B_f \cdot \omega_m - T_L) \quad (2.54)$$

สำหรับลูปควบคุมความเร็วที่พิจารณาสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังภาพ



ภาพที่ 42 บล็อกไดอะแกรมของลูปควบคุมความเร็ว

จากบล็อกไดอะแกรมในภาพที่ 41 เนื่องจากลูปกระแสถูกออกแบบค่า  $T_s$  เร็วกว่าลูปกระแส มาก และค่า  $T_L$  ถูกกำหนดให้เป็นศูนย์ และค่าความผิดที่เกิดจากแรงเสียดทานของมอเตอร์ (  $B$  ) มี ค่าน้อยมากจึงกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมของลูปควบคุมความเร็ว ใหม่ได้ดังนี้



ภาพที่ 43 บล็อกไดอะแกรมของลูปกระแสเมื่อพิจารณาตามเงื่อนไข

โดยที่ค่าพารามิเตอร์  $K_T$  คือค่าคงที่แรงบิดมีค่าเท่ากับ  $3/2P\psi_m$

จากภาพที่ 42 ทราานเฟอ์ฟังก์ชันวงปิดของลูปความเร็วสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\omega_m(s)}{\omega_m^*(s)} = \frac{(sK_T K_{p\omega} + K_T K_{i\omega}) / J}{s^2 + (\frac{sK_T K_{p\omega}}{J})s + \frac{K_T K_{i\omega}}{J}} \quad (2.55)$$

การออกแบบตัวควบคุมพีไอของลูปโดยใช้ sisotool(system) ในโปรแกรม Matlab โดย ทำการกำหนดเลือกพารามิเตอร์ของ lag compensator ดังนี้

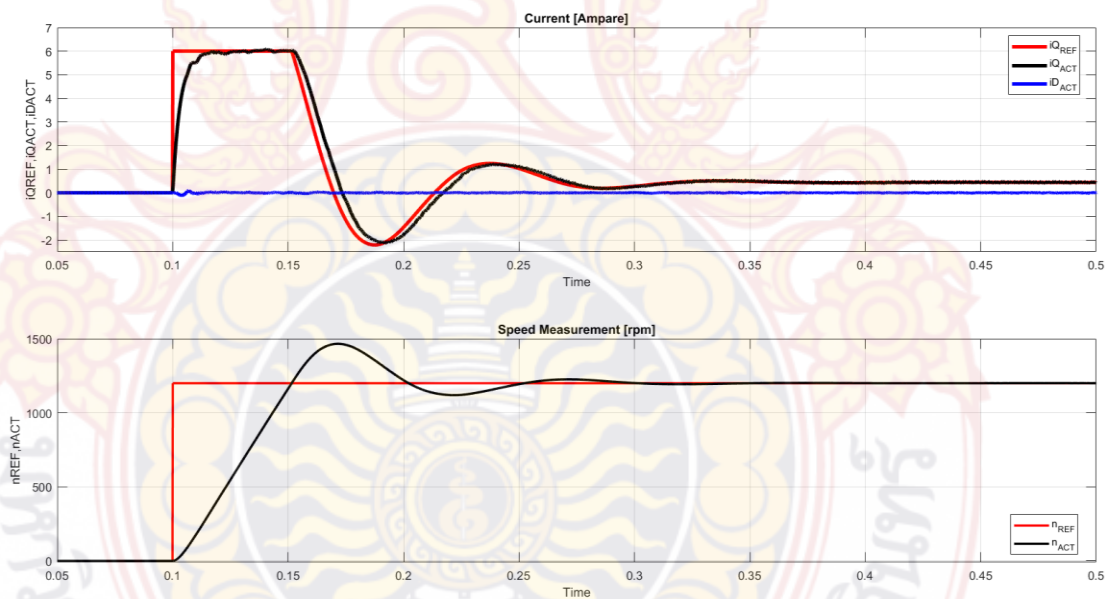


$$G_c = \frac{0.12(s+70)}{s} \quad (2.56)$$

เมื่อทำการออกแบบตัวควบคุมสำหรับการควบคุมกระแส  $i_q$  และ  $i_d$  ตลอดจนตัวควบคุมสำหรับการควบคุมความเร็วเป็นที่เรียบร้อยแล้วขั้นต่อไปคือการจำลองการทำงานของการทำงานของมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรโดยวิธีการ FOC

## 6. ผลการจำลองการทำงานของมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรโดยการใช้วิธีการควบคุมแบบ Field Oriented Control

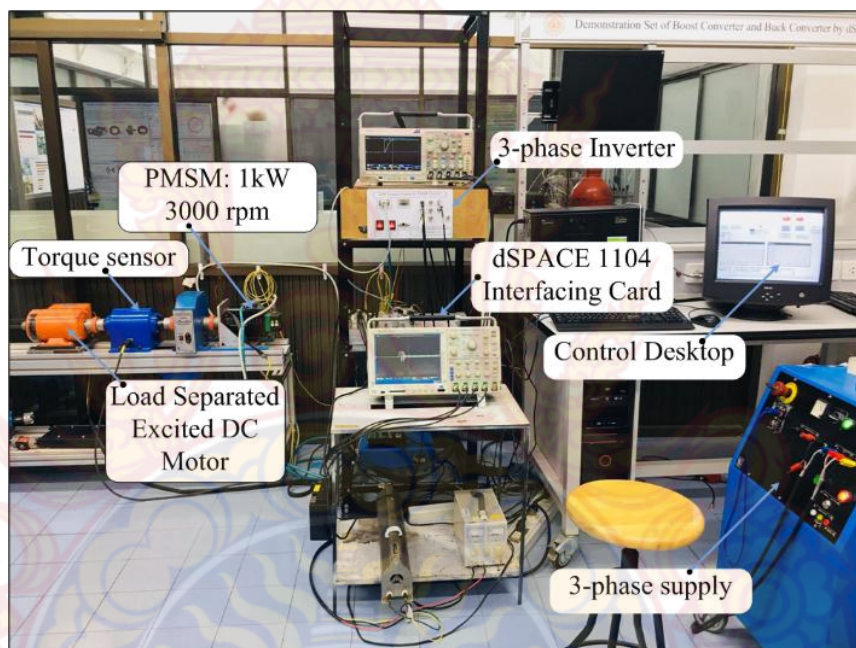
เมื่อตัวควบคุมถูกออกแบบและพารามิเตอร์ทุกตัวถูกกำหนดขึ้นขั้นตอนต่อไปคือการจำลองการทำงานของมอเตอร์ เพื่อดูสมรรถนะการทำงานของตัวควบคุมที่ทำการออกแบบ จากภาพที่ 43 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่ทำการออกแบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 44 ผลการจำลองการทำงานของตัวควบคุมสำหรับลูปกระแส  $i_q, i_d$  [Ampere] และลูปความเร็ว  $n$  [rpm]

### บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ

บทนี้เป็นการนำเสนอขั้นตอนและวิธีการดำเนินการในส่วนของฮาร์ดแวร์ที่ใช้สำหรับการทดสอบการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ส่วนประกอบทั้งหมดของฮาร์ดแวร์แสดงดังภาพ

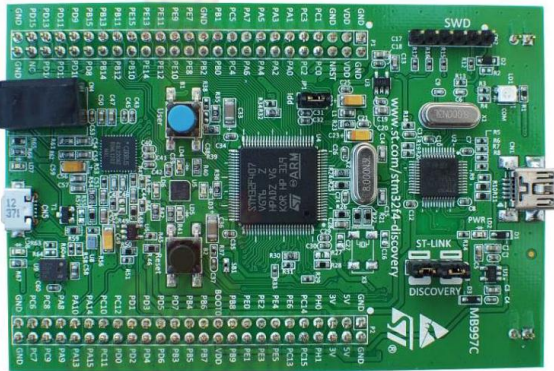


ภาพที่ 45 ชุดทดสอบที่ใช้สำหรับการทดสอบมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

ในแต่ละส่วนดำเนินการออกแบบดังนี้

#### 1. การออกแบบวงจรการทำงานของระบบสมองกล

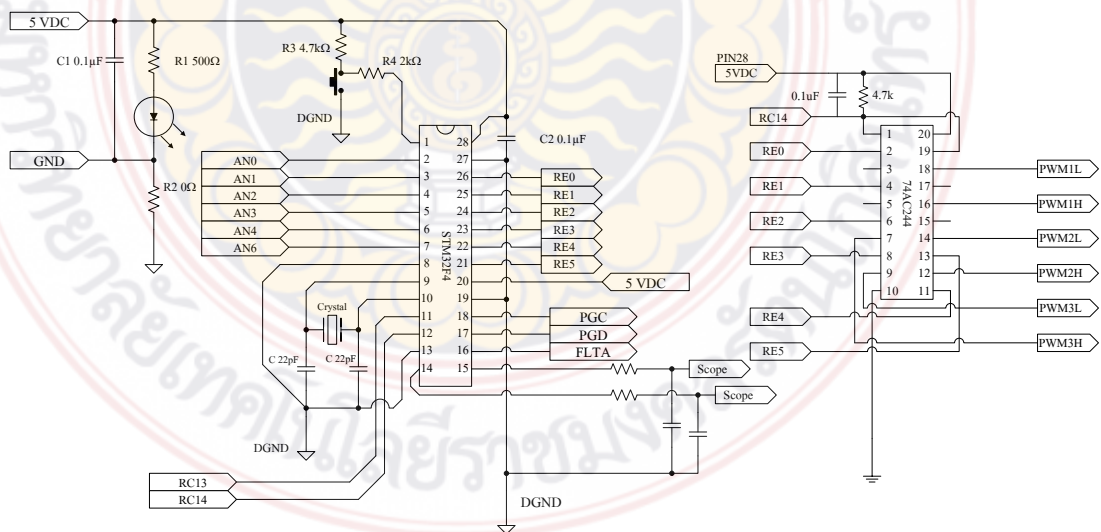
ระบบสมองกลที่นำมาใช้ในการสร้างระบบควบคุมของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นนั้น เป็นชิพตระกูล STM32F4 ของบริษัท ST



