



การพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีวงจร  
ปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องจักรรีดยางไฟฟ้า

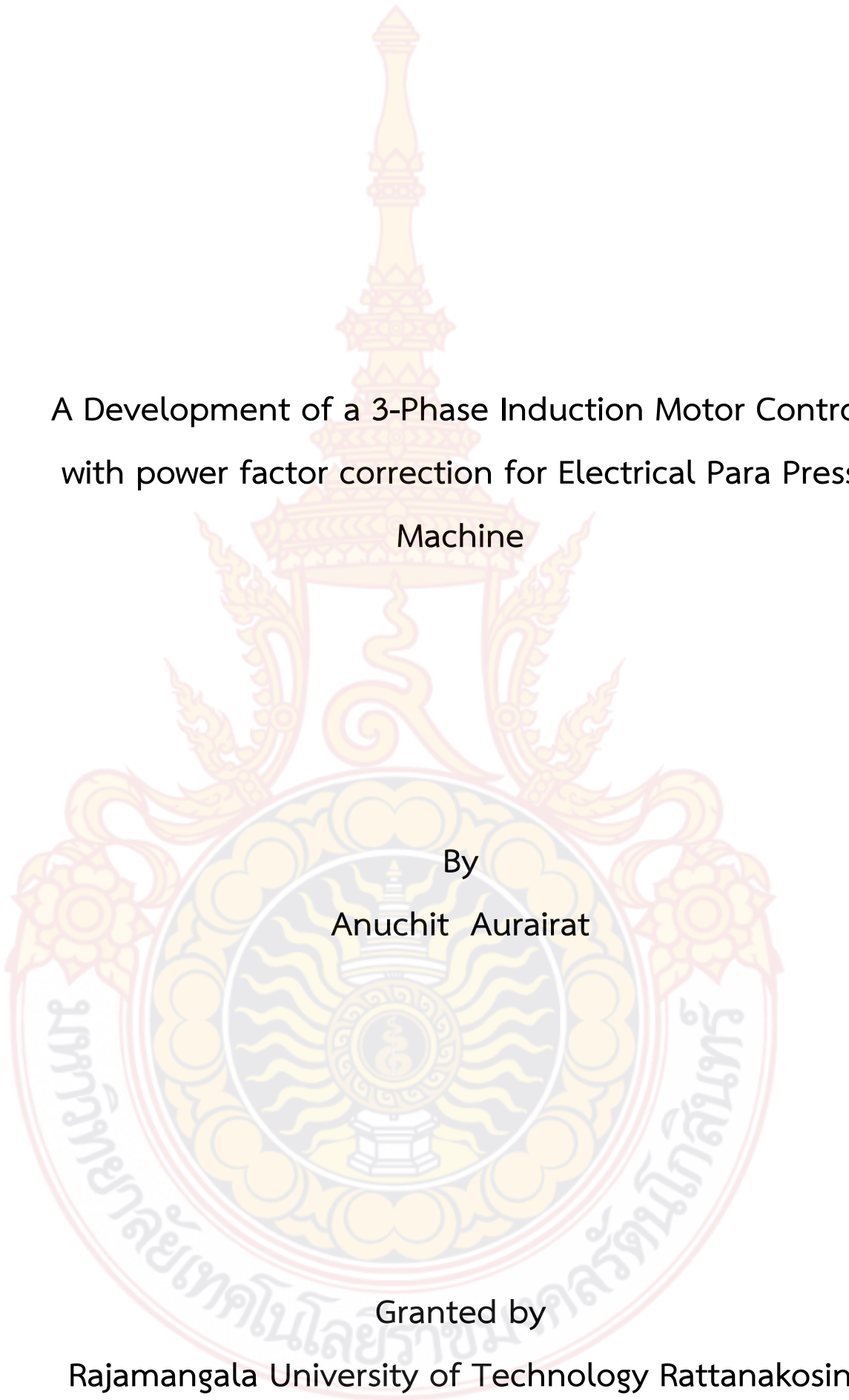
โดย

นายอนุชิต อุไรรัตน์

สนับสนุนงบประมาณโดย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ประจำปีงบประมาณ 2560



A Development of a 3-Phase Induction Motor Control  
with power factor correction for Electrical Para Press  
Machine

By  
Anuchit Aurairat

Granted by  
Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year 2017

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้การสนับสนุนสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัยและขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีที่ให้การสนับสนุนโปรแกรม matlab/simulink ในการทำวิจัยในครั้งนี้จนทำให้งานวิจัยนี้บรรลุผลสำเร็จตามเป้าหมายที่วางไว้

อนุชิต อุไรรัตน์ และคณะ



## บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : เลขที่สัญญาเงินทุน A-92/ 2560

ชื่อโครงการ : การพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีวงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องจักรรีดยางไฟฟ้า

ชื่อนักวิจัย : นายอนุชิต อุไรรัตน์ และ ผ.ศ.เฉลิมพล คล้ายนิล

ยางพารา เป็นพืชเศรษฐกิจที่ทำรายได้ให้แก่เกษตรกร และมีมูลค่าการส่งออกสำหรับประเทศไทยเป็นอันดับ 2 รองจากข้าว ในปัจจุบันแนวโน้มการปลูกยางพารามีมากขึ้น เนื่องจากเป็นพืชที่ให้ผลตอบแทนสูง อายุการเก็บเกี่ยวยาวนาน ค่าในการปลูก และราคาของยางพาราเมื่อแปรรูปแล้วจะมีมูลค่าสูง เกษตรกรจึงให้ความสนใจและปลูกยางพารามากขึ้น

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวความคิดที่จะจัดสร้างระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีวงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องจักรรีดยางไฟฟ้าซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องจักรเพิ่มขึ้นและเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในเรื่องของค่าไฟฟ้าและสามารถลดขนาดของมอเตอร์ลงได้เนื่องจากขนาดของมอเตอร์สามเฟสมีขนาดเล็กกว่ามอเตอร์เฟสเดียวที่พิกัดแรงม้าเท่ากันโดยในกระบวนการออกแบบนั้นนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยการใช้การควบคุมแบบการควบคุมเชิงปริมาณ (V/f) โดยที่ระบบควบคุมมอเตอร์เป็นแบบวงเปิดและระบบควบคุมตัวประกอบกำลัง มีการป้อนกลับ กระแส และแรงดันไฟฟ้าของอินพุตตัวควบคุมที่ใช้เป็นแบบพีไอ

ชุดควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นได้ ผลการทดสอบชุดควบคุมที่ใช้ระบบสมองกลเป็นตัวควบคุมในระบบต้นแบบสามารถใช้ในการควบคุมความเร็ว แรงบิด และตัวประกอบกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ตามที่ต้องการ

คำสำคัญ : การควบคุมเชิงปริมาณ ระบบควบคุมแบบวงเปิด

E-mail Address : anuchit.aur@rmutr.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 1 กุมภาพันธ์ 2559 – 30 กันยายน 2559

## Abstract

**Code of project :** A-92/ 2560

**Project name :** Development of a 3-Phase Induction Motor Control with power factor correction for Electrical Para Press Machine

**Researcher name :** Mr.Anuchit Aurairatch and Asst Prof.Chalermopol Klaynil

A rubber is an economic crop that generates income for agriculture. For Thailand, it has the second largest export value after rice. At present, the trend of growing rubber. It is a high yielding plant. The longevity planting value and the price of rubber when processed will be high. The farmers are interested in growing rubber.

This paper presents the concept of a three-phase induction motor system with a power factor correction circuit for the electrical Para press machine, which improves machine efficiency and cost savings. The size of the three-phase motor is smaller than the single-phase motor at the same power. As well as in the design process, the present system of induction motor speed control using V/f control. The control system of motor is open loop. The current and voltage of the input are fed back. The PID is used to control power factor.

The results of the research, that the controller can be used to control the speed of the induction motors. The test results of the control system using the brain system as a control system in the prototype system can be used to control the torque speed and power factor of the induction motor as required.

**Keywords:** converter, V/f control, open loop control

---

**E-mail Address :** anuchit.aur@rmutr.ac.th

**Period of project :** 1 February 2016 – 30 October 2016

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
บทที่	
1. บทนำ	1
1 ที่มาและความสำคัญ	1
2 วัตถุประสงค์	5
3 แนวคิดของงานวิจัย	5
4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	5
5 ขอบเขตของงานวิจัย	6
2. ทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
1 การควบคุมตัวประกอบกำลัง	7
2 มอเตอร์เหนี่ยวนำและการควบคุม	12
3. ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	39
1 ส่วนประกอบทั้งหมดของระบบที่ดำเนินการ	39
2 การออกแบบระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวงปิด	40
3 การออกแบบซอฟต์แวร์	46
4 เครื่องจักรรีดียงไฟฟ้าและระบบควบคุม	47
4. ผลการทดสอบ	49
1 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	49
2 ผลการทดสอบความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์	50
3 ผลการทดลองการสร้างสัญญาณ SPWM โดย STM32F4	62
4 ผลการทดสอบและจำลองเมื่อมีการควบคุมตัวประกอบกำลัง	67
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	70
1 สรุปผลการวิจัย	70
2 สรุปผลการทดสอบ	70
3 ข้อเสนอแนะ	71

## สารบัญ (ต่อ)

เอกสารอ้างอิง

72

ประวัติผู้เขียน

73



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1 สถิติราคาขายพาราตั้งแต่ปี 2554 ถึง 2558	2
2 ความแตกต่างระหว่างราคาขายแผ่นดิบ (ราคาประมูล) เศษยาง และน้ำยางสด	3
3 กระบวนการรีดยางพารา	3
4 เครื่องรีดยางพาราขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า	4
5 ส่วนประกอบของระบบทั้งหมด	5
6 รูปคลื่นกระแสล้าหลังแรงดันเป็นมุม 90 องศา เมื่อโหลดเป็นอินดักเตอร์ (L)	7
7 เปรียบเทียบกำลังงานที่ใช้ในการลากรถของม៉ากับกำลังงานทางไฟฟ้า	8
8 รูปคลื่นและแรงดันไฟฟ้าที่ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (p.f.) ต่างๆ โดยค่ากำลังงานจริงของระบบจะมีค่าเท่ากับค่ากำลังงานเฉลี่ยที่เกิดขึ้น (Average Power)	9
9 โครงสร้างของวงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลังด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง	9
10 โครงสร้างระบบควบคุมของวงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	10
11 รูปของกระแสและแรงดันจะอินเฟสกันเมื่อใช้วงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลัง	10
12 วงจรเพิ่มแรงดันที่มีระบบควบคุมตัวประกอบกำลัง	11
13 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิจารณาจากด้านสเตเตอร์	13
14 Torque-Speed Characteristic ที่พิกัดแรงดันและความถี่	15
15 รูปที่ 15 $I_r$ และ $S_f$ ที่พิกัดแรงดันและความถี่	16
16 Torque-Speed Characteristic เมื่อ resultant air-gap flux คงที่และ $S_f$ มีค่าต่ำ	17
17 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	20
18 หลักการสร้างสัญญาณพัลส์วิตช์มอดูเลชันด้วยเทคนิคมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์	21
19 การมอดูเลชันสัญญาณเพื่อสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มสามเฟส	21
20 เวกเตอร์ไดอะแกรมการแปลง 3 แกนเป็น 2 แกน	25
21 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส	26
22 สถานะในการทำงานของสวิตช์ทั้ง 8 สถานะ	27
23 เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงดันในแต่ละเซกเตอร์การทำงานของสวิตช์	28
24 เวกเตอร์ไดอะแกรมของ $\vec{V}_s$	30
25 รูปแบบสถานะของการสวิตช์ของแต่ละเซกเตอร์	31
26 ไดอะแกรมการควบคุมแบบ Volt/Hz ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบป้อนแรงดัน	33
27 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็วแบบ Volt/Hz ด้วยการควบคุมค่าสลิป	34
28 บล็อกไดอะแกรมฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเปิด	35
29 สัญญาณ S-Curve และตัวแปรที่ใช้ในการหาค่า	35



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
30 การต่อบล็อกไดอะแกรมวิธีที่ 2 ของ Zeigler-Nichole	36
31 บล็อกสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของ ZN Tuning วิธีการที่ 2	37
32 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการปรับค่าเกน $k$ จนเกิดการแกว่งของระบบ	37
33 ส่วนประกอบทั้งหมดของระบบที่ดำเนินการ	39
34 หลักการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงปริมาณ	40
35 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4	40
36 ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4	41
37 วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง	42
38 วงจรป้องกันกระแสกระชากและวงจรกรองแรงดัน	42
39 3-phase Inverter	42
40 วงจรใช้ประกอบการสร้างวงจรการใช้งานเซนเซอร์ LTS 25-NP	43
41 เซ็นเซอร์วัดกระแส LTS 25-NP	44
42 วงจรวัดแรงดัน	45
43 สัญญาณที่ได้จาก Quadrature Encoder Interface	45
44 Encoder เบอร์ AEDB-9140-A13	46
45 โปรแกรมการทำงานของระบบ	47
46 ชุดควบคุมตัวประกอบกำลังและอินเวอร์เตอร์	47
47 เครื่องจักรรีดยางไฟฟ้า	48
48 ชุดต้นแบบระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ	49
49 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1490 r/min	50
50 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0 N-m	50
51 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1488 r/min	51
52 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0.1 N-m	51
53 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1485 r/min	52
54 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0.2 N-m	52
55 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1482 r/min	53
56 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0.3 N-m	53
57 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1479 r/min	54
58 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0.4 N-m	54

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
59 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1477 r/min	55
60 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0.5 N-m	55
61 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1474 r/min	56
62 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0.6 N-m	56
63 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1471 r/min	57
64 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0.7 N-m	57
65 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1467 r/min	58
66 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0.8 N-m	58
67 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1464 r/min	59
68 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0.9 N-m	59
69 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1461 r/min	60
70 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 1.0 N-m	60
71 สัญญาณ PWM ของ STM32F4	61
72 สัญญาณที่จะนำไปขับมอเตอร์	62
73 เวลาวิกฤต (Dead Time) ด้านหน้าขนาด 2.8 ไมโครวินาที	62
74 เวลาวิกฤต (Dead Time) ด้านหลังขนาด 2.8 ไมโครวินาที	63
75 สัญญาณ SVPWM ที่เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ผ่านวงจรกรองความถี่	63
76 สัญญาณเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ต่างเฟสกัน 120 องศา	64
77 ผลตอบสนองความเร็วและกระแสเฟสโดยทำการปรับความเร็วอ้างอิงของมอเตอร์ เหนี่ยวนำเชิงเส้น 1250 rpm ขณะไม่มีโหลด	64
78 ผลตอบสนองความเร็วและกระแสเฟสโดยทำการปรับความเร็วอ้างอิงที่ 2500 rpm ขณะไม่มีโหลด	65
79 ผลตอบสนองความเร็วและกระแสเฟสโดยทำการปรับความเร็วอ้างอิงที่ 1500 rpm ขณะ บรรทุกโหลดขนาด 0.5 Nm	65
80 ภาพขยายผลตอบสนองความเร็วและกระแสเฟสโดยทำการปรับความเร็วอ้างอิงที่ 1500 rpm โหลดขนาด 0.5 Nm	66
81 แรงดัน Line to Line และกระแสเฟสที่ความเร็ว 1500 rpm และโหลด 0.5 Nm	66

## สารบัญรูป (ต่อ)

82 แรงดัน Line to Line และกระแสเฟสที่ความเร็ว 1500 rpm และโหลด 0.5 Nm	67
83 ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อไม่มีการควบคุมตัวประกอบกำลัง	68
84 สัญญาณของแรงดันและกระแสอินพุทเมื่อมีการควบคุมตัวประกอบกำลัง	68
85 ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อมีการควบคุมตัวประกอบกำลัง	69
86 ผลจากการจำลองระบบเมื่อมีการควบคุมตัวประกอบกำลัง	69