ภาพที่ 46 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของชิพเบอร์ STM32F4

จุดเด่นของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลนี้คือ การรวมความสามารถทางด้านควบคุม (MCU) และการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) ทำให้เพิ่มขีดความสามารถในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ สามารถประมวลผลได้สูงถึง 16 บิต และได้เพิ่มเติมความสามารถของโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลให้มีความละเอียดมากขึ้น และมีความเร็วในการสุ่มสัญญาณเพิ่มขึ้น ในขณะที่มีขนาดเล็กและราคาต่ำ และไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 ยังมีโมดูลและคุณสมบัติต่างๆ ที่น่าสนใจ ซึ่งมีความจำเป็นในการนำมาใช้งานในงานวิจัยนี้

เนื่องจากระบบมองกลนั้นเป็นอุปกรณ์ที่มีความไวต่อสัญญาณรบกวนต่างๆ เป็นอย่างมาก ยิ่งในงานควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้น จะมีสัญญาณรบกวนที่มีผลต่อระบบได้จากหลายๆทาง ดังนั้นในการออกแบบวงจรการทำงานนั้นจะต้องมีการป้องกันสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น วงจรการทำงานของ STM32F4 ที่สร้างขึ้นนั้นแสดงดังรูปที่ 3.19

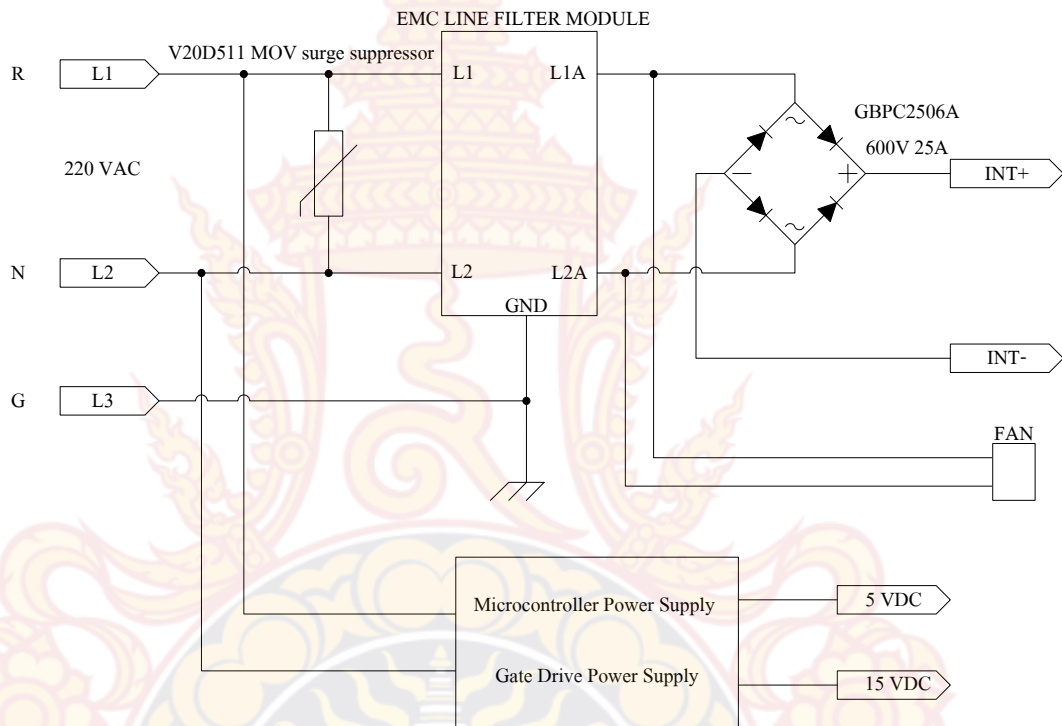


ภาพที่ 47 วงจรการทำงานของ STM32F4 สำหรับการควบคุม PMSM

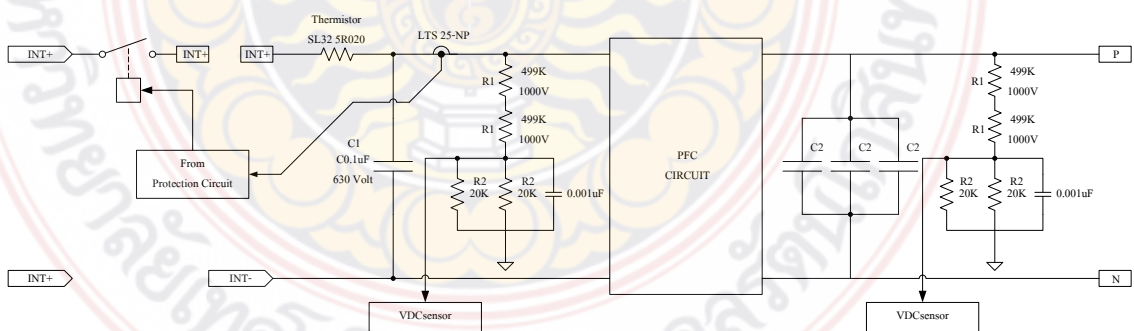


## 2. ระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้า

ระบบแปลงผันพลังงานที่สร้างขึ้นประกอบด้วย 2 ส่วนคือ วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier) และวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส (3-phase Inverter) แสดงภาพ

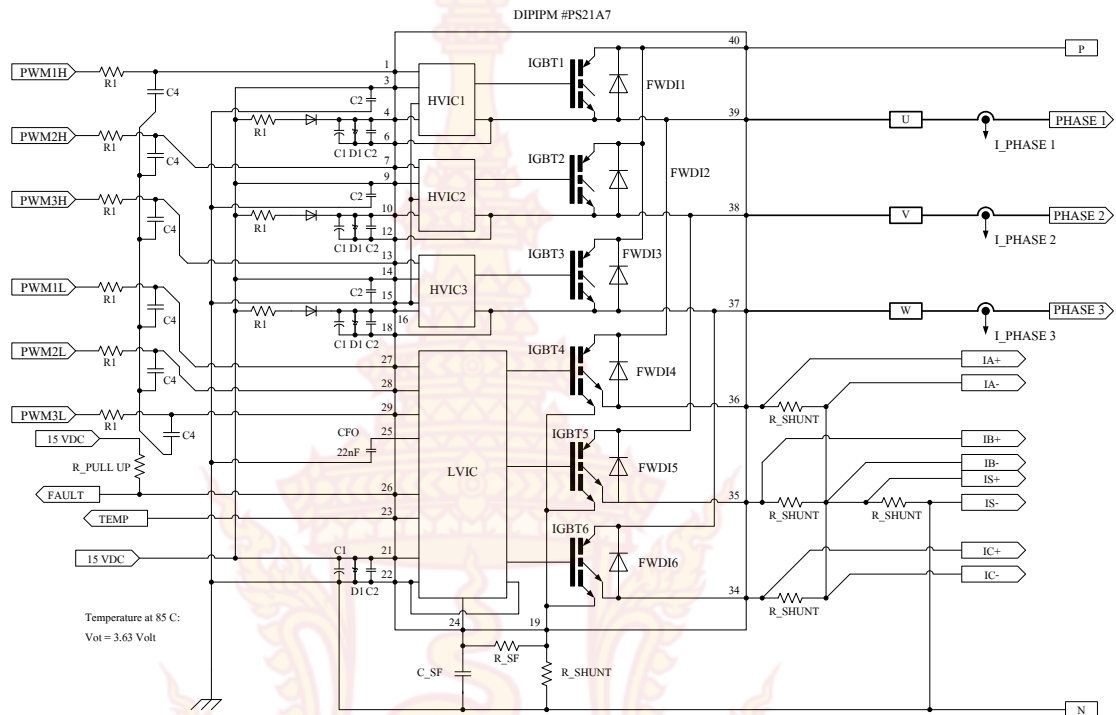


ภาพที่ 48 วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ



ภาพที่ 49 วงจร Inrush Current วงจรกรองแรงดัน (Filter)