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	เซกเตอร์การทำงานของสวิตซ์ทั้ง 8 สถานะ	27
2	การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบพีไอดีด้วย Ziegler-Nichole วิธีที่ 1	36
3	การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบพีไอดี Ziegler-Nichole ด้วยวิธีที่ 2	36
4	ข้อมูลสำหรับการเลือกใช้เซ็นเซอร์กระแส LTS 25-NP	44

## บทที่ 1

### บทนำ

บทนี้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของการพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีวงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องจักรรีดยางไฟฟ้า วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย วิธีการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัย ดังนี้

#### 1. ที่มาและความสำคัญ

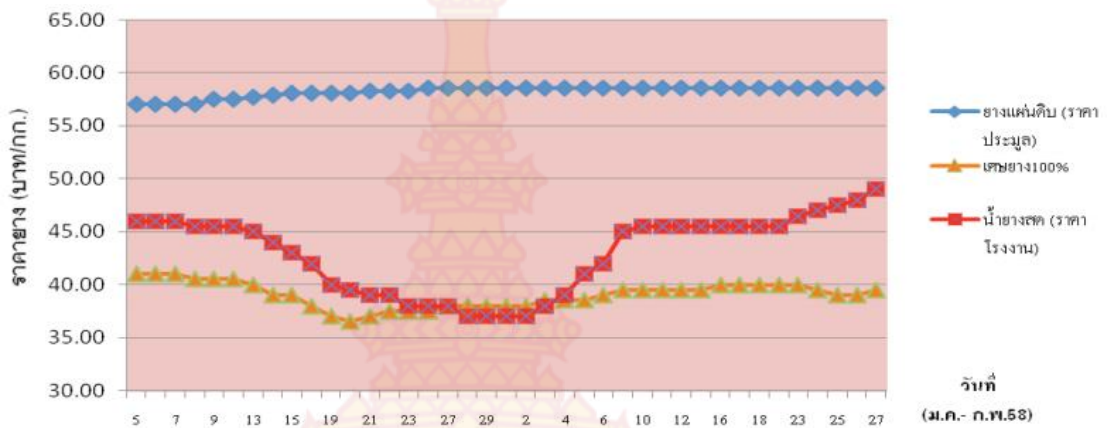
ยางพารา เป็นพืชเศรษฐกิจที่ทำรายได้ให้แก่เกษตรกร และมีมูลค่าการส่งออกสำหรับประเทศไทยเป็นอันดับ 2 รองจากข้าว ในปัจจุบันแนวโน้มการปลูกยางพารามีมากขึ้น เนื่องจากเป็นพืชที่ให้ผลตอบแทนสูง อายุการเก็บเกี่ยวยาวนาน ค่าใช้จ่ายในการปลูก และราคาของยางพาราเมื่อแปรรูปแล้วจะมีมูลค่าสูง เกษตรกรจึงให้ความสนใจและปลูกยางพารามากขึ้น [1]

ปัจจุบันสถานะเศรษฐกิจโลกที่ชะลอตัวส่งผลให้ราคายางตกต่ำดังรูปที่ 1 [2] เกษตรกรหลายราย ได้รับผลกระทบจากการจำหน่ายผลผลิต รายได้ไม่เพียงพอกับค่าครองชีพ เป็นเพราะนอกจากราคายางตกต่ำแล้วยังขายผลผลิตในรูปแบบที่ไม่เหมาะสมกับสถานการณ์ปัจจุบัน ในทางเศรษฐศาสตร์ราคายางที่ลดลงวิเคราะห์จากปริมาณการผลิตเกินกว่าความต้องการของผู้ใช้ เนื่องด้วยไม่เพียงแต่ประเทศไทยเท่านั้นที่มีปริมาณการผลิตมากเป็นอันดับหนึ่งของโลก ประเทศเพื่อนบ้านใกล้เคียงอย่างประเทศเวียดนามเริ่มมีผลผลิตทยอยออกมาอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งประเทศอินโดนีเซียที่เป็นผู้แข่งขันด้านการส่งออกรองจากประเทศไทย อย่างไรก็ตามตลอดในช่วง 2 ปีที่ผ่านมาราคายางแผ่นดิบสูงกว่าราคาน้ำยางสด และจากสถานการณ์ราคายางพารา พบว่าในช่วงเดือนธันวาคม 2557 และ มกราคม ถึง กุมภาพันธ์ 2558 ราคาประมูลยางแผ่นดิบ ณ ตลาดกลางยางพาราราคาสูงกว่าราคาน้ำยางสดที่เป็นราคาท้องถิ่นเฉลี่ยก็โลกรั่มละ 9.69, 16.11 และ 14.13 บาท ตามลำดับ ดังรูปที่ 2 (สำนักงานตลาด กลางยางพาราสงขลา, 2558) เนื่องจากเป็นราคาชั้นนำจากองค์การสวนยางทำให้เกษตรกรที่จำหน่ายเฉพาะน้ำยางสด มักได้ในราคาที่ต่างจากยางแผ่นดิบมากและเสียโอกาสด้านการตลาด ในอดีตที่ผ่านมาอย่างน้อยครั้งที่ราคาน้ำยางสดเทียบเท่าราคายางแผ่นดิบ หรือไม่ก็สูงกว่าเล็กน้อย แต่การขายน้ำยางสดเป็นสิ่งที่เกษตรกรส่วนใหญ่ชอบเพราะไม่ต้องเสียเวลาในการทำแผ่นยาง และสะดวก ไม่เหมือนกับน้ำยางสดที่สามารถขายและได้เงินในวันนั้นทันที โดยเฉพาะพื้นที่ในเขตจังหวัดสงขลาพบถึง ร้อยละ 95.35 ที่จำหน่ายน้ำยางสด (สำนักงานเศรษฐกิจ การเกษตรเขต 9, 2558) ไม่ต่างจากเกษตรกรทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่พบว่าส่วนใหญ่ร้อยละ 60 ผลิตยางก้อน

ถั่วและโดยเฉพาะอย่างยิ่งชาวสวนยางในเขตจังหวัดบึงกาฬมีถึงร้อยละ 95 ที่ผลิตยางก้อนถ้วยมักถูกกดราคาจากผู้ซื้อซึ่งมีราคาเทียบเท่ากับเศษยาง หากมองในภาพรวมแล้วชาวสวนยางทั่วประเทศมีประมาณ 1.6 ล้านครอบครัว ในจำนวนนี้คิดเป็นร้อยละ 50 ที่ต้องสูญเสียรายได้โดยที่ไม่น่าจะสูญเสีย หากคิดคำนวณว่าหนึ่งครอบครัวมีสวนยางเฉลี่ย 30 ไร่ แปลแสนครอบครัวจะสูญเสียรายได้ในช่วงที่ราคายางแผ่นดิบต่ำกว่าราคาน้ำยางสดเหมือนเช่นในช่วงที่กล่าวมาข้างต้นเป็นเงินที่สูญเสียวันละนับ 1,150 ล้านบาท ดังนั้นในสถานะเช่นนี้จำเป็นต้องมีการปรับตัวให้เข้ากับความต้องการของตลาดพลิกวิกฤตให้เป็นโอกาสในการทำยางเสียใหม่จะทำให้ได้รายได้เพิ่มขึ้น กล่าวคือ หากช่วงที่ราคายางแผ่นดิบสูงกว่าน้ำยางสดมากกว่า 3 บาทขึ้นไป ก็ควรหันมาผลิตยางแผ่นดิบแทนที่จะขายน้ำยางสดอย่างเดียว ในทางกลับกันช่วงที่ราคาน้ำยางสดสูงกว่าก็ขายน้ำยางสด ไม่ต้องเสียเวลาในการทำแผ่นเพราะต้นทุนการทำยางแผ่นดิบอยู่ที่ 52.94 บาท สูงกว่าน้ำยางสดเฉลี่ยก็โลกรัมละ 5.95 บาท และสูงกว่าต้นทุนการทำยางก้อนถ้วยเฉลี่ยก็โลกรัมละ 5.44 บาท (สถาบันวิจัยยาง, 2557) จากการสำรวจร้านค้าที่จำหน่ายเครื่องจักรรีดยางในเขตจังหวัดสงขลาพบว่า ร้อยละ 50 ของเกษตรกรชาวสวนยางหันมาผลิตยางแผ่นดิบเพิ่มขึ้นพยายามศึกษาวิธีการทำยางแผ่นให้ได้คุณภาพดี และทำการซ่อมแซมเครื่องจักรให้กลับมาใช้งานใหม่ ทำนองเดียวกันกับโรงแรมควินของสหกรณ์กองทุนสวนยางที่มีโรงแรมควินแต่ไม่ใช้ประโยชน์อย่างแท้จริงก็หันมาพัฒนาอุปกรณ์ จักรรีดยาง ให้สามารถใช้งานได้เช่นเดิม แนวคิดการทำยางแผ่นดิบในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นทางเลือกที่ดี เนื่องจากหากแผ่นยางให้มีความหนาบางในระดับที่เหมาะสม จากนั้นฝั่งในที่รมที่ ๆ มีอากาศถ่ายเทได้ดีจนกว่าแผ่นยางจะแห้งมีปริมาณความชื้นไม่เกิน 3% การทำยางแผ่นดิบให้มีคุณภาพดีแผ่นยางต้องสะอาด เนื้อยางมีความยืดหยุ่นดี สีสม่ำเสมอ ขนาดแผ่นได้มาตรฐาน และหากความชื้นของยางแผ่นน้อยกว่า 3% จะจำหน่ายในราคาที่สูงกว่ายางแผ่นดิบคุณภาพต่ำเฉลี่ยก็โลกรัมละ 5 บาท [3]



รูปที่ 1 สถิติราคาขายพาราตั้งแต่ปี 2554 ถึง 2558



รูปที่ 2 ความแตกต่างระหว่างราคายางแผ่นดิบ (ราคาประมูล) เศษยาง และน้ำยางสด (ประกาศ ณ สำนักงานตลาดกลางยางพาราสงขลา ม.ค. - ก.พ. 2558)

ดังที่กล่าวมาในข้างต้นข้อดีของการทำยางแผ่นคือ เกษตรกรสามารถเก็บรักษาผลผลิตเพื่อจำหน่ายได้ในระยะเวลาที่ยาวนานกว่า เช่น 1 เดือนขายผลผลิต 1 ครั้งหรือเมื่อได้ราคาดีจึงขาย โดยเฉพาะในช่วงที่ราคายางมีความผันผวนเช่นในปัจจุบัน ทำให้สามารถเพิ่มมูลค่าของผลผลิตได้ในส่วนของข้อดีคือ ค่าใช้จ่ายในการผลิต สามารถลดในส่วนนี้ได้โดยการเพิ่มคุณภาพของแผ่นยางให้มากขึ้น และลดขั้นตอนการทำงาน หรือลดการใช้แรงงาน โดยการใช้เครื่องจักร ในกระบวนการทำยางแผ่นต้องใช้เครื่องจักรที่เรียกว่า “จักรรีดยาง” โดยปกติการใช้งานจะต้องใช้คนในการทำงาน 2 คน โดยที่คนหนึ่งทำหน้าที่หมุนและควบคุมความเร็วของการรีด และอีกคนทำหน้าที่ป้อนยางเข้าจักรรีดดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กระบวนการรีดยางพารา

แนวคิดหนึ่งที่จะลดการทำงานและแรงงานคนในการทำยางแผ่นคือ การพัฒนาเครื่องรีดยางแบบขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ หรือไฟฟ้า ขึ้นมาแทนที่ ซึ่งปัจจุบันที่นำเสนออยู่นั้นมีอยู่หลายรูปแบบ ทั้งที่เป็นงานวิจัยและมีการจำหน่ายเป็นผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างของเครื่องรีดยางดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4 [4, 5, 6]



(a) (b)  
รูปที่ 4 เครื่องรีดยางพาราขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า

จากโครงสร้างของเครื่องรีดยางพาราดังรูปที่ 4 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีใช้งานอย่างแพร่หลายอยู่ในปัจจุบัน ในทุกงานวิจัยมีข้อสรุปว่า เครื่องสามารถรีดยางพาราได้เร็วกว่าเครื่องรีดยางพาราแบบหมุน และลดการใช้แรงงานคนได้ ทำให้การผลิตสามารถเพิ่มผลผลิตได้ และจะเห็นว่าการขับเคลื่อนจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้า หากเปรียบเทียบระหว่างการใช้ไฟฟ้ากับใช้เครื่องยนต์แล้ว ใช้ไฟฟ้าสามารถให้ผลดีในเรื่องค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิง แต่จากการทดสอบการทำงานของเครื่องพบว่า มีข้อด้อยหลายประการ [7] เช่น ไม่สามารถปฏิบัติงานได้เพียงคนเดียว ยังคงต้องใช้แรงงานเท่าเดิม ความปลอดภัยในการใช้งาน เนื่องจากผู้ปฏิบัติงานสามารถสัมผัสกับแรงดันไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์ ในกรณีที่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้า 1 เฟส และ 380 โวลต์ กรณีที่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส ไม่สามารถควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ที่เหมาะสมทำให้มอเตอร์เกิดความเสียหาย ค่าพลังงานไฟฟ้าขณะเริ่มเดินเครื่อง รวมถึงตัวประกอบกำลัง หรือเพาเวอร์แฟคเตอร์ Power factor (PF) เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติเป็นโหลดทางไฟฟ้าแบบอินดักเตอร์ (L) กระแสและแรงดันจะมีมุมห่างกัน 90 องศา

## 2. วัตถุประสงค์

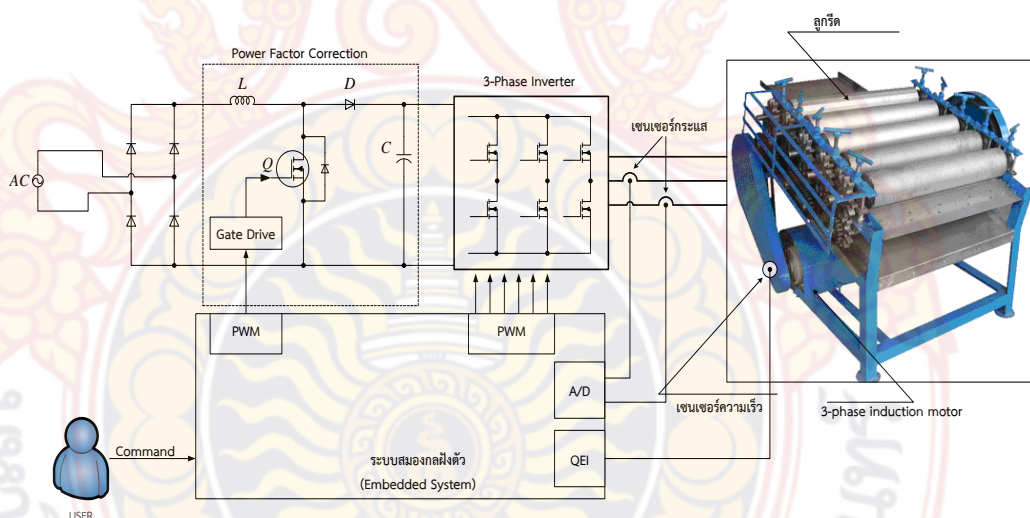
1.2.1 เพื่อพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีวงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องจักรรีดยางไฟฟ้าเพื่อจัดสร้างชุดควบคุมวงจร Buck-converter

1.2.2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้กับเครื่องจักรรีดยางไฟฟ้าเพื่อสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ได้ตามต้องการ

1.2.3 เพื่อช่วยเหลือเกษตรกรโดยลดขั้นตอนการทำงานทำให้สามารถเพิ่มผลผลิตและสามารถแข่งขันได้

## 3. แนวคิดของงานวิจัย

ใช้วงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลัง(power factor correction) ในการปรับปรุงและควบคุมตัวประกอบกำลังและใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสสองระดับที่มีการควบคุมเชิงปริมาณ (V/f) ในการควบคุมมอเตอร์



รูปที่ 5 ส่วนประกอบของระบบทั้งหมด

## 4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

4.1 วงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลัง(power factor correction)