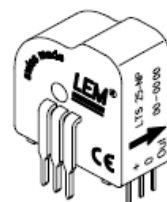
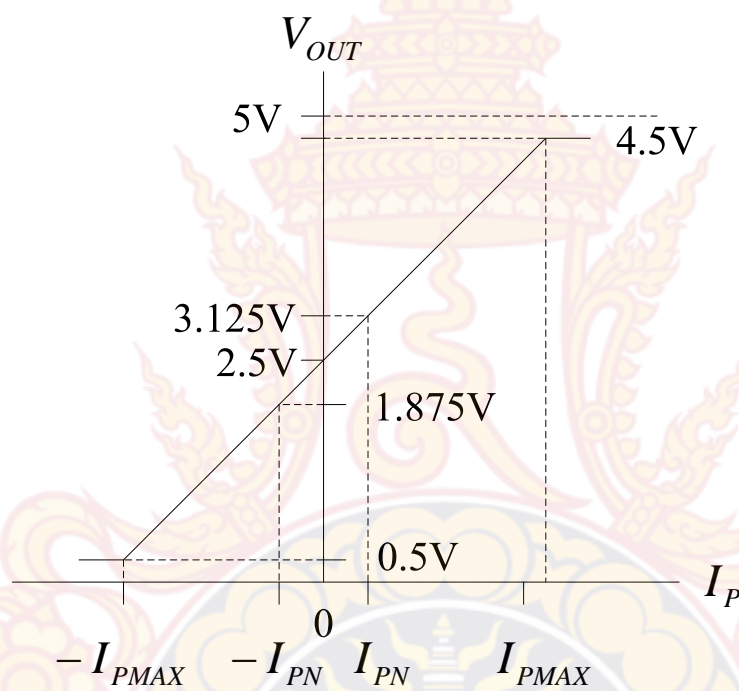
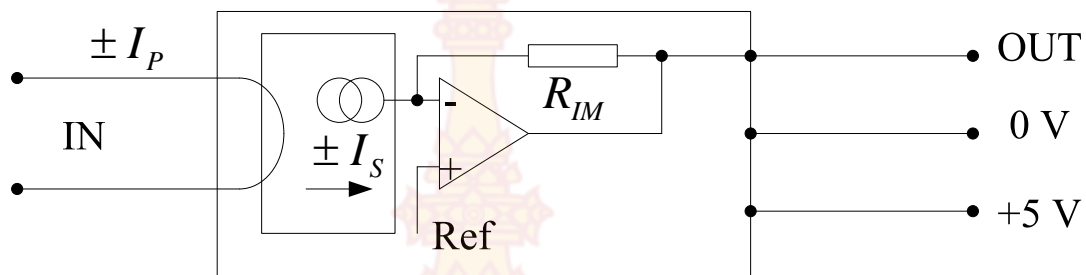
ภาพที่ 50 วงจร 3-phase Inverter

วงจร 3-Phase Inverter นั้นสร้างด้วยโมดูล IGBT ของบริษัท POWEREX เบอร์ DIPIPM #PS21A7A เป็นโมดูลขนาด 600 โวลต์ 75 แอมแปร์

### 3. วงจรตรวจวัดสัญญาณ

#### 3.1 วงจรวัดกระแส

วงจรวัดกระแสนั้นใช้สำหรับการวัดกระแสเฟสในขณะทดลองและป้องกันกระแสเกินที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่วงจร เป็นเซนเซอร์แบบ Hall Effect เบอร์ LTS 25-NP ของ LEM สามารถวัดกระแสได้สูงสุด 25 แอมแปร์ ในการออกแบบวงจรใช้นั้นจะใช้ข้อมูลจาก Data Sheet ของตัวเซนเซอร์ โดยข้อมูลที่จำเป็นในการออกแบบวงจรมันั้น แสดงดังภาพ



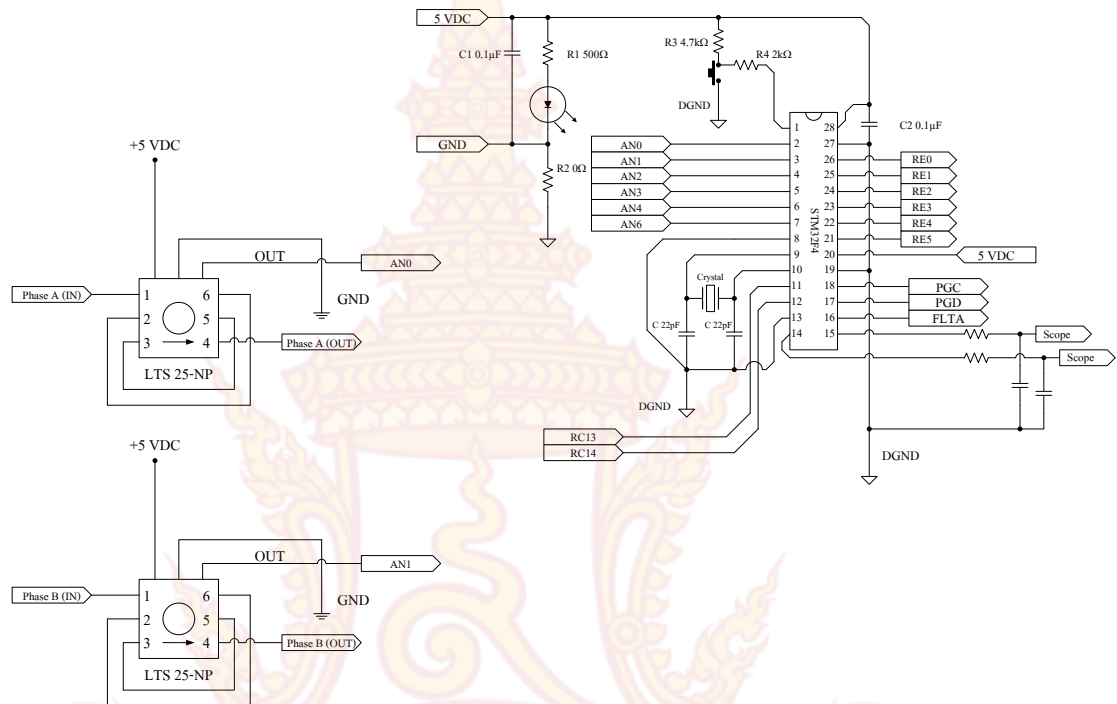
ภาพที่ 51 วงจรใช้ประกอบการสร้างวงจรการใช้งานเซนเซอร์ LTS 25-NP [31]

และสามารถเลือกระดับของการวัดกระแสได้โดยใช้ตารางที่

**ตารางที่ 3** ข้อมูลสำหรับการเลือกใช้เซนเซอร์กระแส LTS 25-NP

Number of primary turn	Primary nominal r.m.s. current	Nominal output voltage	Primary resistance	Primary Insertion inductance	Recommended connection
1	$\pm 25$	$2.5 \pm 0.600$	0.18	0.013	
2	$\pm 12$	$2.5 \pm 0.600$	0.81	0.05	
3	$\pm 8$	$2.5 \pm 0.600$	1.62	0.12	

วงจรการใช้งานระหว่าง LTS 25-NP ร่วมกับ dsPIC30F2010 นั้นแสดงดังภาพ

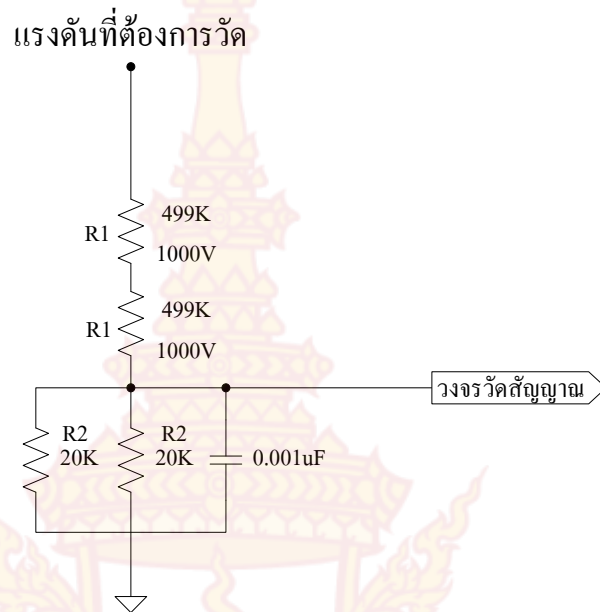


ภาพที่ 52 วงจรการใช้งาน LTS 25-NP ร่วมกับ STM32F4

### 3.2 วงจรการวัดแรงดัน

วงจรการวัดแรงดันนั้นใช้สำหรับวัดแรงดันเกินขณะที่มอเตอร์เกิดการเบรก เนื่องจากเมื่อเกิดการเบรกของมอเตอร์นั้นจะมีแรงดันกระแสดร่งในบัสสูงขึ้น จะส่งผลให้วงจรกรองกระแสเกิดความเสียหายได้ วงจรการวัดแรงดันที่สร้างขึ้นใช้หลักการแบ่งแรงดัน ดังภาพ