4.2 อินเวอร์เตอร์สามเฟสสองระดับที่มีการควบคุมแบบเชิงปริมาณ (V/f)

4.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์

4.4 โปรแกรม MATLAB/SIMULINK



## 5. ขอบเขตงานวิจัย

5.1 ใช้กับแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์

5.2 ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ

5.3 แปลงจากกระแสสลับเฟสเดียวเป็นกระแสสลับสามเฟส

5.4 ตัวประกอบกำลังใกล้เคียง 1.0



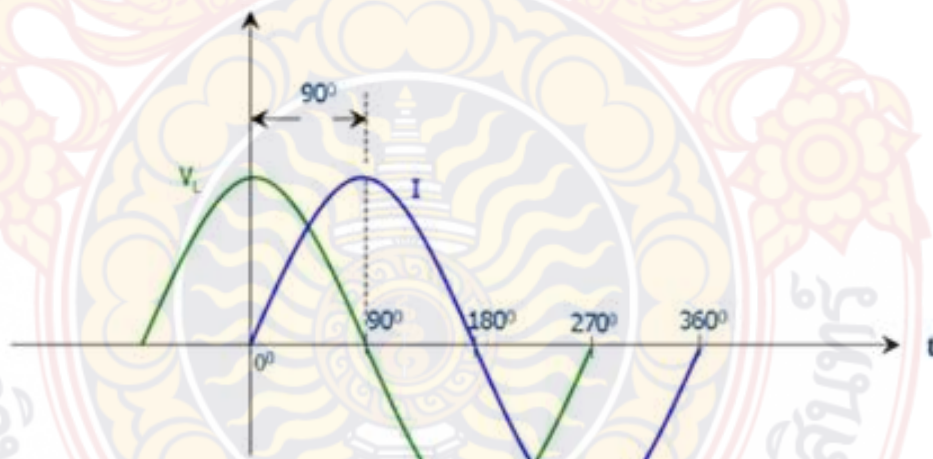
## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงหลักการควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า(power factor correction) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ(induction motor)และหลักการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสแบบเหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบปรับรงสนามแม่เหล็ก(field oriented control) รวมถึงการจำลองการทำงานของ การควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดและการจำลองอินเวอร์เตอร์แบบปรับรงสนามแม่เหล็กโดยใช้โปรแกรมแมทแลบซิมูลิงค์(Matlab/Simulink) ในการจำลองรวมถึงการนำโปรแกรมดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์

#### 1. การควบคุมตัวประกอบกำลัง(PFC)

เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ามีคุณสมบัติเป็นโหลดทางไฟฟ้าแบบอินดักเตอร์ (L) กระแสและแรงดันจะมีมุมห่างกัน 90 องศา ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 รูปคลื่นกระแสล้าหลังแรงดันเป็นมุม 90 องศา เมื่อโหลดเป็นอินดักเตอร์ (L)

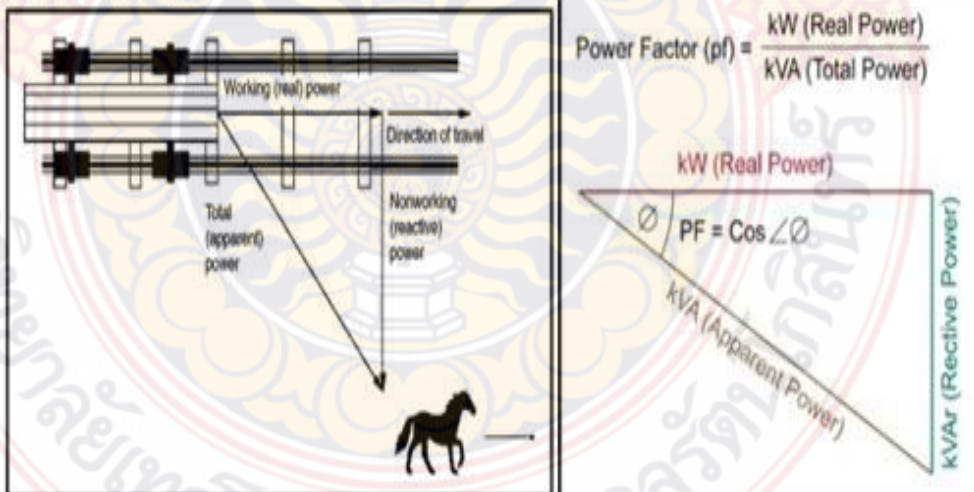
ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (p.f.) หรือที่เรียกกันภาษาไทยว่าค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้านั้น คือค่าตัวเลขอัตราส่วนของกำลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงหรือ Real Power (P) ซึ่งมีหน่วยเป็นวัตต์

(Watt:W) ทหารด้วยค่ากำลังงานที่ปรากฏ หรือ Apparent Power (S) ซึ่งมีหน่วยเป็นวีเอหรือโวลท์-แอมป์ (VA) ดังสมการที่ 1 และ 2 โดยสามารถอธิบายให้เข้าใจง่ายได้ว่า Power Factor คือตัวเลขที่บอกถึงกำลังงานไฟฟ้าที่ได้ใช้ประโยชน์หรือเกิดการทำงานจริง กับขนาดของกำลังงานทั้งหมดที่ต้องการจากระบบไฟฟ้า โดยส่วนที่เกินจากกำลังงานที่ใช้ทำงานจริงจะเรียกว่า กำลังไฟฟ้่าต้านกลับ หรือ Reactive Power ซึ่งมีหน่วยเป็นวาร์ (VAR) กำลังไฟฟ้่าต้านกลับที่ไม่เกิดประโยชน์นี้ก็จะเป็นการให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง สายส่งด้วยและจะเกิดกำลังงานสูญเสียในอุปกรณ์เหล่านี้ในขณะเดียวกัน รูปที่ 7 แสดงภาพเปรียบเทียบกำลังงานที่ม้าต้องใช้ในการลากรถเทียบได้กับกำลังไฟฟ้่าที่ปรากฏ(Apparent Power) การเคลื่อนที่ของรถม้าในทิศทางที่ต้องการคืองานที่เกิดขึ้นจริง (Real Power) และกำลังที่ม้าต้องใช้มากขึ้นโดยไม่ได้รับการเคลื่อนที่ของรถในทิศทางที่ต้องการ (Reactive Power) ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้่าหรือเพาเวอร์แฟคเตอร์ (p.f.) คือค่า cosine ของมุมที่เกิดขึ้นตามรูป ในกรณีที่ม้าออกแรงตั้งฉากกับรางที่เป็นทิศทางเคลื่อนที่ไม่ว่าจะมากเท่าใดก็จะไม่เกิดงานขึ้นซึ่งในกรณีนี้คือ เพาเวอร์แฟคเตอร์ (PF.) = 0 แต่ในทางกลับกันถ้าม้าเดินอยู่บนรางกำลังที่ใช้ เพื่อจะลากรถก็จะใช้น้อยที่สุดนั่นเอง

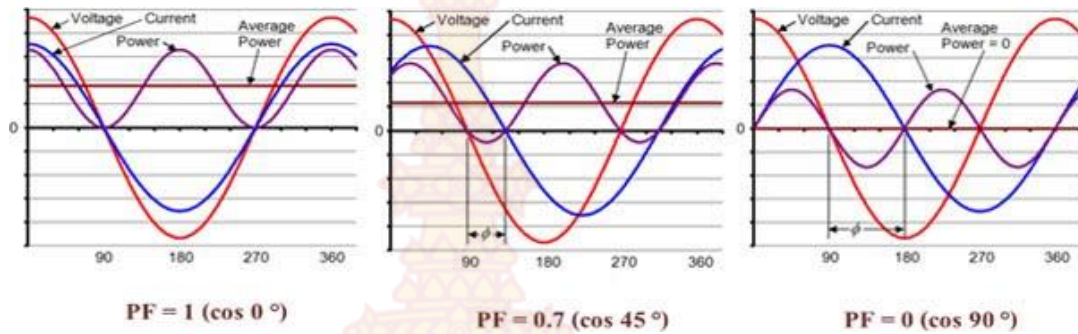
$$\text{Power Factor (PF.)} = \frac{P}{S} = \frac{\text{Watt}}{\text{VA}} \quad (1)$$

$$\text{Apparent Power (S)} = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2)$$

### What is Power Factor?

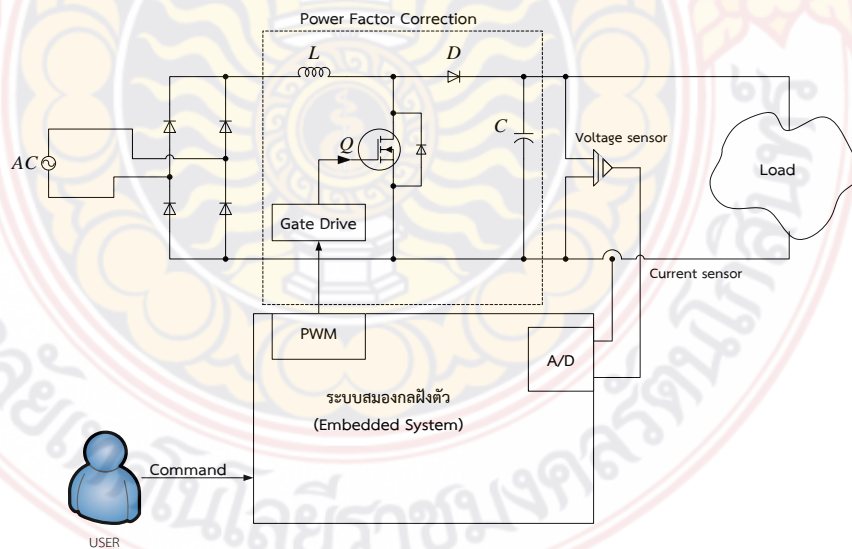


รูปที่ 7 เปรียบเทียบกำลังงานที่ใช้ในการลากรถของม้ากับกำลังงานทางไฟฟ้า

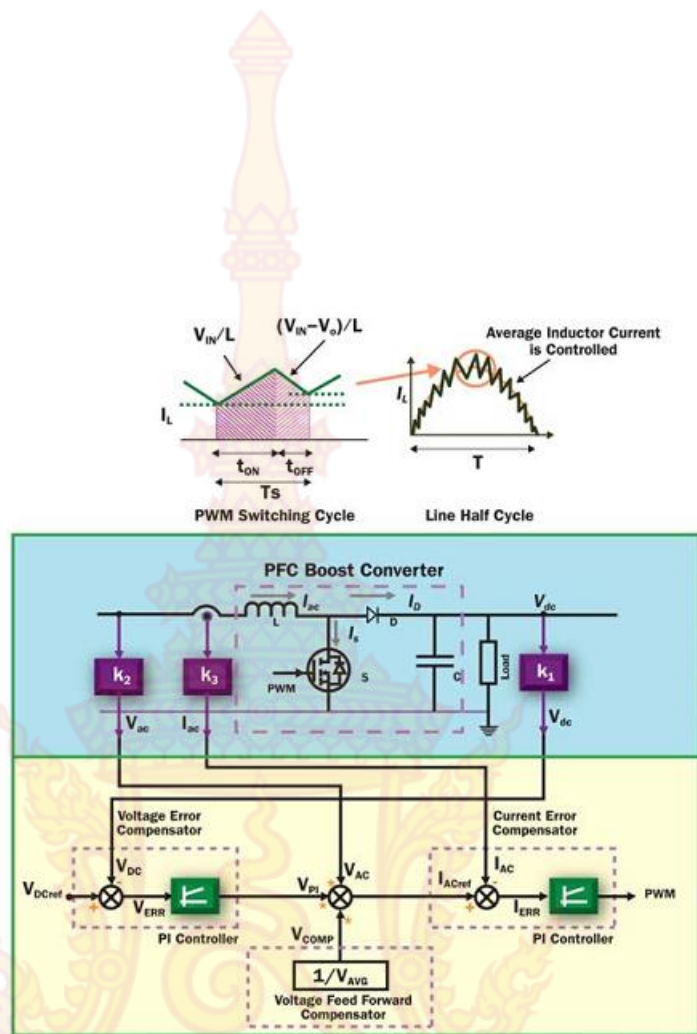


รูปที่ 8 รูปคลื่นและแรงดันไฟฟ้าที่ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (p.f.) ต่างๆ โดยค่ากำลังงานจริงของระบบจะมีค่าเท่ากับค่ากำลังงานเฉลี่ยที่เกิดขึ้น (Average Power)

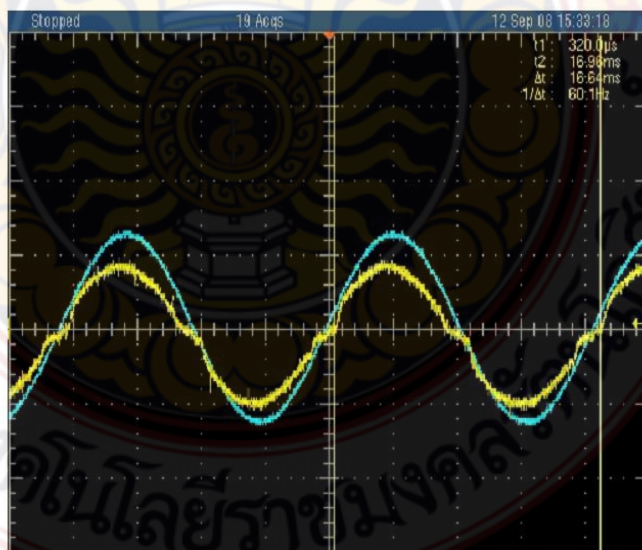
การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น การติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor) ซึ่งทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าด้านกลับ (kVar) แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการสร้างสนามแม่เหล็กที่ก่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าด้านกลับเช่นมอเตอร์เข้าด้วยกันกำลังไฟฟ้าด้านกลับที่จ่ายจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหรือการไฟฟ้าจะลดลงหรือหมดไปซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่จ่ายโดยตัวเก็บประจุไฟฟ้านั้นและการใช้วงจรเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกการใช้วงจรเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากขนาดพิกัดของโหลดที่เป็นมอเตอร์เพียงอย่างเดียว วงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลังแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 โครงสร้างของวงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลังด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



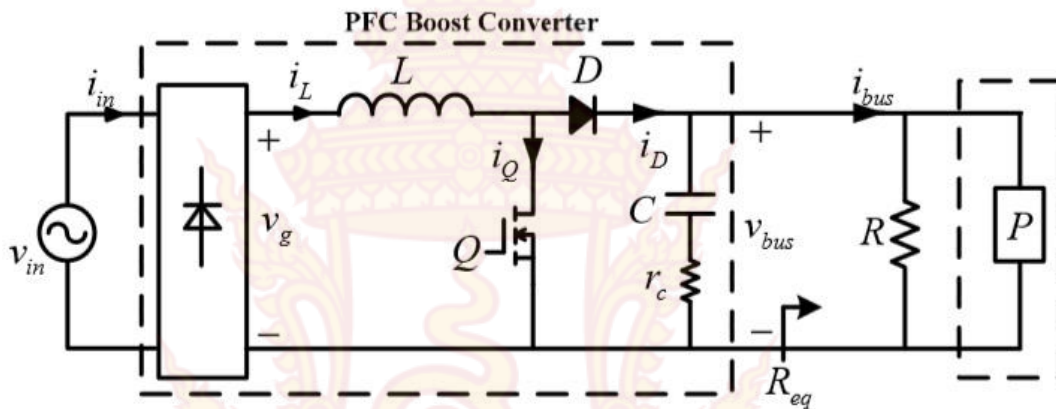
รูปที่ 10 โครงสร้างระบบควบคุมของวงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 11 รูปของกระแสและแรงดันจะอินเฟสกันเมื่อใช้วงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

เมื่อทำการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าทำให้รูปคลื่นของกระแสและแรงดันเกิดขึ้นพร้อมกัน (in phase) ดังแสดงในรูปที่ 11

งานวิจัยนี้ใช้วงจรแปลงผันแบบเพิ่มแรงดัน(boost converter)โดยมีระบบควบคุมตัวประกอบกำลังหรือที่เรียกว่า PFC โดยใช้อัลกอริทึมควบคุมแบบพีเอ็ด(PID) ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 วงจรเพิ่มแรงดันที่มีระบบควบคุมตัวประกอบกำลัง

หลักการทำงานของวงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลังคือแหล่งจ่ายเป็นกระแสสลับเฟสเดียวถูกแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแสจากนั้นผ่านวงจร PFC Boost Converter ดังรูปก่อนที่จะจ่ายไปยังโหลดในส่วนของงานวิจัยนี้ใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสสองระดับแรงดัน( 3 phase 2 level inverter) ที่มีระบบควบคุมแบบการควบคุมเชิงปริมาณ (V/f) โดยที่ระบบควบคุมเป็นแบบวงเปิด)

ตามกฎของ Kirchhoff ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาออก  $v_{bus}$  กับ  $i_{bus}$  กระแสเอาต์พุตสามารถหาได้จาก

$$i_{bus} = \frac{v_{bus}}{R} + \frac{P}{v_{bus}} \quad (3)$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานเทียบเคียง(equivalent resistance)ถูกแสดงโดยสมการที่ 2

$$\Delta R_{eq} = \frac{dv_{bus}}{di_{bus}} = \frac{Rv_{bus}^2}{v_{bus}^2 - PR} \quad (4)$$

ความต้านทานเทียบเคียงทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงลักษณะแบบไดนามิกส์ที่แตกต่างกันโดยมีค่า R และ P แตกต่างกัน จากสมการ (4) ที่มีค่ามากกว่าของ R หรือ P ในกรณีนี้ถ้า  $v_o^2 - PR < 0$ ,  $\Delta R_{eq} < 0$  ซึ่งหมายความว่า จะมีลักษณะของความต้านทานเป็นลบ รูปที่ 8 (ก) แสดงให้เห็นว่าด้วยค่าคงที่

ของ P และค่าที่มากขึ้นของ R จะสอดคล้องกับค่าความลาดเอียงของความต้านทานที่เท่ากัน ลาดของ จุดจาก A ถึง F เป็นศูนย์ซึ่งหมายถึงลักษณะความต้านทานเชิงลบจะปรากฏในพื้นที่ด้านซ้ายของจุด เหล่านี้ รูปที่ 8 (ข) แสดงให้เห็นว่ามีค่าคงที่ของ R ค่า P ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นของ P จะสอดคล้องกับ พื้นที่ของลักษณะความต้านทานเชิงลบในระบบของมัน ส่วนผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ของโหลด ไฟฟ้าคงที่อาจทำให้เกิดการเสียหายของวงจร PFC ดังนั้นควรเลือกโหลดตัวต้านทานที่มีค่าน้อยเพื่อ หลีกเลี่ยงการเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น

## 2. มอเตอร์เหนี่ยวนำและการควบคุม

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้มากที่สุด ซึ่งมอเตอร์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำนี้อาจ เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว หรือมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟส (Poly Phase Induction Motor) ก็ได้ มอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟสนั้นโดยมากแล้วจะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3เฟส ซึ่งมีข้อดี และ ข้อด้อยคือ

### ข้อดี

1. เป็นมอเตอร์ชนิดที่สร้างขึ้นได้ง่าย และ ทนทาน โดยเฉพาะชนิดกรงกระรอก
2. ราคาไม่แพง และไม่เสี้ง่าย
3. มีประสิทธิภาพที่สูงพอในสภาวะที่มอเตอร์หมุนปกติ ไม่มีแปรงถ่านดังนั้นการสูญเสีย เนื่องจากความฝืดจึงลดลงหรือมีค่าน้อยมาก และมีเพาเวอร์แฟคเตอร์(p.f.)สูง
4. ต้องการการดูแล และบำรุงรักษาต่ำ
5. สามารถที่จะเริ่มหมุน(Start) ได้ง่าย โดยเฉพาะชนิดกรงกระรอก

### ข้อด้อย

1. ความเร็วรอบของมอเตอร์ไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้อันเนื่องมาจากความถี่หลักมูลของ แรงดันไฟฟ้าสลับที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้
2. มีคุณสมบัติเหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน(dc-shunt motor) ความเร็ว รอบจะลดลงหรือเพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับโหลด
3. แรงบิดในขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำค่อนข้างต่ำกว่าแรงบิดขณะเริ่มหมุนของ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน

## 2.1 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

### 2.1.1 หลักการเบื้องต้น

ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสและ 3 เฟส เมื่อได้รับการจ่ายแรงดันไฟสลับที่สมดุล 3 เฟส (กรณีมอเตอร์ 3 เฟส) ที่มีความถี่  $f$  จำนวนขั้วแม่เหล็ก  $P$  ขั้ว จะมีผลให้เกิดกระแสไหลอย่างสมดุลใน ขดลวดแต่ละเฟส โดยกระแสที่ไหลจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นที่ช่องอากาศ ที่หมุนด้วยความเร็วคงที่

(Synchronous speed) ดังต่อไปนี้

$$N_r = \frac{120f}{P} \quad (5)$$

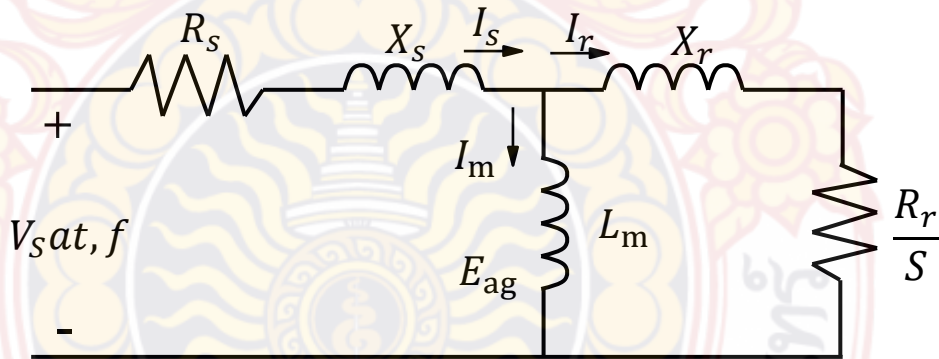
ซึ่งสนามแม่เหล็กหมุน(rotating magnetic field) นี้จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและกระแสไหลในโรเตอร์ซึ่งทำให้เกิดแรงบิดพาให้โรเตอร์หมุนอยู่ด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่งซึ่งต่ำกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน (Synchronous) อยู่เล็กน้อยซึ่งความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ ( $N_r$ ) จะหมุนช้ากว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน ( $N_s$ ) อยู่เท่ากับ  $N_s - N_r$  และเรียกความเร็วที่แตกต่างกันนี้ว่าความเร็วลื่นไถล(slip speed) ซึ่งมักถูกแสดงในรูปของระบบต่อหน่วย (per-unit slip) ดังนี้

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (6)$$

หรือมอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็ว

$$N_r = N_s(1-S) \quad (7)$$

เพื่ออธิบายปัจจัยหรือพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของมอเตอร์จึงนำวงจรสมมูลมาพิจารณา



รูปที่ 13 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิจารณาจากด้านสเตเตอร์

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 13 จะไม่นำค่า  $R_c$  (ค่าความต้านทานสมมูลแทนการสูญเสียในแกนเหล็กหรือ core loss) มาพิจารณาร่วมด้วยเพราะมีค่าสูงมากทำให้กระแสไหลผ่านได้น้อย เมื่อเทียบกับความต้านทานของสเตเตอร์(stator resistance :  $R_s$ ) และความต้านทานของโรเตอร์(rotor resistance :  $R_r$ ) ในขณะที่กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก(Magnetizing current :  $I_m$ ) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่ง



ของกระแสป้อนมอเตอร์ (Is) จะมีค่ามากโดยกระแส Im นี้ถือว่าเป็นกระแสที่สร้าง Resultant air-gap flux หรือ  $\Phi_{ag}$  จากวงจรสมมูลย์ที่ได้ จึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ของแรงดันป้อนเข้าได้ดังนี้

$$V_s = E_{ag} + I_s(R_s + jX_s) \quad (8)$$

จากทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า จะมีแรงบิดเกิดขึ้นที่มอเตอร์คือ

$$T_{em} = k_1 I_r \phi_{ag} \sin \delta \quad (9)$$

โดย  $\delta$  คือมุมต่างเฟสระหว่าง แรงเคลื่อนแม่เหล็กจากโรเตอร์ (Rotor mmf) และ Resultant air-gap flux

สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์เป็นดังนี้

$$E_{ag} = k_2 f \phi_{ag} \quad (10)$$

และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ เมื่อพิจารณาทางสเตเตอร์

$$E_r = R_r I_r + S X_r I_r \quad (11)$$

ในสภาวะที่มอเตอร์หมุนในช่วงความเร็วปกติเมื่อพิจารณาจากด้านโรเตอร์จะพบว่าความต้านทานที่เกิดจากสนามแม่เหล็กรั่วไหล (Rotor Leakage Reactance) จะมีค่าน้อยกว่าความต้านทานของโรเตอร์ (Rotor Resistance) มาก ที่ความถี่สลลิป (slip frequency) ดังกล่าว ทำให้มุมต่าง  $\delta$  มีค่าใกล้เคียงศูนย์ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของกระแสโรเตอร์ เมื่อพิจารณาขณะมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วปกติ

$$I_r \approx k_3 \phi_{ag} S f \quad (12)$$

และแรงบิด

$$T_{cm} = k_4 \phi_{ag}^2 S f \quad (13)$$

และในกรณีความถี่ป้อนเข้า f มีค่าปกติ และไม่คิดผลของความต้านทานที่ต่ออนุกรม (Series Impedance) ทางสเตเตอร์

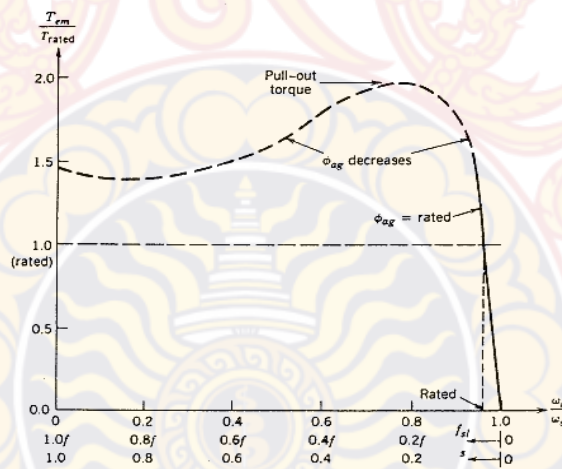
$$V_s \approx E_{ag} \approx k_2 f \phi_{ag} \quad (14)$$

จากสมการต่างๆ ข้างต้น ทำให้ได้ข้อสังเกตต่างๆดังนี้

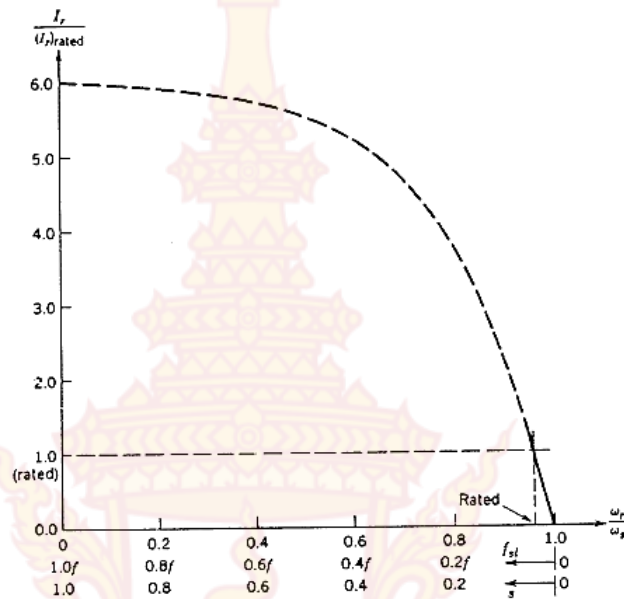
1. ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนสามารถเปลี่ยนแปลงตามความถี่ไฟฟ้าป้อนเข้า
2. ที่ค่าสลิปต่ำๆ ความเร็วมอเตอร์จะแปรผันตามความถี่ของแรงดันป้อนเข้า ยกเว้นที่ความถี่ต่ำ
3. เพื่อให้ได้สมรรถนะทางแรงบิดเท่าที่พิกัดควรรักษา  $\phi_{ag}$  ให้คงที่เท่าพิกัด ซึ่งต้องทำให้แหล่งจ่าย ( $V_s$ ) แปรผันตรงตามความถี่ ( $f$ )
4. เนื่องจากกระแสเตอร์ ( $I_r$ ) แปรผันตามความถี่สลิป (Slip frequency :  $S_f$ ) เพื่อจำกัดมิให้กระแสเตอร์ ( $I_s$ ) สูงเกินกว่าพิกัด ค่าของ  $S_f$  ไม่ควรเกินค่าที่พิกัด

จากข้อสังเกตทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าความเร็วมอเตอร์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการควบคุมความถี่ป้อนเข้า  $f_1$  และควรรักษาให้ air-gap flux มีค่าคงที่เท่าพิกัด โดยการควบคุมขนาดของแรงดันป้อนเข้าให้แปรผันตามความถี่ ถ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำถูกควบคุมในลักษณะดังกล่าว มอเตอร์จึงจะสามารถให้แรงบิดได้ที่พิกัด โดยที่ slip frequency ( $S_f$ ) กระแสโรเตอร์ ( $I_r$ ) กระแสสเตเตอร์ ( $I_s$ ) และค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียในวงจรโรเตอร์จะอยู่ในระดับพิกัด

### 2.1.2 คุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความถี่และแรงดันพิกัด



รูปที่ 14 Torque-Speed Characteristic ที่พิกัดแรงดันและความถี่



รูปที่ 15  $I_r$  และ  $S_f$  ที่พิกัดแรงดันและความถี่

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 14 และ 15 พบว่า เมื่อ  $S_f$  มีค่าต่ำ  $I_r$  และแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นภายใน ( $T_{em}$ ) จะแปรผันตาม  $S_f$  อย่างเป็นเชิงเส้น แต่ถ้า  $S_f$  มีค่ามากขึ้น ทั้ง  $T_{em}$  และ  $I_r$  จะไม่แปรผันตาม  $S_f$  อย่างเป็นเชิงเส้นอีกต่อไป ด้วยเหตุที่ค่า reluctance ของ rotor ณ ความถี่ slip ดังกล่าวมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับ  $R_r$  เมื่อพิจารณาทางวงจรด้านโรเตอร์ทำให้มุม  $\delta$  ห่างกันมากขึ้นซึ่งมีผลให้แรงบิดมีค่าลดลง ตามสมการ (13) ในขณะที่  $I_r$  จะมีค่าสูงขึ้น เป็นเหตุให้  $I_s$  มีค่าสูงขึ้นตามทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่อิมพีแดนซ์ที่ Stator ทำให้  $E_{ag}$  มีค่าลดลงส่งผลให้  $\phi_{ag}$  มีค่าลดลง ดังนั้นสามารถพิจารณาได้จากสมการ (10) และ (11) ว่าเนื่องจาก  $\phi_{ag}$  ลดลง จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงทำให้  $T_{em}$  และ  $I_r$  ไม่ได้แปรผันตาม  $S_f$  อีกต่อไป ผลที่เกิดขึ้นกับ  $I_s$ ,  $T_{em}$  และ  $\phi_{ag}$  จะเกิดขึ้นพร้อมๆกัน และจากรูปที่ 14 จะเรียกจุดที่แรงบิดมีค่าสูงสุดว่า Pull Out Torque ใน การใช้งานปกติทั่วไป การขับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่จะกล่าวถึงต่อไปจะรักษาให้  $S_f$  มีค่าต่ำหรือไม่ให้สูงกว่าพิกัด ดังนั้นส่วนที่เป็นเส้นประในรูปที่ 14 และ 15 จะไม่ได้นำมาพิจารณา