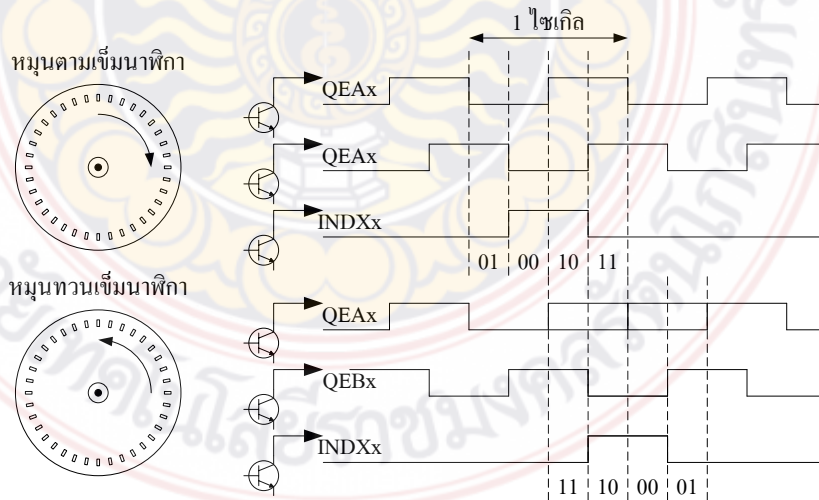




ภาพที่ 53 วงจรวัดแรงดัน

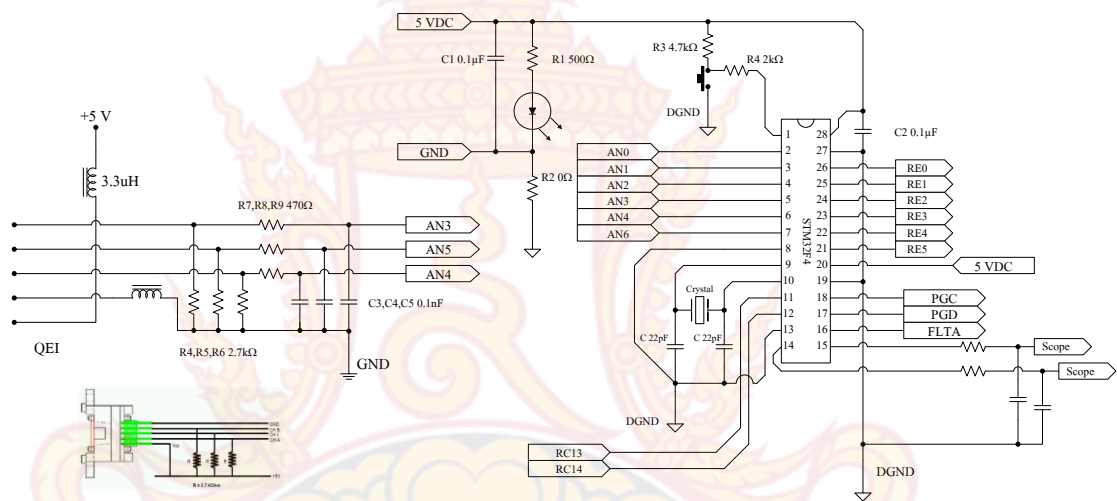
### 3.3 วงจรเซนเซอร์วัดความเร็ว

ในการสร้างระบบการขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบวงปิดนั้นจำเป็นต้องมีการวัดค่าความเร็ว เพื่อใช้เป็นตัวอ้างอิงในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ โมดูล QEI ย่อมาจาก Quadrature Encoder Interface หรือโมดูลเชื่อมต่อตัวเข้ารหัสแบบควอดราเจอร์ วงจรเข้ารหัสแบบควอดราเจอร์ จะให้ผลของสัญญาณ 2 เฟสคือ เฟส A และ B โดยสัญญาณทั้งสองจะมาเฟสต่างกัน 90 องศา ดังแสดงในภาพ



ภาพที่ 54 สัญญาณที่ได้จาก Quadrature Encoder Interface

โมดูล QEI ของ STM32F4 นั้นได้รับการออกแบบมาให้สามารถเชื่อมต่อกับตัวเข้ารหัสแบบอินครีเมนตัล โดยภายในโมดูลประกอบด้วยตัวถอดรหัสควอดราเจอร์เพื่อแปลงหรือตีความของสัญญาณเฟส A, B และทิศทางของตัวนับขึ้น-ลงเป็นค่าของการนับ เพื่อใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งและความเร็วในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ นอกจากนี้ยังมีวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลเพื่อขจัดสัญญาณรบกวนที่อาจปะปนเข้ามาทางอินพุต วงจรการใช้งาน Encoder ร่วมกับ STM32F4 แสดงดังภาพ



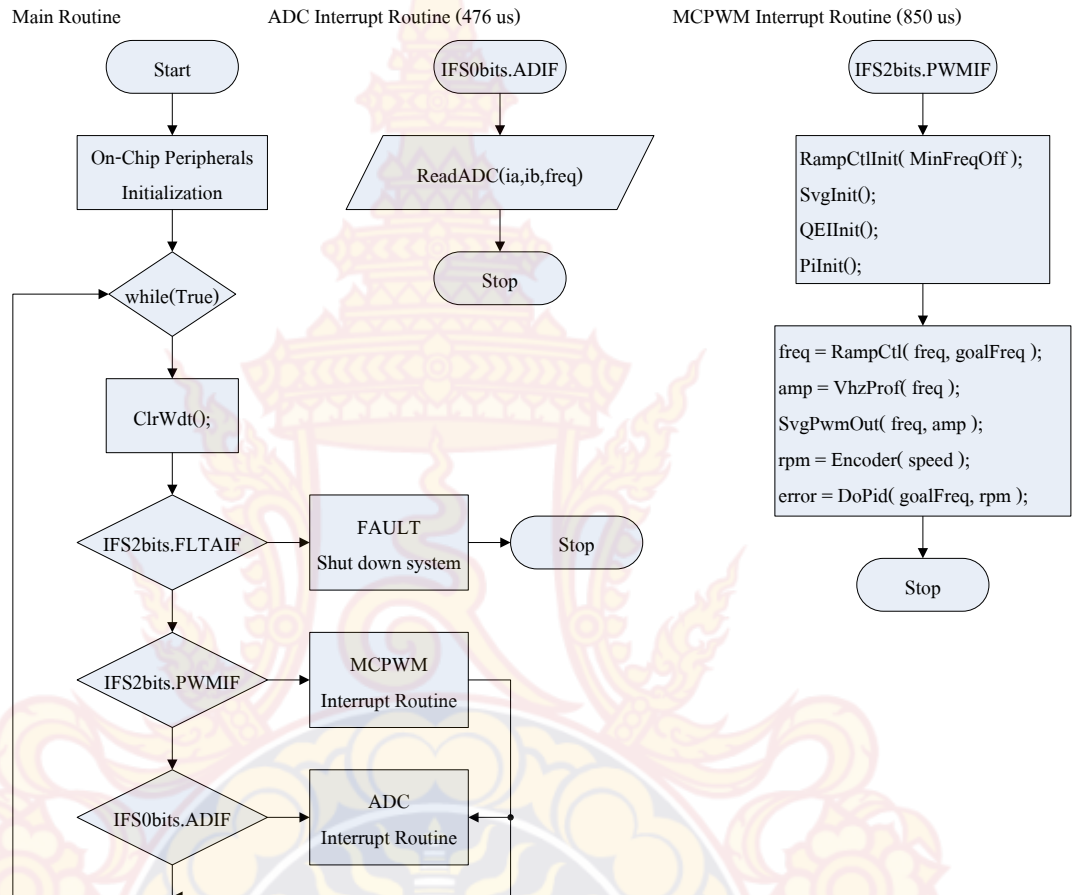
ภาพที่ 55 การเชื่อมต่อ Encoder เบอร์ AEDB-9140-A13 กับ STM32F4 [31]

### 3.4 การออกแบบซอฟต์แวร์

โปรแกรมควบคุมการทำงานที่ทำการเขียนขึ้นนั้น เขียนโดยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยทำการแบ่งไฟล์โปรแกรมออกดังนี้

- ไฟล์โปรแกรมหลัก (Main.c)
- ไฟล์โปรแกรมอ่านค่าจากโมดูลแปลงสัญญาณ ADC (read\_adc.s)
- ไฟล์โปรแกรม Ramp Control (ramp\_ctl.s)
- ไฟล์โปรแกรมกำเนิดสัญญาณ SVPWM (svg\_pwm.s)
- ไฟล์โปรแกรม V/F Control (vfh\_prof.s)
- ไฟล์โปรแกรมระบบควบคุมแบบพีไอ (pi.s)

ซึ่งการทำงานของโปรแกรมแสดงเป็นโพล์ชาร์ตได้ดังภาพ

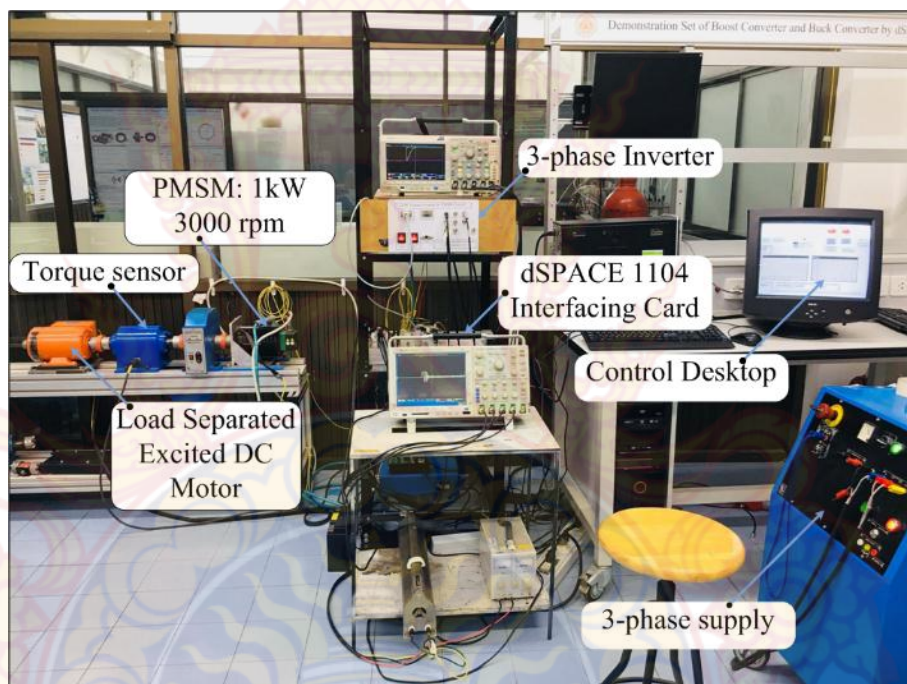


ภาพที่ 56 โพล์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรม

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ที่ใช้ในการดำเนินการในงานวิจัยนี้ สำหรับชุดทดลองที่สร้างขึ้นสำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพที่ระบบที่สร้างขึ้นจะมีโครงสร้างของระบบดังภาพที่ 56