### 2.1.3 การควบคุมความเร็วโดยการเปลี่ยนความถี่และแรงดัน

จาก หัวข้อที่ 2.1 เราได้ทราบแล้วว่า เราสามารถปรับความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำได้โดยปรับความถี่ ซึ่งจะไปควบคุมความเร็ว Synchronous หรือความเร็วมอเตอร์นั่นเอง ถ้าเรารักษาให้  $S_f$  มีค่าต่ำและการรักษาให้  $\phi_{ag}$  มีค่าคงที่ด้วยการปรับให้  $V_s$  แปรผันตาม  $f$  ซึ่งก็ยังมีวิธีการควบคุมความเร็วแบบอื่น เช่นการปรับลดแรงดันป้อนเข้า  $V_s$  หรือการควบคุมความเร็วโดย Static Slip

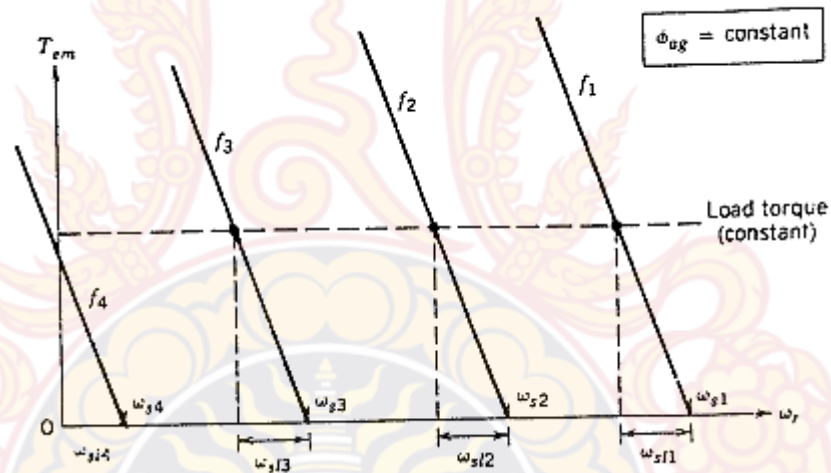
Power Recovery แต่การปรับความเร็วโดยการควบคุมความถี่และแรงดันจะนิยมใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำมากกว่าวิธีอื่นๆ

### 2.1.4 ลักษณะของแรงบิดกับความเร็ว

จากความสัมพันธ์ในสมการต่างๆของหัวข้อ 2.1 เมื่อควบคุมให้  $\phi_{ag}$  คงที่ และรักษาให้  $S_f$  มีค่าต่ำแล้ว จะได้ความสัมพันธ์ของแรงบิดต่อ  $S_f$  ตลอดช่วงความถี่  $f$  คือ

$$T_{em} = k_5 S_f \quad (11)$$

ซึ่งแรงบิดในช่วงที่  $S_f$  มีค่าต่ำนี้ ดูได้จากเส้นทึบในรูปที่ 14 และเมื่อพิจารณารูปที่ 16



รูปที่ 16 Torque-Speed Characteristic เมื่อ resultant air-gap flux คงที่และ  $S_f$  มีค่าต่ำ

จากรูปที่ 4 เมื่อพิจารณา  $S_f$  ในรูปของ  $\omega_{sl}$  ซึ่ง  $\omega_{sl}$  เท่ากับ  $S\omega_{st}$  เมื่อขับด้วยความเร็วต่างๆกัน โดยการปรับเปลี่ยนความถี่ป้อนเข้า และเมื่อ Load Torque คงที่แล้วจะได้เส้น curve แสดงคุณลักษณะของแต่ละความถี่ขนานกันไปเมื่อ Load Torque และ ความเร็ว Slip  $\omega_{sl}$  มีค่าคงที่และจะสังเกตได้ว่า เมื่อ Load Torque คงที่ ความถี่ Slip หรือ  $S_f$  ซึ่งเป็นความถี่ของแรงดันเหนี่ยวนำและกระแสในวงจรมอเตอร์จะคงที่ด้วย อย่างไรก็ตามแสดงว่าในขณะที่ความถี่  $f$  เพิ่มขึ้น ค่าสลิปจะลดลง

ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

1. สเตเตอร์หรือตัวอยู่กับที่ (Stator) จะเป็นส่วนที่อยู่กับที่ซึ่งจะประกอบด้วยโครงของมอเตอร์ แกนเหล็กสเตเตอร์ และขดลวด

1.1 โครงมอเตอร์ (Frame or Yoke) จะทำด้วยเหล็กหล่อทรงกระบอกกลวง ฐานส่วนล่างจะเป็นขาตั้ง มีกล่องสำหรับต่อสายไฟอยู่ด้านบนหรือด้านข้าง โครงจะทำหน้าที่ยึดแกนเหล็กสเตเตอร์ให้แน่นอยู่กับที่ผิวด้านนอกของโครงมอเตอร์ จะออกแบบให้มีลักษณะเป็นครีบ เพื่อช่วยในการระบายความร้อน ในกรณีที่เป็นมอเตอร์ขนาดเล็ก ๆ โครงจะทำด้วยเหล็กหล่อ แต่ถ้าเป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่ โครงจะทำด้วยเหล็กหล่อเหนียว ซึ่งจะทำให้มอเตอร์มีขนาดเล็กกะทัดรัดมากขึ้น แต่ถ้าใช้เหล็กหล่อก็จะให้มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก นอกจากนี้แล้วโครงของมอเตอร์ยังอาจทำด้วยเหล็กหล่อเหนียวมันเป็นแผ่นมันวามรูปทรงกระบอก แล้วเชื่อมติดกันให้มีความแข็งแรง เช่น มอเตอร์สปลิตเฟส เป็นต้น

1.2 แกนเหล็กสเตเตอร์ (Stator Core) ทำด้วยแผ่นเหล็กบางๆ มีลักษณะกลมเจาะตรงกลางและเจาะร่องภายในโดยรอบ แผ่นเหล็กชนิดนี้เรียกว่า ลามิเนท ซึ่งจะถูกล้อมด้วยซิลิกอน เหล็กแต่ละแผ่นจะมีความหนาประมาณ 0.025 นิ้ว หลังจากนั้นจึงนำไปอัดเข้าด้วยกันจนมีความหนาที่เหมาะสม เรียกว่าแกนเหล็กสเตเตอร์

1.3 ขดลวด (Stator Winding) จะมีลักษณะเป็นเส้นลวดทองแดงเคลือบฉนวนที่เรียกว่า อีนาเมล (Enamel) พันอยู่ในร่องของแกนเหล็กสเตเตอร์ตามรูปแบบต่างๆ ของการพันมอเตอร์

2 โรเตอร์หรือตัวหมุน (Rotor) มอเตอร์ชนิดเหนียวน่าจะมีโรเตอร์ 2 ชนิด คือโรเตอร์แบบกรงกระรอกและโรเตอร์แบบขดลวดพันหรือแบบวาวนด์ ซึ่งจะมีส่วนประกอบดังนี้คือ แกนเหล็กโรเตอร์ ขดลวด ไบพัต และเพลลา ดังจะไดกล่าวรายละเอียดต่อไป

2.1 โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel cage rotor) จะประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางๆ ที่เรียกว่าแผ่นเหล็กลามิเนท ซึ่งจะเป็นแผ่นเหล็กชนิดเดียวกันกับสเตเตอร์ มีลักษณะเป็นแผ่นกลมๆ เจาะร่องผิวภายนอกเป็นร่องโดยรอบ ตรงกลางจะเจาะรูสำหรับสวมเพลลาและจะเจาะรูรอบๆ รูตรงกลางที่สวมเพลลาทั้งนี้เพื่อช่วยให้ในการระบายความร้อน และยังทำให้โรเตอร์มีน้ำหนักเบาลง เมื่อนำแผ่นเหล็กไปสวมเข้ากับแกนเพลลาแล้วจะได้เป็นแกนเหล็กโรเตอร์ หลังจากนั้นก็จะใช้แท่งตัวทองแดงหรือแท่งอะลูมิเนียมหล่ออัดเข้าไปในร่องของแกนเหล็กสเตเตอร์เข้าไปวางทั้งสองด้านด้วยวงแหวนตัวนำทั้งนี้เพื่อให้ขดลวดครบวงจรไฟฟ้าหรืออาจนำแกนเหล็กสเตเตอร์เข้าไปในแบบพิมพ์แล้วฉีดอะลูมิเนียมเหลวเข้าไปในร่อง ก็จะได้อะลูมิเนียมอัดแน่นอยู่ในร่องจนเต็มและจะได้ขดลวดตัวนำ

แบบกรงกระรอกฝังอยู่ในแกนเหล็ก ขดลวดในโรเตอร์นั้นจะเป็นลักษณะของตัวนำที่เป็นแท่งซึ่งอาจใช้ทองแดง หรืออะลูมิเนียมประกอบเข้าด้วยกันเป็นลักษณะคล้ายกรงนกหรือกรงกระรอก

2.2 โรเตอร์แบบขดลวดพันหรือแบบวาวนด์ (Wound Rotor) โรเตอร์ชนิดนี้จะมี ส่วนประกอบคล้าย ๆ กับโรเตอร์แบบกรงกระรอก คือ มีแกนเหล็กที่เป็นแผ่นลามิเนตอัดเข้าด้วยกัน แล้วสวมเข้าที่เพลลา แต่จะแตกต่างกันตรงที่ขดลวด จะเป็นเส้นลวดชนิดที่หุ้มด้วยน้ำยาฉนวนอีนาเมล พันลงไปในร่องสลิตของโรเตอร์จำนวน 3 ชุด ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับที่พันบนสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟสแล้วต่อวงจรขดลวดเป็นแบบสตาร์ โดยนำปลายทั้ง 3 ที่เหลือต่อเข้ากับวงแหวนตัวนำ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถต่อวงจรของขดลวดของโรเตอร์เข้ากับตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ที่อยู่ภายนอกตัวมอเตอร์ เพื่อการปรับค่าความต้านทานของโรเตอร์ ซึ่งจะสามารถควบคุมความเร็วของโรเตอร์ได้

3 ฝาครอบ (End Plate) ส่วนมากจะทำด้วยเหล็กหล่อ เจาะรูตรงกลางและคว้านเป็นรูปกลมใหญ่เพื่ออัดเบร้งหรือตลับลูกปืนรองรับแกนเพลลาของโรเตอร์

4. ฝาครอบใบพัด (Fan End Plate) จะมีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กเหนียวขึ้นรูปให้มีขนาดสวมฝาครอบได้พอดี มีรูเจาะเพื่อระบายอากาศ และยึดติดกับฝาครอบด้านที่มีใบพัด ส่วนใหญ่จะมีในมอเตอร์ 3 เฟสและมอเตอร์ 1 เฟสขนาดใหญ่

5. ใบพัด (Fan) จะทำด้วยเหล็กหล่อ มีลักษณะเท่ากันทุกครีบบเท่ากันทุกครีบบ จะสวมยึดอยู่บนเพลลาด้านตรงข้ามกับเพลลาแกน ใบพัดนี้จะช่วยในการระบายอากาศและความร้อนได้มากทีเดียว ใบพัดนี้ส่วนใหญ่จะมีในมอเตอร์ 3 เฟสและมอเตอร์ 1 เฟสขนาดย่อยถึงขนาดใหญ่ เช่นเดียวกับฝาครอบใบพัด

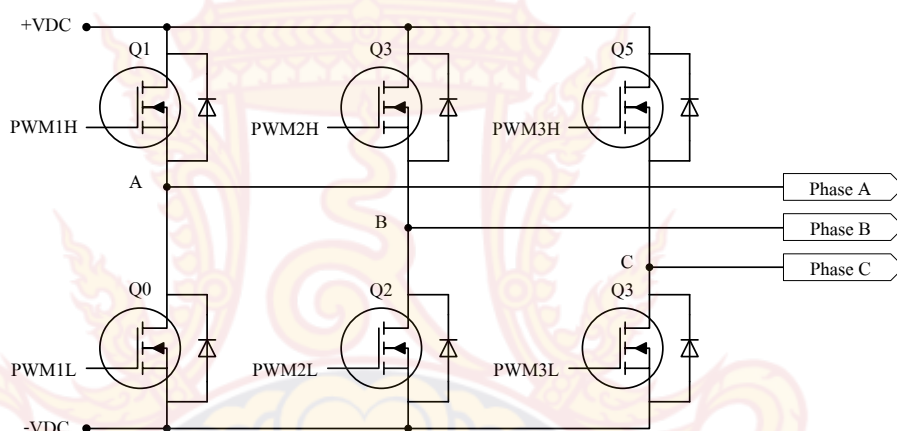
6. สลักเกลียว (Bolt) จะทำด้วยเหล็กเหนียวจะมีลักษณะเป็นเกลียวตลอด ถ้าเป็นมอเตอร์ 3 เฟส จะประกอบด้วยสลักเกลียว 8 ตัว ทำหน้าที่ยึดฝาครอบให้ติดกับโครง ถ้าเป็นมอเตอร์ 1 เฟส ขนาดเล็ก เช่น มอเตอร์สปลิตเฟสจะเป็นสลักเกลียวยาวตลอดความยาวของตัวมอเตอร์ ทำเกลียวเฉพาะด้านปลายและมีน็อตขันยึดไว้ ดังนั้นจึงมีเพียง 4 ตัว

## 2.2 อินเวอร์เตอร์และเทคนิคการสร้างสัญญาณพัลส์วิธิมอดูเลชั่น (PWM)

อินเวอร์เตอร์ที่กล่าวถึงเป็นแบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source) โดยการกำเนิดแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ในแต่ละเฟส ทำได้โดยการสวิตซ์อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตซ์ คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น ไอจีบีที (IGBT) เป็นต้น ดังนั้นรูปแบบการสวิตซ์อินเวอร์เตอร์นั้นขึ้นอยู่กับค่าที่คำนวณเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม โดยใช้เทคนิคการสวิตซ์แบบสเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่น (SVM)

### 2.2.1 ระบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับให้กับโหลดสามเฟส นิยมแปลงผันผ่านอินเวอร์เตอร์สามเฟสซึ่งเหมาะกับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง เพราะถ้าหากจะใช้อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟลูบริดจ์จำนวน 3 ชุดได้ แต่ต้องใช้สวิตช์จำนวนถึง 12 ตัว นอกจากนั้นยังต้องอาศัยวงจรควบคุมที่ทำให้แต่ละเฟสต่างกัน 120 องศาของความถี่หลักมูล จึงไม่เหมาะที่จะเลือกใช้อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟลูบริดจ์สามตัว จึงมีการพัฒนาอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสขึ้นมาที่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออกได้ทั้งขนาดและความถี่เช่นในรูปที่ 17 จะเห็นว่ามีสวิตช์และไดโอดจำนวนอย่างละ 6 ตัว และประกอบด้วยสามกิ่งหรือสามเฟส

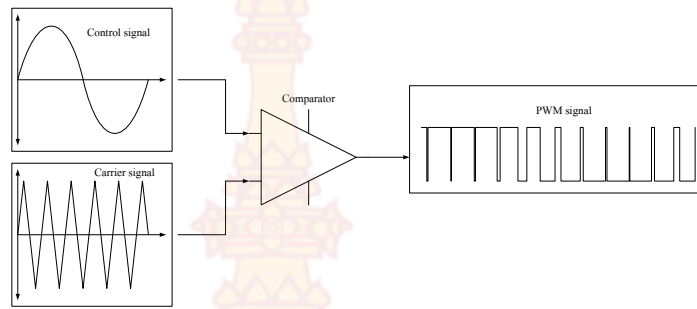


รูปที่ 17 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

หลักการการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามเฟสในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสนั้น จะมีการสร้างสัญญาณในการควบคุมการทำงานของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (MOSFET หรือ IGBT) แต่ละตัว สัญญาณที่สร้างขึ้นนั้นจะเป็นแบบพัลส์เบิรยูเอ็ม Pulse with Modulation (PWM) เพื่อลดสัญญาณฮาร์โมนิก (Harmonic) ในระบบ เทคนิคและวิธีการสร้างสัญญาณแบบพัลส์เบิรยูเอ็มนั้นมีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้มากในปัจจุบันในงานที่เกี่ยวข้องกับการขับเคลื่อนทางไฟฟ้ามีอยู่ 2 วิธี คือ เทคนิคการมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์ (SPWM) และเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน (SVPWM)

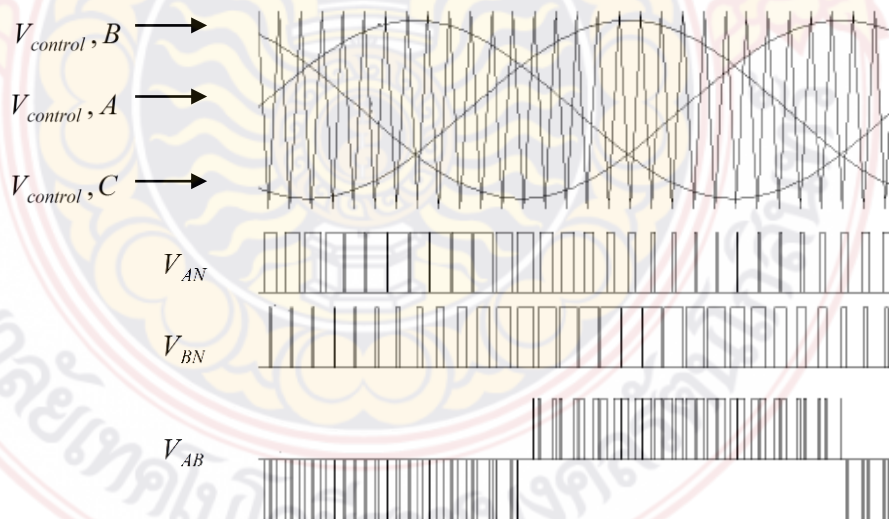
### 2.2.2 การสร้างสัญญาณพัลส์เบิรยูเอ็มด้วยเทคนิคมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์ (SPWM)

การสร้างสัญญาณพัลส์เบิรยูเอ็มด้วยเทคนิค SPWM ถือได้ว่าเป็นวิธีการพื้นฐานในการสร้างสัญญาณแบบพัลส์เบิรยูเอ็มในอินเวอร์เตอร์สามเฟส เนื่องจากมีหลักการในการสร้างที่ง่ายและไม่ซับซ้อน ซึ่งหลักการในการสร้างสัญญาณพัลส์เบิรยูเอ็มด้วยเทคนิคมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์แสดงดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 หลักการสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันด้วยเทคนิคมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์

จากรูปหลักการในการสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันด้วยเทคนิคมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์ (SPWM) กระทำโดยการนำสัญญาณสองสัญญาณมาทำการเปรียบเทียบกันประกอบด้วยสัญญาณสามเหลี่ยมเรียกว่าสัญญาณ (Carrier signal) และสัญญาณรูปคลื่นไซน์เรียกว่าสัญญาณ (Control signal) สำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟสนั้นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ใช้นั้นมีทั้งหมด 3 สัญญาณและแต่ละสัญญาณมีมุมต่างเฟสกัน 120 องศา ดังรูปที่ 19 เพื่อสร้างสัญญาณสามเฟสแบบพีดับเบิลยูเอ็ม ตามรูปค่าแอมปริจูดระหว่างสัญญาณรูปคลื่นไซน์และสัญญาณสามเหลี่ยมนั้นจะมีค่าเท่ากัน แต่ความถี่ระหว่างสองสัญญาณนั้นจะมีค่าไม่เท่ากันคือ ค่าความถี่ของสัญญาณรูปคลื่นไซน์จะถูกกำหนดอยู่ในช่วงที่ใช้งานกับโหลดที่นำมาใช้งาน หรือกำหนดตามค่าความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ใช้งานในภูมิภาคนั้นๆ เช่นในประเทศไทยค่าความถี่ของระบบไฟฟ้ามีค่าความถี่อยู่ที่ 50 เฮิรตซ์ ในส่วนค่าความถี่ของสัญญาณรูปคลื่นสามนั้นจะเป็นตัวกำหนดสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น



รูปที่ 19 การมอดูเลชันสัญญาณเพื่อสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มสามเฟส



ในการสร้างสัญญาณ PWM นั้นวัตถุประสงค์คือต้องการที่จะปรับเปลี่ยนปริมาณของแรงดันและความถี่ของแหล่งจ่ายที่จ่ายให้เหมาะสมกับเครื่องจักรกลไฟฟ้า ในการปรับปริมาณของแรงดันและความถี่ของแหล่งจ่ายนั้นสามารถกระทำได้โดยการอัตราส่วนของ  $m_a$  และ  $m_f$  โดยที่  $m_a$  คืออัตราส่วนระหว่างขนาดแรงดันของสัญญาณรูปคลื่นไซน์ และสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม ดังสมการ

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \quad (12)$$

โดยที่  $V_{control}$  คือค่าสูงสุดของสัญญาณรูปคลื่นไซน์ และ  $V_{tri}$  คือค่าสูงสุดของสัญญาณสามเหลี่ยม และ  $m_f$  คืออัตราส่วนระหว่างความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม และสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ดังสมการ

$$m_f = \frac{f_{carrier}}{f_{control}} \quad (13)$$

โดยที่  $f_{carrier}$  คือค่าความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม และ  $f_{control}$  คือค่าความถี่ของสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ในการปรับเปลี่ยนขนาดของแรงดันหรือความถี่นั้นจะกระทำเฉพาะสัญญาณรูปคลื่นไซน์เท่านั้น ในส่วนของสัญญาณสามเหลี่ยมนั้นจะไม่มีการปรับเปลี่ยน ในการกำหนดค่าขนาดของสัญญาณในสมการที่ 14 นั้นจะต้องกำหนดให้  $m_a$  นั้นมีค่าอยู่ในช่วง  $m_a \leq 1$  เนื่องจากเป็นช่วงที่อินเวอร์เตอร์ทำงานในย่านมอดูเลชันเชิงเส้น ในย่านเชิงเส้นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลในหนึ่งเฟสจะมีค่าดังสมการ

$$(V_{AN})_1 = m_a \cdot \frac{V_d}{2} \quad (14)$$

โดยที่  $V_d$  คือแรงดันเชื่อมโยงกระแสตรง

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

$$V_{L-to-L} = V_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (V_{AN})_1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot m_a \cdot \frac{V_d}{2} = 0.612 \cdot m_a \cdot V_d \quad (15)$$

ตัวอย่างของการทำงานในย่านเชิงเส้น เช่น หากจ่ายแรงดันเชื่อมโยง 311 โวลต์ เมื่อปรับ จะได้แรงดันจะได้แรงดันเท่ากับ  $0.612 \times 0.5 \times 311 = 95.17$  โวลต์ การกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม  $f_{carrier}$  นั้นจะคำนึงถึงการเกิดฮาร์โมนิกของแรงดันด้านออก ซึ่งการกำหนดค่าความถี่นั้น

จะสามารถกำหนดการเกิดของฮาร์มอนิกได้ โดยจะกำหนดให้เกิดห่างจากค่าความถี่หลักมูล เพื่อป้องกันการสร้างวงจรกรองฮาร์มอนิก การเกิดของฮาร์มอนิกจะเป็นฮาร์มอนิกเลขคี่โดยเกิดขึ้นที่ไซด์แบนของ  $m_f$  และจำนวนเท่าของ  $m_f$  และผลจากค่าของแรงดัน  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$  และ  $V_{CN}$  นั้นมีเฟสต่างกัน 120 องศา ส่งผลให้เฟสจะเท่ากันทุกๆ  $3m_f$  ทำให้แรงดันไฟฟ้าจะไม่มีฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 หารลงตัว เช่น 3, 9, 15, 21 เป็นต้น นอกจากนี้สำหรับในกรณีแรงดันเฟสที่มีโพลดสมดุล ค่าแรงดันระหว่างสายจะไม่มีฮาร์มอนิกเลขคู่ เช่น ฮาร์มอนิก 2, 4, 6, 8 เป็นต้น สามารถสรุปประเด็นสำคัญของอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิค SPWM ได้ดังนี้

- ที่ค่า  $m_f \leq 21$  หากต้องการกำจัดฮาร์มอนิกเลขคู่จะต้องใช้การสวิตซ์ซึ่งแบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ซิงโครไนส์ หมายถึง  $m_f$  จะต้องเป็นจำนวนเต็มและความถี่หลักมูลจะเริ่มและจบคาบพร้อมกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม และ  $m_f$  ต้องเป็นจำนวนเลขคี่

- ที่ค่า  $m_f \geq 21$  ฮาร์มอนิกย่อยที่เกิดขึ้นจากการสวิตซ์ซึ่งแบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ไม่ซิงโครไนส์ ( $m_f$  ไม่เป็นจำนวนเต็ม) จะมีค่าน้อย แต่ต้องตระหนักว่าควรหลีกเลี่ยงการสวิตซ์ซึ่งแบบพีดับเบิลยูเอ็มแบบไม่ซิงโครไนส์ เพราะจะทำให้เกิดฮาร์มอนิกย่อยใกล้กับความถี่หลักมูล

- ที่ค่า  $m_a > 1$  หากไม่พิจารณาค่าของ  $m_f$  จะมีผลเช่นเดียวกับกรณีที่ 1

ทั้งหมดที่กล่าวในข้างต้นคือหลักการที่เกี่ยวข้องการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิคการมอด-ดูเลชั่นรูปคลื่นไซน์ ซึ่งเห็นว่าการสร้างสัญญาณด้วยหลักการดังกล่าวนั้นมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน และง่ายต่อการสร้างเพื่อใช้งาน แต่จากสมการที่ 14 จะเห็นว่าการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิคมอดดูเลชั่นรูปคลื่นไซน์นั้นแรงดันด้านออกจะมีค่าน้อย และในการสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมนั้นอาจเกิดกรณีที่ไม่มีซิงโครไนส์ อันเนื่องมาจากกระบวนการทำงานของฮาร์ดแวร์ จึงอาจก่อให้เกิดปัญหาเรื่องของฮาร์มอนิกย่อยที่เกิดขึ้นใกล้กับความถี่หลักมูล จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการคิดค้นเทคนิคการสวิตซ์ในรูปแบบใหม่โดยจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

### 2.2.3 การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดดูเลชั่น (SVM)

การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดดูเลชั่น (SVM) นั้นจัดเป็นเทคนิคการมอดดูเลชั่นขั้นสูงสำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟส และเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยมในการขับเคลื่อนทางไฟฟ้า เนื่องจากการสร้างสัญญาณด้วยเทคนิคดังกล่าวเป็นการใช้หลักการจากการหมุนของสนามแม่เหล็กภายในเครื่องกลไฟฟ้าแบบหมุน ข้อดีในการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดดูเลชั่นประกอบด้วย

- ให้ช่วงความถี่มอดดูเลชั่นกว้าง ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับวิธี PWM แบบ Third-harmonic injection

- ให้ Harmonics ต่ำกว่า PWM มาตรฐาน (SPWM)

- ให้แรงดันเอาต์พุตสูงกว่าวิธีมอดูเลชันพื้นฐาน SPWM โดยประมาณ 15%
- ให้ประสิทธิภาพดีขึ้นเมื่อใช้กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง
- SVM มีแรงดันเอาต์พุตมากกว่าแบบ SPWM โดยปราศจากผลการลดทอนของสัญญาณแรงดันระหว่างสาย
- การประยุกต์ใช้งานง่าย และสัญญาณมอดูเลชันมีความแน่นอนกว่า SPWM
- ให้ประสิทธิภาพสูง
- สามารถป้องกันไม่ให้เกิดการสวิตช์โดยไม่จำเป็นได้

ข้อดีทั้งหมดที่กล่าวมาเกิดจากการทดลองใช้งานกับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ในการที่จะทำ  
ให้เข้าใจถึงกระบวนการในการสร้างสัญญาณที่ดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิค SVM นั้น จะต้องเข้าใจถึง  
หลักการการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหมุน

#### 2.2.4 หลักการของสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน (SVM)

หลักการในการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยการใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชันนั้น มาจาก  
การศึกษาเกี่ยวกับการขับเคลื่อนขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก การหมุนของมอเตอร์  
นั้นจะใช้หลักการของสนามแม่เหล็กหมุน หากนำสมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำมาพิจารณาแล้วจะเห็น  
ว่า การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนนั้นมาจากการจ่ายแรงดันสามเฟสเข้าไปยังสเตเตอร์ ภายในสเตเตอร์  
นั้นประกอบด้วยขดลวด เมื่อจ่ายแรงดันดันเข้าไปในขดลวดจะเกิดกระแสจากผลของไหลตที่เป็น  
ความต้านทาน  $R$  และตัวเหนี่ยวนำ  $L$  สร้างสนามแม่เหล็กขึ้นในช่องว่างอากาศ (Air gap)  
สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเป็นสนามแม่เหล็กหมุนที่มีความเร็วตามสมการ  $2\omega/p$  เมื่อ  $\omega = 2\pi f$  และ  
 $p$  คือจำนวนขั้ว (Pole) สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดในช่องว่างอากาศจะทำให้โรเตอร์ของมอเตอร์  
เหนี่ยวนำเกิดการหมุน เกิดการเคลื่อนที่ตัดกันระหว่างตัวนำของโรเตอร์ และสนามแม่เหล็กหมุนทำให้  
เกิดแรงดันขึ้นในโรเตอร์ แรงดันที่เกิดในโรเตอร์จะส่งผลให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ กระแสดังกล่าวก็  
จะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมา สนามแม่เหล็กทั้งสองที่เกิดขึ้นจะต้านกันทำให้เกิดแรงบิดตัวของโรเตอร์  
ให้หมุนไปในทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุน หลักการทั้งหมดที่กล่าวมานั้นเป็นหลักการเคลื่อนที่ของ  
โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก จากหลักการงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถอธิบาย  
เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ เริ่มจากสมการของแรงดันที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ของมอเตอร์ ดัง  
สมการ

$$\begin{aligned}
 V_a &= V_m \sin(\omega t) \\
 V_b &= V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 V_c &= V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

จากสมการที่ 16 แรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดของสเตเตอร์นั้นเป็นแรงดันที่มีความต่างเฟสกัน 120 องศาทางไฟฟ้า ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับสมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสนั้น จะทำการวิเคราะห์ เหมือนกับเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากง่ายต่อการคำนวณและการควบคุม ดังนั้นจะต้องทำการแปลง(transfer)แรงดันสามเฟสให้เป็นแรงดันสองเฟส โดยการใช้ Clarke Transform การแปลงจากสามแกน  $abc$  ให้เป็นสองแกน  $\alpha\beta$  ใช้สมการดังนี้

$$\vec{V}_s^{(s)} = V_\alpha + jV_\beta = \frac{2}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad a \text{ คือ Unit vector} \quad (17)$$

โดยที่  $a = 1.e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + j\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$  และ  $a^2 = 1.e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$