ภาพที่ 57 ชุดฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัย

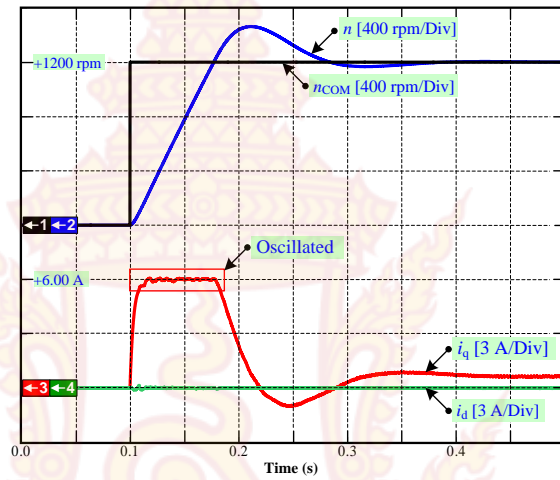
1. เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ
  - 1.1 ออสซิลโลสโคป Tektronix TDS2014B
  - 1.2 โวลต์มิเตอร์ Fluke 867B
  - 1.3 Tektronix A622 AC/DC Current probe

จากการดำเนินการออกแบบแบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร จากสมการที่เกี่ยวข้อง และทำการออกแบบตัวควบคุมสำหรับการควบคุมกระแสหรือแรงบิดของมอเตอร์ การออกแบบตัวควบคุมสำหรับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ และทำการจำลองการทำงานบน

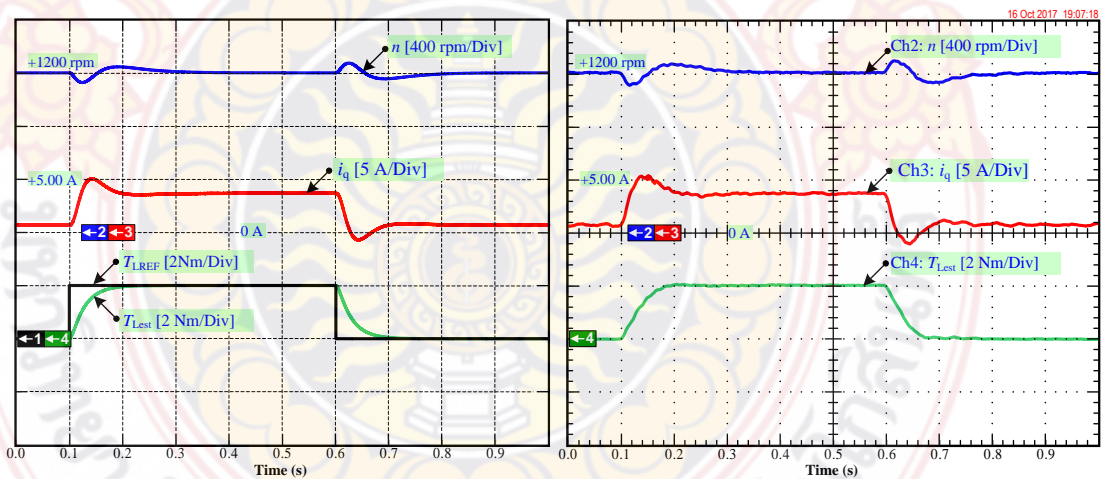


โปรแกรม Matlab/Simulink ในบทนี้เป็นการแสดงผลการทดลองจริงของการควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

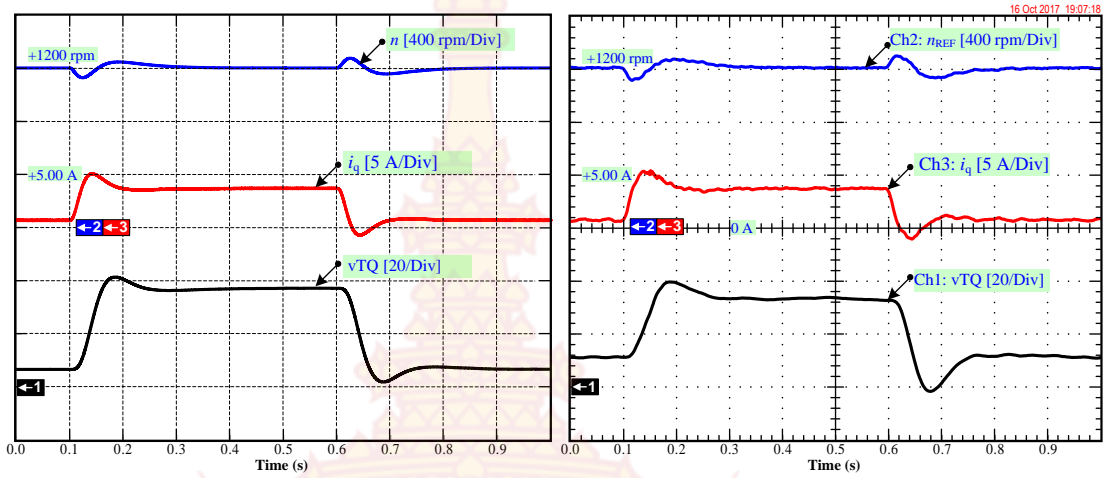
## 2. ผลการทดลอง



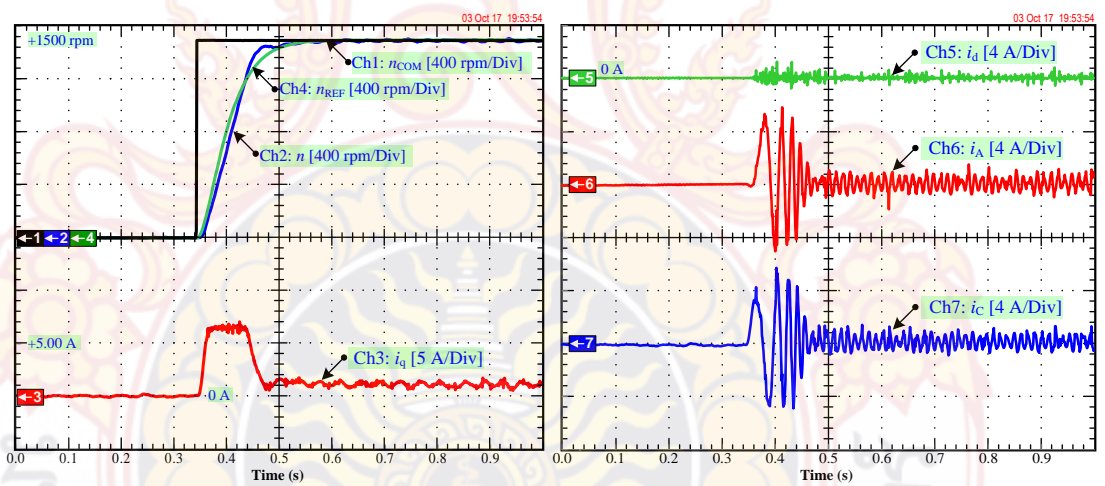
ภาพที่ 58 ผลการจำลองการทำงานของ PMSM เมื่อควบคุมด้วยวิธีการ FOC