นำค่าของ  $a$  และ  $a^2$  แทนในสมการที่ 17 จะได้ตามสมการ

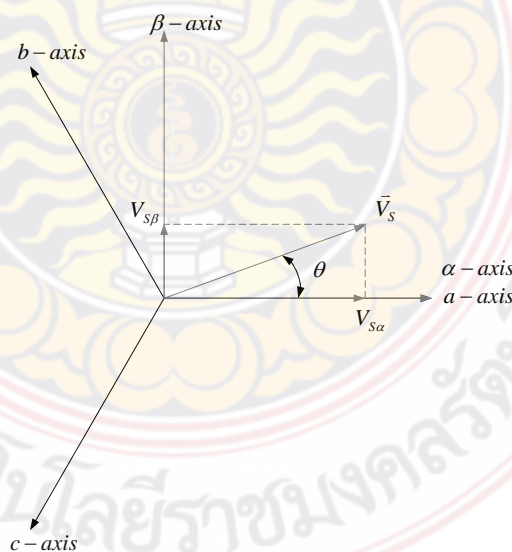
$$\vec{V}_s^{(s)} = V_\alpha + jV_\beta = \frac{2}{3}\left(V_a + \frac{1}{2} \cdot V_b + j\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_b - \frac{1}{2} \cdot V_c - j\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_c\right) \quad (18)$$

ทำการแยกส่วนของจำนวนจริง(Re)และจำนวนจินตภาพ(Im)จะได้ค่าของ  $V_\alpha$  และ  $V_\beta$  ตามสมการ

$$V_{S\alpha} = \frac{2}{3}\left(V_a - \frac{1}{2} \cdot V_b - \frac{1}{2} \cdot V_c\right) \quad (19)$$

$$V_{S\beta} = \frac{2}{3}\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_b - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_c\right)$$

จากการคำนวณเพื่อการแปลงจากสามแกน  $abc$  เป็นสองแกน  $\alpha\beta$  สามารถเขียนเป็นเวกเตอร์ ไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 20



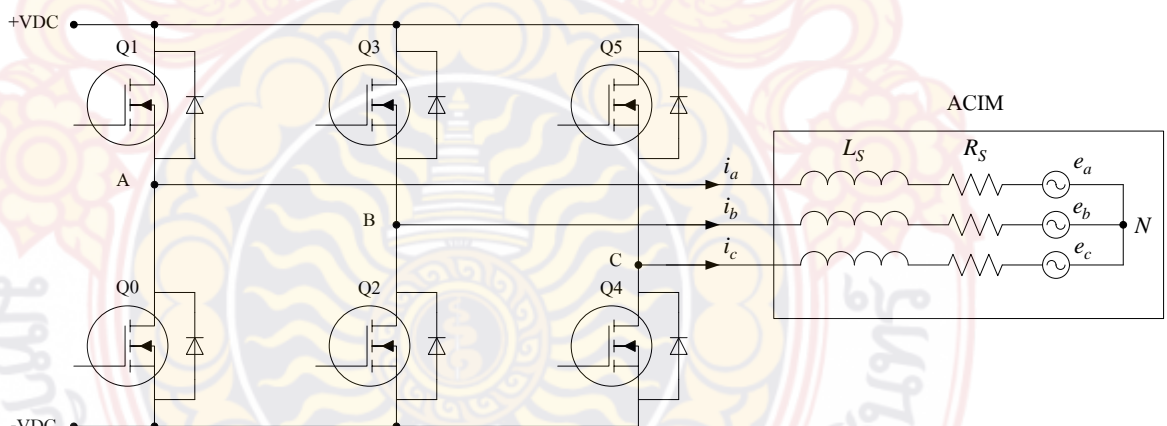
รูปที่ 20 เวกเตอร์ไดอะแกรมการแปลง 3 แกนเป็น 2 แกน

จากรูปจะเห็นว่าเมื่อทำการแปลงจากสามแกนเป็นสองแกนแล้วผลรวมทางเวกเตอร์ของแกน  $\alpha$  และ  $\beta$  ในแต่ละช่วงเวลานั้นจะเกิดเวกเตอร์  $\vec{V}_s$  ขึ้นมา ซึ่งเวกเตอร์ดังกล่าวนี้จะหมุนเป็นวงกลมทุกๆ การเปลี่ยนแปลงของ  $\theta$  การเกิดของเวกเตอร์ดังกล่าวนี้เป็นที่มาของหลักการในการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน โดย  $\vec{V}_s$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 20 และมุม  $\theta$  คำนวณได้จากสมการที่ 21

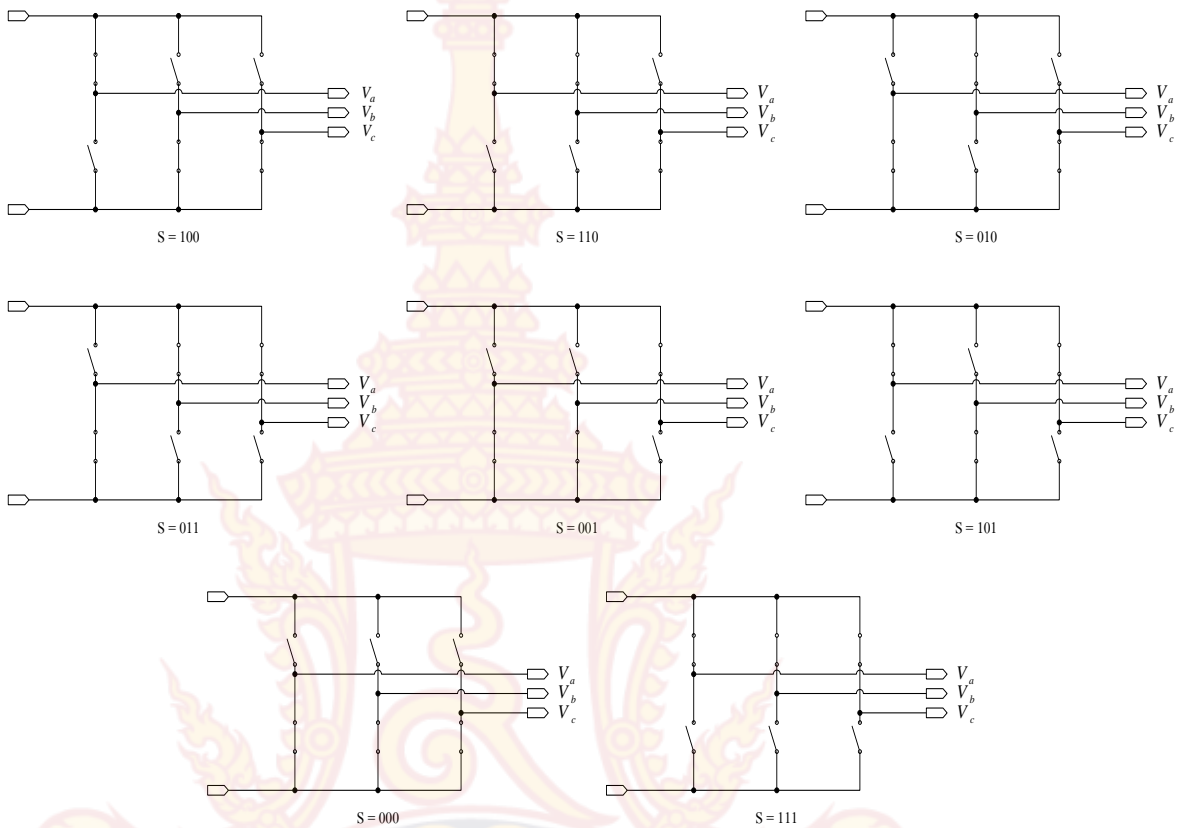
$$\vec{V}_s = \sqrt{V_{S\alpha}^2 + V_{S\beta}^2} \quad (20)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{V_{S\beta}}{V_{S\alpha}} \right) \quad (21)$$

ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นจะต้องใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสดังรูปที่ 21 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์นั้นสามแบ่งการสวิตช์ออกเป็น 8 สถานะดังแสดงในรูปที่ 22



รูปที่ 21 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส



รูปที่ 22 สถานะในการทำงานของสวิตช์ทั้ง 8 สถานะ

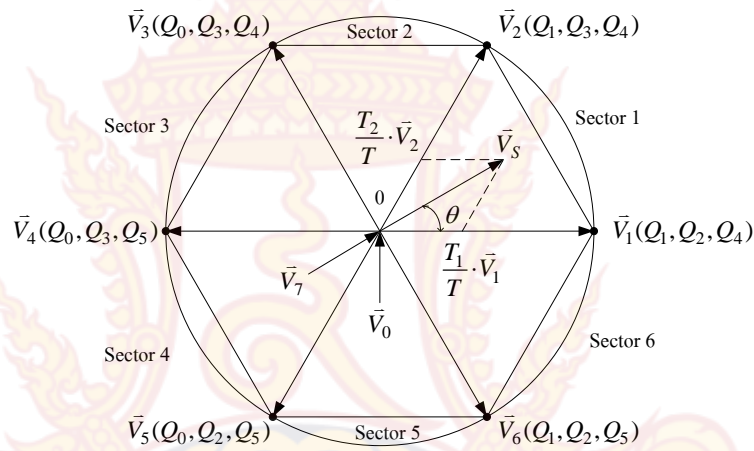
จากรูปที่ 22 สามารถนำมาเขียนตารางแสดงเซกเตอร์ทำงานของสวิตช์ได้ดังตารางที่ 1 การทำงานของสวิตช์นั้นจะคิดเพียง 6 เซกเตอร์เท่านั้นเนื่องจากเซกเตอร์ที่  $S = 000$  และ  $S = 111$  นั้นจะไม่มีแรงดันทางด้านเอาต์พุต

ตารางที่ 1 เซกเตอร์การทำงานของสวิตช์ทั้ง 8 สถานะ

เซกเตอร์ของสวิตช์	สวิตช์ที่ทำงาน	$V_{AN}$	$V_{BN}$	$V_{CN}$	เวกเตอร์ของแรงดัน
000	$Q_0, Q_2, Q_4$	0	0	0	$\vec{V}_0$
100	$Q_1, Q_2, Q_4$	$\frac{2}{3}V_{DC}$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$\vec{V}_1$
110	$Q_1, Q_3, Q_4$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$-\frac{2}{3}V_{DC}$	$\vec{V}_2$
010	$Q_0, Q_3, Q_4$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$\frac{2}{3}V_{DC}$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$\vec{V}_3$
011	$Q_0, Q_3, Q_5$	$-\frac{2}{3}V_{DC}$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$\vec{V}_4$

001	$Q_0, Q_2, Q_5$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$\frac{2}{3}V_{DC}$	$\vec{V}_5$
101	$Q_1, Q_2, Q_5$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$-\frac{2}{3}V_{DC}$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$\vec{V}_6$
111	$Q_1, Q_3, Q_5$	0	0	0	$\vec{V}_7$

จากตารางที่ 1 สามารถนำมาเขียนเป็นเวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงดันทั้ง 8 เซกเตอร์ได้ดังรูปที่ 23 เพื่อเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์  $\vec{V}_s$  ในแต่ละเซกเตอร์ทำงานของสวิตช์



รูปที่ 23 เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงดันในแต่ละเซกเตอร์การทำงานของสวิตช์

### 2.2.5 ขั้นตอนในการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิค SVM

ขั้นตอนในการดำเนินการเพื่อสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิค SVM สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาค่าของ  $\vec{V}_s$  และมุม  $\theta$  ในการคำนวณหาค่า  $\vec{V}_s$  และมุม  $\theta$  เพื่อทราบถึงสถานะของการสวิตช์ ขั้นตอนในการหา นั้น มีหลายรายงานการวิจัยที่นำเสนอวิธีการในการหาค่า ซึ่งสามารถสรุปวิธีการหาได้สองวิธีคือ

วิธีที่ 1 วิธีการคำนวณโดยใช้สมการจากการแปลงสามแกนเป็นสองแกน เริ่มจากการหา  $V_{s\alpha}$  และ  $V_{s\beta}$  และทำการหา  $\theta$  จากผลของ  $V_{s\alpha}$  และ  $V_{s\beta}$  ที่ได้ โดยมีขั้นตอนดังนี้

$$\begin{aligned}
 V_{s\alpha} &= \frac{2}{3} \left( V_a - \frac{1}{2} \cdot V_b - \frac{1}{2} \cdot V_c \right) \\
 V_{s\beta} &= \frac{2}{3} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_b - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_c \right)
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

เขียนเป็นเมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} V_{S\alpha} \\ V_{S\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\vec{V}_s = \sqrt{V_{S\alpha}^2 + V_{S\beta}^2} \quad (24)$$

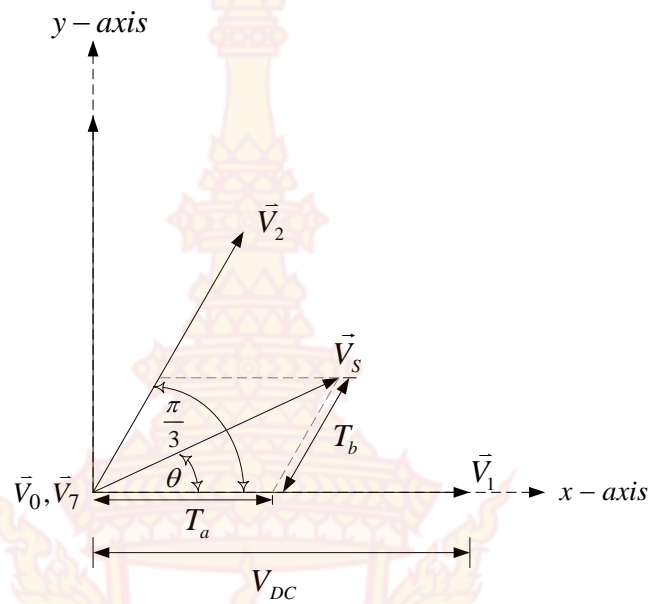
$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{V_{S\beta}}{V_{S\alpha}} \right) \quad (25)$$

วิธีที่ 2 พิจารณาจากการเกิดของเวกเตอร์  $\vec{V}_s$  ดังรูปที่ 2.13 จากรูปเป็นการพิจารณาใน Sector ที่ 1 สามารถหาเวกเตอร์  $\vec{V}_s$  ได้จากสมการที่ 26

$$\vec{V}_s = \left( \frac{T_a}{T_s} \times \vec{V}_1 \right) + \left( \frac{T_b}{T_s} \times \vec{V}_2 \right) + \left( \frac{T_{0/7}}{T_s} \times \vec{V}_{0/7} \right) \quad (26)$$

โดยที่  $T_s$  คือ Sample time มีค่าเท่ากับ  $T_s = \frac{1}{F_{PWM}}$  เมื่อ  $F_{PWM}$  คือค่าของความถี่สัญญาณ PWM จากรูปที่ 23 การทำงานของของสวิตช์นั้นมีการแบ่งออกเป็น 3 ช่วงในหนึ่งคาบเวลาของ  $T_s$  คือช่วงที่ 1 คือช่วงเวลาของ  $T_a$  ช่วงที่ 2 คือช่วงเวลาของ  $T_b$  และช่วงที่ 3 คือช่วงเวลาของ  $T_0$  และ  $T_7$  ซึ่งในช่วงที่สามนั้นจะไม่มีแรงดันเอาต์พุต ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า  $T_s = T_a + T_b + T_{0/7}$





รูปที่ 24 เวกเตอร์ไดอะแกรมของ  $\vec{V}_s$

ขั้นตอนที่ 2 หาค่าของ  $T_a$ ,  $T_b$  และ  $T_{0/7}$

พิจารณาจากรูปที่ 24 การทำงานของสวิตช์ใน Sector 1 สามารถเขียนผลรวมของช่วงเวลาการสวิตช์ได้ดังสมการที่ 27

$$(V_{DC} \times T_a) + \left( V_{DC} \times \cos \frac{\pi}{3} \times T_b \right) = |\vec{V}_s| \times \cos \theta \times T_s \quad (27)$$

หรือ

$$V_{DC} \times \sin \frac{\pi}{3} \times T_b = |\vec{V}_s| \times \sin \theta \times T_s \quad (28)$$