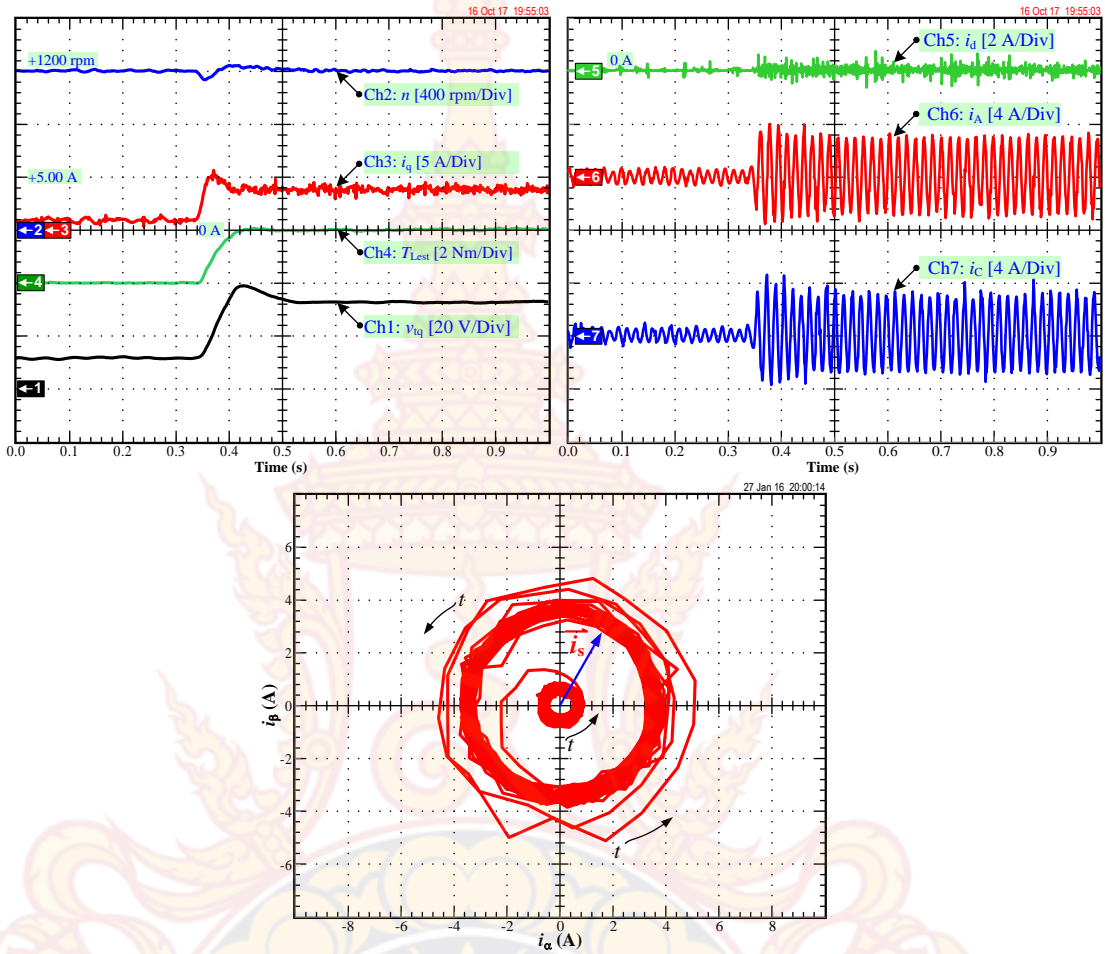
ภาพที่ 59 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดลองจริงเมื่อทำการสแตปโหลด 2 นิวตันเมตร เพื่อดูผลตอบสนองของกระแส  $i_q$  และ ผลตอบสนองต่อแรงบิด  $T_L$



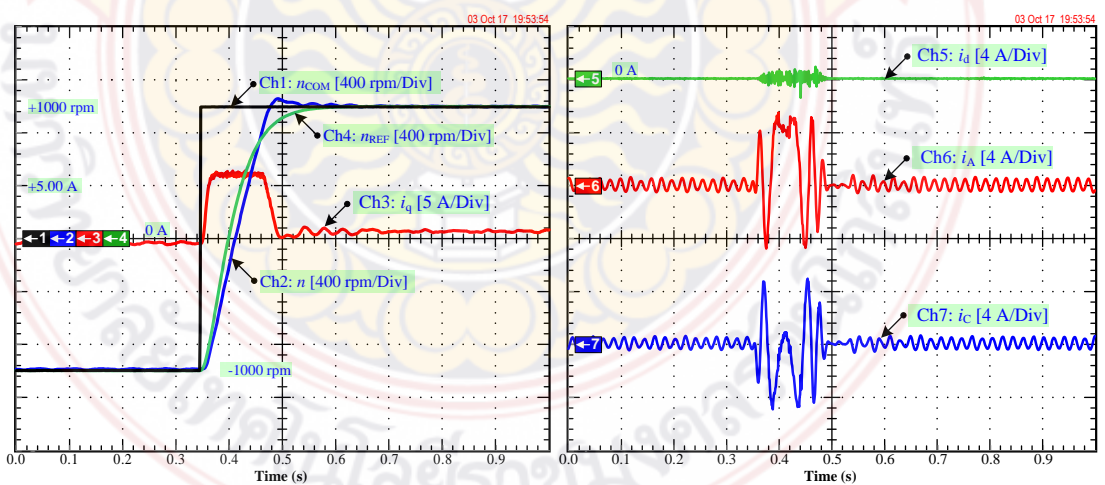
ภาพที่ 60 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดลองจริงเมื่อทำการสลับโพลด์ 2 นิวตันเมตร เพื่อดูผลตอบสนองของกระแส  $i_q$  และ ผลตอบสนองต่อแรงบิด  $v_{TQ}$



ภาพที่ 61 ผลการทดลองการเร่งความเร็วจาก 0 ถึง 1500 รอบต่อนาที



ภาพที่ 62 ผลการทดลองเพื่อดูผลตอบสนองของ PMSM เมื่อสลับโวลตขนาด 2 นิวตันเมตร



ภาพที่ 63 ผลการทดลองเมื่อทำการกลับทางหมุนมอเตอร์จาก -1000 รอบต่อนาทีไป +1000 รอบต่อนาที

## 2.1 ผลการจำลองการทำงานของ PMSM เมื่อควบคุมด้วยวิธีการ FOC

แรกเริ่มดังแสดงในภาพที่ 57 ผลการจำลองการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Motor: PMSM) โดยการใช้กลยุทธ์การควบคุมด้วยวิธีการ Field Oriented Control: FOC ถูกแสดง เพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบการควบคุม PMSM ถูกออกแบบมานั้นสามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้ตามที่ต้องการ และมอเตอร์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากภาพที่ 62 จะเห็นว่าเมื่อกำหนดค่าความเร็วคำสั่ง (Speed command:  $n_{COM}^*$ ) จาก 0-1200 รอบต่อนาทีอย่างทันทีทันใด ความเร็วของมอเตอร์ที่วัดได้ (Speed Measurement:  $n$ ) สามารถตามความเร็วอ้างอิงได้และเข้าสู่สภาวะคงตัวภายในเวลาประมาณ 0.35 วินาที และเท่ากับความเร็วอ้างอิงเกือบ 100 % ในขณะที่กระแส  $i_q$  สามารถถูกจำกัดไว้ที่ 6 แอมแปร์ ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดไว้ในตัวควบคุมกระแสจากนั้นกระแส  $i_q$  ลดลงและเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่าๆ หนึ่งอันเนื่องมาจากค่าพารามิเตอร์  $B$  และ  $i_d$  ก็สามารถถูกควบคุมไว้เท่า 0

## 2.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดลองจริงเมื่อทำการสแตปโหลด 2 นิวตันเมตร เพื่อดูผลตอบสนองของกระแส $i_q$ และ ผลตอบสนองต่อแรงบิด $T_L$ และแรงดันตกคร่อมอินเวอร์เตอร์และชดลวดแทนด้วย $v_{TQ}$

ภาพที่ 58 (a) และ (b) แสดงผลการจำลองและการทดลองการทำงานตามลำดับของการสแตปโหลดขนาด 2 นิวตันเมตรแบบทันทีทันใด จะเห็นได้ว่าผลการจำลองและการทดลองจริงทั้งคู่เหมือนกัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อ PMSM ถูกรบกวนโดยแรงบิดจากโหลดอย่างทันทีทันใดจาก 0 ถึง 2 นิวตันเมตร ตัวควบคุมสามารถที่จะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงนั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต่อมาในภาพที่ 59 (a) และ (b) แสดงผลการจำลองและการทดลองการทำงานตามลำดับ ของการสแตปโหลดขนาด 2 นิวตันเมตรแบบทันทีทันใด จะเห็นได้ว่าผลการจำลองการทำงานและการทดลองจริงเหมือนกัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อ PMSM ถูกรบกวนด้วยแรงบิดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลด ระบบควบคุมสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงนั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการประมาณการค่าพารามิเตอร์  $v_{TQ}$  สามารถทำได้อย่างถูกต้อง

## 2.3 ผลการทดลองการเร่งความเร็วจาก 0 ถึง 1500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 60 แสดงผลการทดลองจริงของการเร่งความเร็วจาก 0-1500 รอบต่อนาที ที่ขณะไม่มีโหลดใดๆ มันสำคัญที่จะแน่ใจว่าความเร็วที่วัดได้ (Speed Measurement:  $n$ ) ของมอเตอร์ติดตามความเร็วอ้างอิง (Speed command:  $n_{COM}^*$ ) ในช่วงการเร่งความเร็ว และกระแส  $i_q$  จะขึ้นไปถึงความเร็วที่มอเตอร์สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย ( $i_{qmax} = +6$  A) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า PMSM ทำงานในเวลาอันสั้นจาก 0-1500 รอบต่อนาที เนื่องมาจากการออกแบบตัวควบคุมได้อย่างมี



ประสิทธิภาพ และกระแส  $i_q$  ลดลงจนถึงค่าหนึ่งที่เหมาะสมกับค่าแรงเสียดทานอันเนื่องมาจากค่าพารามิเตอร์  $B$

#### 2.4 ผลผลการทดลองเพื่อดูผลตอบสนองของ PMSM เมื่อสเตปโหลดขนาด 2 นิวตันเมตร

ภาพที่ 61 คือผลการทดลองเพื่อดูผลตอบสนองของทั้งระบบ เมื่อ PMSM ถูกรบกวนจากโหลดขนาด 2 นิวตันเมตรอย่างทันทีทันใด สัญญาณรูปคลื่นในสโคปแสดงค่าต่อไปนี้ speed measurement  $n$ , q-axis current  $i_q$ , d-axis current  $i_d$ , estimated torque load  $T_{Lest}$ ,  $v_{TQ}$ , phase currents  $i_A$ ,  $i_C$ , and trajectories of the transient stator current vector ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมที่ทำการออกแบบมีเสถียรภาพที่ดีและให้ผลตอบสนองของความเร็วในระยะเวลาที่เหมาะสม

#### 2.5 ผลการทดลองเมื่อทำการกลับทางหมุนมอเตอร์จาก -1000 รอบต่อนาทีไป +1000 รอบต่อ นาที

ภาพที่ 62 คือผลการทดลองของผลตอบสนองความเร็วเมื่อ PMSM กลับทางหมุน ซึ่งมอเตอร์ถูกกลับทางหมุนจาก -1000 รอบต่อนาทีไปสู่ +1000 รอบต่อนาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วมอเตอร์ที่วัดได้สามารถติดตามความเร็วอ้างอิงได้เกือบ 100 % และกระแสของมอเตอร์ไม่เกินค่าพิกัดที่กำหนดไว้ในระบบควบคุม ( $i_{qmax} = 6A$ )

### 3. สรุปผลการดำเนินการ

ผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวถึงแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร โดยวิธีการควบคุมแบบ Field Oriented Control (FOC) และการออกแบบตัวควบคุมสำหรับลูปกระแสแบบพีโอรวมถึงการออกแบบตัวควบคุมแบบพีโอสำหรับลูปการควบคุมความเร็ว สามารถการันตีเสถียรภาพของระบบว่าสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## บทที่ 5

### สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

#### 1. สรุปผลการทดลอง

สำหรับงานวิจัยเรื่อง พัฒนาคอนโทรลเลอร์แบบสเปซเวกเตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรโดยใช้ STM32F4 เป็นตัวประมวลผล ได้ทำการศึกษาและออกแบบสร้างแบบจำลองของมอเตอร์ การออกแบบระบบควบคุมแบบ Field Oriented Control (FOC) ทำการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับลูปควบคุมกระแส ( $i_q, i_d$ ) และลูปความเร็ว ( $n$ ) รวมถึงการออกแบบระบบคอนโทรลเลอร์แบบสเปซเวกเตอร์สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร โดยใช้ STM32F4 เป็นตัวประมวลผล

ผลการวิจัยที่ได้คือ

1. วิธีการสร้างแบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรจากสมการที่วิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีทางไฟฟ้าและทางกล การสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรมที่เป็นที่ยอมรับคือโปรแกรม Matlab/Simulink

2. ขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์โดยวิธีการแบบ Field Oriented Control (FOC) ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) สำหรับลูปการควบคุมกระแส ( $i_q, i_d$ ) และลูปการควบคุมความเร็ว ( $n$ ) นำไปสู่การจำลองการทำงานเบื้องต้นบนคอมพิวเตอร์โดยโปรแกรม Matlab/Simulink ซึ่งกระบวนการทั้งหมดที่นำเสนอนี้เป็นวิธีการที่วิศวกรหรือผู้ออกแบบจะต้องดำเนินการจนได้ผลที่ถูกต้อง ก่อนการสร้างชิ้นงานจริง ซึ่งสามารถลดขั้นตอนการทำงานและลดความผิดพลาดจนส่งผลให้เกิดความเสียหาย เนื่องจากการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่เป็นอันตราย หากการดำเนินการไม่ทำตามขั้นตอนที่กล่าวมา วิศวกรหรือผู้ออกแบบมีความเสี่ยงต่อชีวิตในการดำเนินการดังกล่าว

ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานที่กล่าวถึงในงานวิจัย เป็นการออกแบบที่เหมาะสมเนื่องจากเลือกอุปกรณ์นั้นอ้างอิงจากการจำลองการทำงานของมอเตอร์ ส่งผลให้ลดค่าใช้จ่ายในการใช้อุปกรณ์ลง

ทั้งหมดที่กล่าวมาเกิดจากการดำเนินโครงการวิจัยนี้ นักศึกษาหรือผู้ที่สนใจสามารถใช้วิธีการที่ผู้วิจัยได้กล่าวไว้ใน การออกแบบระบบควบคุมสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร หรือมอเตอร์เหนี่ยวนำได้เช่นเดียวกัน

## 2. ข้อเสนอแนะ

ในการควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ในปัจจุบันนี้มีหลากหลายวิธีการเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น แต่วิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นวิธีการที่นิยมใช้เพื่อการควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร หรืออินดักชันมอเตอร์ ในโอกาสต่อไปผู้วิจัยจะนำเสนอวิธีการควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธีการที่แตกต่างจากวิธีการนี้ เพื่อเปรียบเทียบและเป็นข้อมูลสำหรับนักศึกษาและผู้ที่สนใจต่อไป



## บรรณานุกรม

1. Merzoug and Benalla, "Nonlinear Backstepping Control of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)", Department of Electrical Engineering, University of Mentouri Constantine. Algier 2010.
2. Song Chi, "Position-sensorless control of permanent magnet synchronous machines over wide speed range". Thesis for the degree of Doctor, Department of Electrical and Computer Engineering, Ohio State University.
3. Victor R. Stefanovic, "Trends in AC Drive Applications," [4] Russel J. Kerkman, Gary L. Skibinski and David W. Schlegel, "AC Drives: Year 2000 (Y2K) and Beyond", Rockwell Automation, Standard Drives Division, 1999.
4. F. Heydari, A. Sheikholeslami, K. G. Firouzjah and S. Lesan. "Predictive Field-Oriented Control of PMSM with Space Vector Modulation Technique". Front. Electr. Electron. Eng. China, 2010.
5. Jorge Zambada, Microchip Corporation, "Sensorless Field Oriented Control of PMSM Motors". Microchip Technology Inc., 2007.
6. Lennart Harnefors, "Control of Variable-Speed Drives", Applied signal processing and control, department of electronics, Mälardalen University, September 2002.
7. Sylvain Lechat Sanjuan, "Voltage Oriented Control of Three-Phase Boost PWM Converters", Master of Science Thesis in Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2010.
8. Saeid Haghbin, "An Isolated Integrated Charger for Electric or Plug-in Hybrid Vehicles" thesis for the degree of licentiate of engineering. Chalmers University of Technology, department of Energy and Environment, division of Electric Power Engineering. Göteborg, Sweden, 2011.
9. Kristoffer Berntsson, "Four Phase Switch-Mode Inverter, Construction and Evaluation", Master of Science Thesis in Chalmers University of Thechnology, department of Energy and Environment, division of Electric Power Engineering. Göteborg, Sweden, 2010.
10. C. C. Chan, "The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles", Proceedings of the IEEE, Vol. 90, No. 2, February 2002.



## บรรณานุกรม (ต่อ)

11. Saeid Haghbin, Sonja Lundmark, Ola Carlson and Mats Alaküla, “A Combined Motor/Drive/Battery Charger Based on a Split-Windings PMSM”, Chalmers University of Technology, department of Energy and Environment, division of Electric Power Engineering. Göteborg, Sweden, 2011
12. Pragasen Pillay and Ramu Krishnan, “Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless dc Motors for Servo Drives”, IEEE Transactions of Industry Applications, Vol. 27, No. 5, September/October 1991.
13. M. S. Merzoug and F. Naceri, “Comparison of Field-Oriented Control and Direct Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)”, World Academy of Science, Engineering and Technology 45, 2008.
14. ปฏิพัทธ์ ทวนทอง, พนาฤทธิ์ เศรษฐกุล. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2543
15. นายกิตติพงษ์ สอนดี, รองศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ นุ่นงาม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2553
16. นายพงษ์ศักดิ์ นันทนพิบูล, รองศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ นุ่นงาม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549
17. นายปกรณ์ โชตติยานนท์, ผศ.ดร.สาคร โพธิ์งาม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2558

## ประวัติผู้วิจัย

1. หัวหน้าโครงการวิจัย นายพงศักดิ์ มัคโซ
2. ตำแหน่งปัจจุบัน เจ้าพนักงานวิทยาศาสตร์

### 3. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี  
มทร.รัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล  
กม. 242 ถ.เพชรเกษม ต.หนองแก อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์  
โทรศัพท์ที่ทำงาน: 032-618500 ต่อ 4740  
โทรศัพท์มือถือ : 083-7157377  
โทรสาร : 032-618570  
e-mail : Pongsak-Mk@hotmail.com

### 4. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	ชื่อย่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา	ประเทศ
2552	ป.ตรี	อศ.บ.	เทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า	มทร.รัตนโกสินทร์	ไทย

### 5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

- Machines
- Refrigeration
- Power electric

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : ชื่อแผนงานวิจัย

- ไม่มี

หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย

- ไม่มี

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน (อาจมากกว่า 1 เรื่อง)

- ไม่มี

งานวิจัยที่กำลังทำ : ชื่อข้อเสนอการวิจัย แหล่งทุน และสถานภาพในการทำวิจัยว่าได้ทำการวิจัย  
ลุล่วงแล้วประมาณร้อยละเท่าใด

- ไม่มี

**ประวัติการทำวิจัยจากทุนอุดหนุนวิจัยของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี**

**ย้อนหลัง 3 ปี**

1. ปี 2560 มีโครงการวิจัยที่ได้รับสนับสนุน จำนวน - โครงการ

สถานะของโครงการวิจัย

- |   |                 |
|---|-----------------|
| <input type="checkbox"/> เสร็จสิ้นแล้วและส่งเล่มรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เรียบร้อยแล้ว | จำนวน - โครงการ |
| <input type="checkbox"/> ส่งร่างรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์แล้ว                          | จำนวน - โครงการ |
| <input type="checkbox"/> อยู่ระหว่างดำเนินการวิจัย                                  | จำนวน - โครงการ |
| <input type="checkbox"/> ค้างส่งโครงการวิจัย  | จำนวน - โครงการ |
| <input type="checkbox"/> การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน-ขยายผลต่อสาธารณชน                   | จำนวน - โครงการ |

2. ปี 2559 มีโครงการวิจัยที่ได้รับสนับสนุน จำนวน - โครงการ

สถานะของโครงการวิจัย

- |   |                 |
|---|-----------------|
| <input type="checkbox"/> เสร็จสิ้นแล้วและส่งเล่มรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เรียบร้อยแล้ว | จำนวน - โครงการ |
| <input type="checkbox"/> ส่งร่างรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์แล้ว                          | จำนวน - โครงการ |
| <input type="checkbox"/> อยู่ระหว่างดำเนินการวิจัย                                  | จำนวน - โครงการ |
| <input type="checkbox"/> ค้างส่งโครงการวิจัย  | จำนวน - โครงการ |
| <input type="checkbox"/> การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน-ขยายผลต่อสาธารณชน                   | จำนวน - โครงการ |

3. ปี 2558 มีโครงการวิจัยที่ได้รับสนับสนุน จำนวน - โครงการ

สถานะของโครงการวิจัย

- |   |                 |
|---|-----------------|
| <input type="checkbox"/> เสร็จสิ้นแล้วและส่งเล่มรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เรียบร้อยแล้ว | จำนวน - โครงการ |
| <input type="checkbox"/> ส่งร่างรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์แล้ว                          | จำนวน - โครงการ |
| <input type="checkbox"/> อยู่ระหว่างดำเนินการวิจัย                                  | จำนวน - โครงการ |

ค้างส่งโครงการวิจัย

จำนวน – โครงการ

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน-ขยายผลต่อสาธารณชน

จำนวน - โครงการ

**หมายเหตุ:**1.ระบุข้อมูลโดยละเอียดในแต่ละหัวข้ออย่างถูกต้องและครบถ้วนสมบูรณ์เพื่อ  
ประโยชน์ในการประเมินผล

2.ระยะเวลาในการทำวิจัย ไม่เกิน 1 ปี และไม่สามารถขอซื้อครุภัณฑ์ได้

**7. ผู้ร่วมวิจัย**

นายณัฐพล แจ้งจดี

**8. ตำแหน่งปัจจุบัน**

อาจารย์

**9. หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก**

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มทร.รัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

กม. 242 ถ.เพชรเกษม ต.หนองแก อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์

โทรศัพท์ที่ทำงาน: 032-618500 ต่อ 4740

โทรศัพท์มือถือ : 081-4567743

โทรสาร : 032-618570

e-mail : nattaponnonburi@gmail.com

**10. ประวัติการศึกษา**

ปีที่จบ การศึกษา	ระดับ ปริญญา	ชื่อย่อ ปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา	ประเทศ
2547	ตรี	อศ.บ.	เทคโนโลยีไฟฟ้า	ส.ราชมงคล วิทยาเขต นนทบุรี	ไทย
2555	โท	วศ.ม.	วิศวกรรมไฟฟ้า	มทร. ธิัญบุรี	ไทย

**11. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ**

- PLC
- Pneumatics and Hydraulics
- Machines
- PV



12. **ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ** โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : ชื่อแผนงานวิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย

การพัฒนาการหาค่าลึงสูญเสียมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส โดยเทคนิคการวัด

อุณหภูมิระบายความร้อน

งานวิจัยที่สำเร็จแล้ว : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน (อาจมากกว่า 1 เรื่อง)

การพัฒนาการหาค่าลึงสูญเสียมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส โดยเทคนิคการวัด

อุณหภูมิระบายความร้อน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12 ENETT 2016

งานวิจัยที่กำลังทำ : ชื่อข้อเสนอการวิจัย แหล่งทุน และสถานภาพในการทำการวิจัยว่าได้ทำการวิจัยลุล่วงแล้วประมาณร้อยละเท่าใด

- ไม่มี

**ประวัติการทำวิจัยจากทุนอุดหนุนวิจัยของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี**

**ย้อนหลัง 3 ปี**

1. ปี 2560 มีโครงการวิจัยที่ได้รับสนับสนุน จำนวน - โครงการ  
สถานะของโครงการวิจัย

เสร็จสิ้นแล้วและส่งเล่มรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เรียบร้อยแล้ว จำนวน - โครงการ

ส่งร่างรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์แล้ว จำนวน - โครงการ

อยู่ระหว่างดำเนินการวิจัย จำนวน - โครงการ

ค้างส่งโครงการวิจัย จำนวน - โครงการ

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน-ขยายผลต่อสาธารณชน จำนวน - โครงการ

2. ปี 2559 มีโครงการวิจัยที่ได้รับสนับสนุน จำนวน - โครงการ  
สถานะของโครงการวิจัย

เสร็จสิ้นแล้วและส่งเล่มรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เรียบร้อยแล้ว จำนวน - โครงการ

ส่งร่างรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์แล้ว จำนวน - โครงการ

- อยู่ระหว่างดำเนินการวิจัย จำนวน – โครงการ
- ค้างส่งโครงการวิจัย จำนวน - โครงการ
- การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน-ขยายผลต่อสาธารณชน จำนวน – โครงการ

3. ปี 2558 มีโครงการวิจัยที่ได้รับสนับสนุน จำนวน - โครงการสถานะของโครงการวิจัย

- เสร็จสิ้นแล้วและส่งเล่มรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เรียบร้อยแล้ว จำนวน – โครงการ
- ส่งร่างรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์แล้ว จำนวน - โครงการ
- อยู่ระหว่างดำเนินการวิจัย จำนวน – โครงการ
- ค้างส่งโครงการวิจัย จำนวน – โครงการ
- การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน-ขยายผลต่อสาธารณชน จำนวน - โครงการ

**หมายเหตุ:** 1.ระบุข้อมูลโดยละเอียดในแต่ละหัวข้ออย่างถูกต้องและครบถ้วนสมบูรณ์เพื่อประโยชน์ในการประเมินผล

2.ระยะเวลาในการทำวิจัย ไม่เกิน 1 ปี และไม่สามารถขอซื้อครุภัณฑ์ได้

13. **ที่ปรึกษางานวิจัย** นายทรงกลด ศรีปรางค์

14. **ตำแหน่งปัจจุบัน** อาจารย์

15. **หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก**

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี  
มทร.รัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

กม. 242 ถ.เพชรเกษม ต.หนองแก อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์

โทรศัพท์ที่ทำงาน: 032-618500 ต่อ 4740

โทรศัพท์มือถือ : 080-9257087

โทรสาร : 032-618570

e-mail : songklod.sriprang@gmail.com

## 16. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	ชื่อย่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา	ประเทศ
2553	โท	วศ.ม	วิศวกรรมไฟฟ้า	มทร. ธัญบุรี	ไทย
2549	ตรี	อส.บ.	เทคโนโลยีไฟฟ้า	มทร. รัตนโกสินทร์	ไทย

## 17. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

- Solar energy
- Microcontroller
- Digital Signal Processing

## 18. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : ชื่อแผนงานวิจัย

- ไม่มี

หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย

- ไม่มี

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน (อาจมากกว่า 1 เรื่อง)

ทรงกลด ศรีปรารงค์, วันชัย ททรัพย์สิงห์, “การออกแบบและประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล dsPIC30xF ในอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6, ENETT6-1191, 2553.

ทรงกลด ศรีปรารงค์, วันชัย ททรัพย์สิงห์, “การดำเนินการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นโดยใช้ dsPIC30F2010” การประชุมวิชาการ “แม่ฟ้าหลวงวิชาการ” ประจำปี พ.ศ. 2553 : 12 ปี ตามรอยสมเด็จพระย่า วันที่ 19-20 พฤศจิกายน 2553

ทรงกลด ศรีปรารงค์, วันชัย ททรัพย์สิงห์, “การปรับค่าเกนของตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมในการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นโดยวิธีกลุ่มอนุภาค” วารสารธัญบุรี ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม - ธันวาคม 2553.

ทรงกลด ศรีปรารงค์, วันชัย ททรัพย์สิงห์, “การออกแบบและสร้างระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบด้านเดียวในรถไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการควบคุมค่าสลิป” การประชุม

วิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 (ENETT 2011), EC48, วันที่ 3-5 พฤษภาคม 2554.

ทรงกลด ศรีปรารงค์, วันชัย ททรัพย์สิงห์, “การออกแบบตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 9 (PEC-9), 132, วันที่ 2-3 พฤษภาคม 2554.