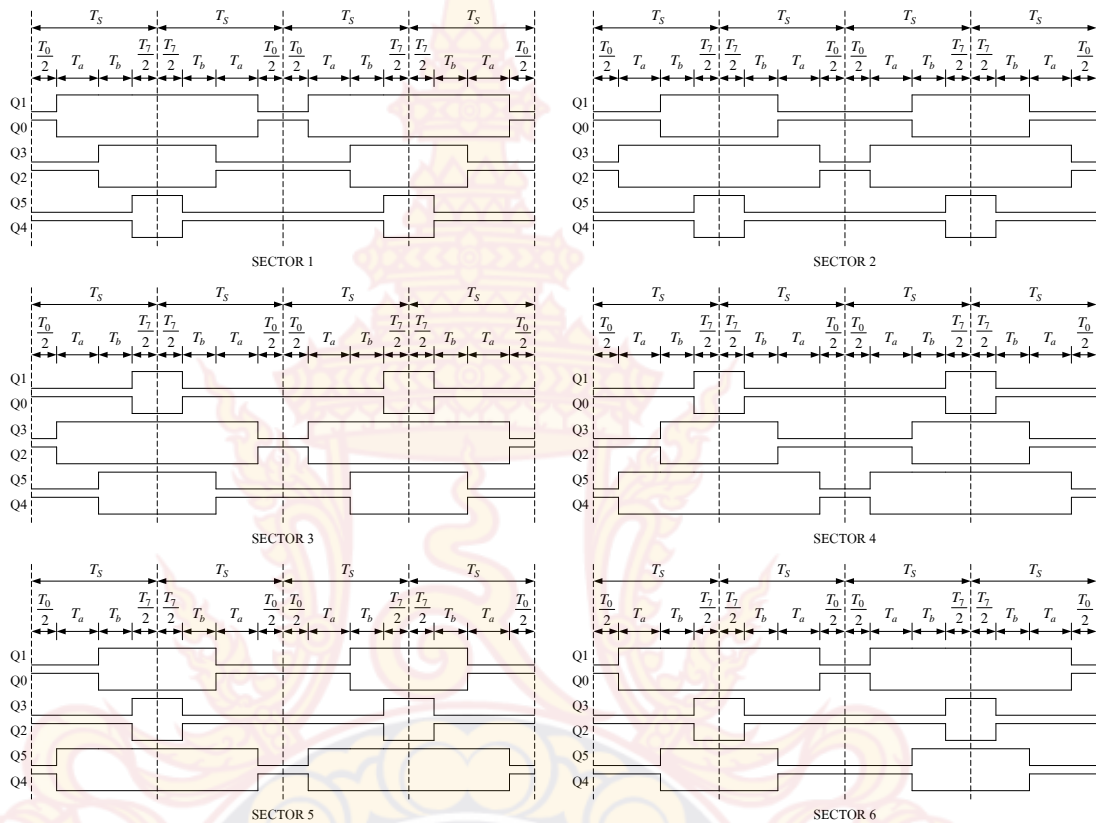
จากสมการที่ 28 และสมการที่ 29 สามารถแก้สมการเพื่อทำการหาค่าของ  $T_a$  และ  $T_b$  ได้ดังสมการที่ 30

$$\frac{T_a}{T_s} = \frac{2}{\sqrt{3}} \times m \times \sin \left( \frac{\pi}{3} - \theta \right) \quad (29)$$

$$\frac{T_b}{T_s} = \frac{2}{\sqrt{3}} \times m \times \sin \theta \quad (30)$$

$$T_{0/7} = T_s - T_a - T_b \quad (31)$$

ขั้นตอนที่ 3 หาช่วงเวลาการสวิตช์ของสวิตช์แต่ละตัว (Q0 ถึง Q6) รูปสถานะของการสวิตช์ในแต่ละเซกเตอร์แสดงดังรูปที่ 25



รูปที่ 25 รูปแบบสถานะของการสวิตช์ของแต่ละเซกเตอร์

จากหลักการที่กล่าวมาในข้างต้นนั้นจะเห็นว่าการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยเทคนิค SVM นั้นจะมีกระบวนการในการสร้างที่ซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นในการสร้างนั้นจะต้องใช้เครื่องมือที่สามารถตอบสนองในเรื่องการคำนวณ เช่น ไมโครโปรเซสเซอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือ DSP เป็นต้น ซึ่งจากการสืบค้นงานวิจัยที่ผ่าน มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสัญญาณ PWM มากมาย โดยการใช้เครื่องมือที่แตกต่างกัน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

### 2.3 กลยุทธ์และวิธีการควบคุม

จากที่กล่าวถึงในตอนต้นว่าวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นนั้น เหมือนกับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก เมื่อทำงานที่ความเร็วต่ำ ดังนั้นกลยุทธ์และวิธีการในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกนั้น สามารถนำมาปรับใช้กับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นได้ โดยวิธีการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ วิธีการควบคุมเชิงปริมาณ (Scalar Control) หรือ Volt/Hz Control และวิธีการควบคุมเวกเตอร์ (Vector Control) หรือ Field Oriented Control [11], [16] ซึ่งในงานวิจัยนี้แนะนำให้เสนอวิธีการควบคุมแบบ Scalar Control เนื่องจากต้องการพิจารณาถึงการออกแบบระบบควบคุมความเร็ว และการดำเนินการที่ไม่ซับซ้อน อีก

ทั้งแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่ใช้ในการศึกษามีขนาดพิกัดกำลังน้อย และไม่ต้องการไดนามิกส์ที่สูง

### 2.3.1 วิธีการควบคุมเชิงปริมาณ (Scalar Control) หรือ Volt/Hz Control [17]

หลักการของการควบคุมแบบ Volt/Hz อาศัยหลักการที่ว่าแรงบิด (Torque) และขนาดของเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux) แปรผันตามอัตราส่วนของขนาดของแรงดัน และความถี่ โดยพิจารณาจากสมการที่ 32 33 และ 34 ดังนี้

$$T_m = \frac{3(1-\sigma)}{2} \frac{V_s^2}{\sigma \omega_s^2 L_s} \frac{2}{S_p/S + S/S_p} = T_p \frac{2}{S_p/S + S/S_p} \quad (32)$$

เมื่อ

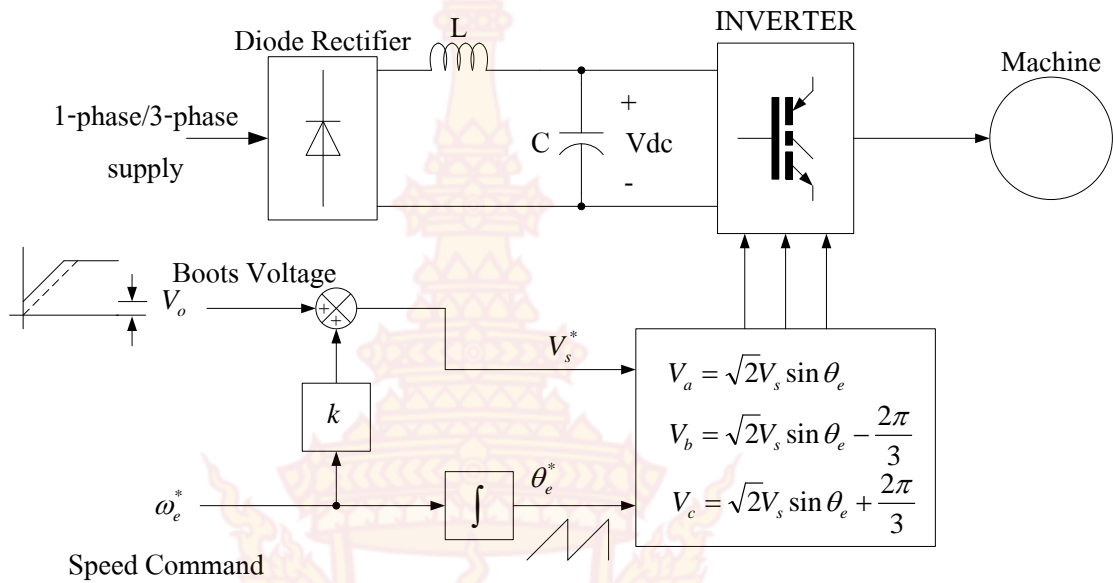
$$T_p = \frac{3(1-\sigma)}{2} \frac{V_s^2}{\sigma \omega_s^2 L_s} ; \text{ Pull-out Torque} \quad (33)$$

$$|\vec{\psi}_s| \approx \frac{|\vec{V}_s|}{2\pi f} \quad (34)$$

สมการที่ 32 นั้นเป็นสมการแรงบิดของเครื่องกลโดยทั่วไป และจากสมการที่ 33 จะเห็นว่าแรงบิดสูงสุดนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงระหว่าง แรงดัน  $V_s$  และความถี่  $\omega_s$  ดังนั้นการที่จะทำให้แรงบิดมีค่าคงที่นั้นจะต้องมีการควบคุมค่าของแรงดันและความถี่ และจากสมการที่ 34 นั้น แสดงถึงเส้นแรงแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตาม อัตราส่วนของแรงดันและความถี่เช่นเดียวกัน ดังนั้นสรุปได้ว่าการที่จะควบคุมให้แรงบิดและเส้นแรงแม่เหล็กคงที่นั้น จะต้องควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและความถี่ให้เป็นสัดส่วนกัน เมื่อทราบหลักการของการควบคุมแบบ Volt/Hz ขั้นตอนต่อไปคือการดำเนินการในการควบคุม ซึ่งการดำเนินการในการควบคุมแบบ Volt/Hz นั้นสามารถกระทำได้ 2 วิธีการคือ การควบคุมแบบวงเปิด (Open loop Volt/Hz control) และการควบคุมแบบวงปิด (Close loop Volt/Hz control)

#### 2.3.1 การควบคุมแบบ Volt/Hz แบบวงเปิด (Open loop Volt/Hz Control)

การควบคุมแรงดันแปรตามความถี่แบบวงเปิดเป็นวิธีการที่นิยมใช้งานมากที่สุด ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายและมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีการใช้งานมากในงานอุตสาหกรรม บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันแปรตามความถี่แสดงดังรูปที่ 26

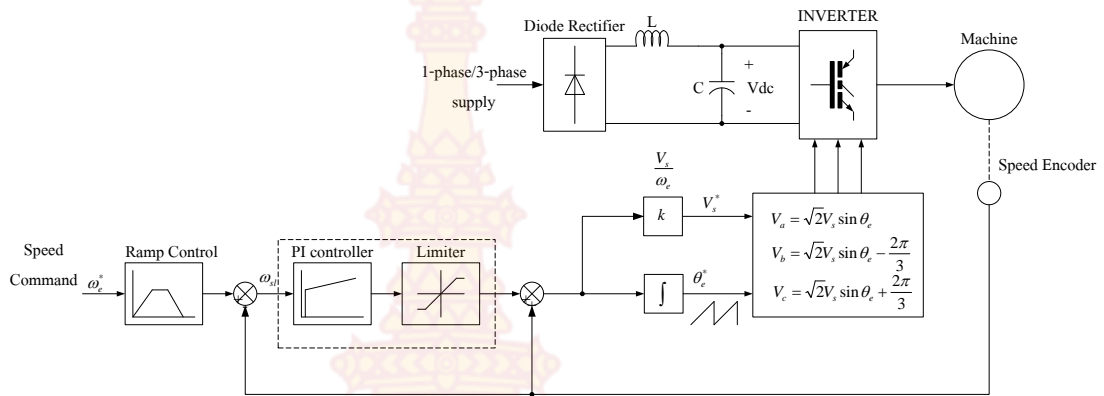


รูปที่ 26 ไดอะแกรมการควบคุมแบบ Volt/Hz ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบป้อนแรงดัน

จากรูปที่ 26 ระบบการควบคุมนั้นประกอบด้วย วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งแหล่งจ่ายกระแสสลับอาจจะเป็นแบบเฟสเดียว หรือสามเฟส วงจรกรองแบบ LC Filter วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter) จะเห็นว่าไม่มีการป้อนกลับ เนื่องจากการนำสัญญาณด้านเอาต์พุตมาใช้ในการควบคุม หลักการคือ ประมวลผลค่าความเร็ว  $\omega_e^*$  เท่ากับ  $\omega_r$  เนื่องจากความเร็วสลลิปมีค่าน้อยมากจึงไม่คำนึงถึง แรงดันเฟส  $V_s^*$  เกิดจากค่าความเร็ว  $\omega_e^*$  คูณกับค่าคงที่ที่ได้จาก  $k = \frac{V_s}{\omega_e}$  นั้นหมายถึงฟลักซ์  $\psi_s$  คงที่ และที่ค่าความถี่ต่ำค่าความต้านทานด้านสเตเตอร์จะทำให้ค่าฟลักซ์ต่ำลง ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มแรงดันในขณะที่ยังมอเตอร์ทำงานที่ความถี่ต่ำด้วยวิธีการ Boots Voltage จากนั้นทำการอินทิเกรตค่าความเร็วจะได้ค่ามุม  $\theta_e$  จากนั้นทำการสร้างแรงดันอ้างอิง  $V_a, V_b$  และ  $V_c$  นำแรงดันที่ได้สร้างสัญญาณ PWM ด้วยหลักการมอดูเลชัน

### 2.3.2 การควบคุมความเร็วด้วยการควบคุมค่าสลลิป (Speed Control with Slip Regulation)

เป็นอีกวิธีการหนึ่งในหลักการควบคุมด้วยวิธีแรงดันแปรตามความถี่ โดยการนำค่าสัญญาณความเร็วเอาต์พุตมาเป็นสัญญาณป้อนกลับให้ระบบควบคุม บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมความเร็วด้วยการควบคุมค่าสลลิป แสดงดังรูปที่ 27



รูปที่ 27 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็วแบบ Volt/Hz ด้วยการควบคุมค่าสลลิป

หากพิจารณาสมการที่ 35 การดำเนินการควบคุมแบบ Volt/Hz วงปิดนั้น ทำได้โดยการควบคุมค่าสลลิป  $S$  ให้อยู่ในช่วงที่น้อยกว่า Pull out slip  $S_p$  เนื่องจากเมื่อ  $S = S_p$  แรงบิดของมอเตอร์จะมีค่าสูงสุด หลักการของการควบคุมแบบ Volt/Hz ด้วยการควบคุมค่าสลลิป หากพิจารณาจากรูปที่ 27 มีหลักการดังนี้ เริ่มจากการปรับค่าความเร็วที่ต้องการ (Speed Command) เข้าสู่บล็อกของ Ramp Control เพื่อเพิ่มความเร็วตามจำนวนรอบการทำงานของโปรแกรม ข้อดีของ Ramp control คือช่วยลดการกระชากในขณะเริ่มเดินของมอเตอร์ จากนั้นทำการเปรียบเทียบระหว่างความเร็วที่ต้องการกับความเร็วที่วัดได้ (Speed measurement) ค่าผิดพลาด (Error) ที่ได้คือค่าความเร็วสลลิป ( $\omega_{sl}$ ) ซึ่งจะได้จากสมการ

$$\omega_{sl} = \omega_e - \omega_r \quad (35)$$

จากนั้นเข้าสู่บล็อกตัวควบคุมแบบพีไอเพื่อเป็นตัวควบคุมผลตอบสนองของระบบ จากนั้นนำค่าความเร็วสลลิปที่ได้บวกกับค่าความเร็วที่วัดได้ จะได้ความเร็วอ้างอิงหรือความเร็วของมอเตอร์ที่ต้องการ ตามสมการ

$$\omega_e = \omega_r + \omega_{sl} \quad (36)$$

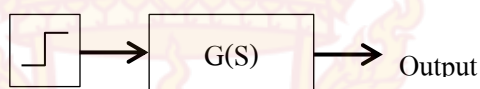
ขั้นตอนต่อไปเข้าสู่กระบวนการของการควบคุมแบบ Volt/Hz ข้อดีของการควบคุมแบบ Volt/Hz ด้วยการควบคุมค่าสลลิปคือ มีการป้อนกลับสัญญาณเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต ทำให้สามารถคงที่สัญญาณเอาต์พุตได้ สำหรับการตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตจะถูกจัดการโดยตัวควบคุม ทั้งหมดที่กล่าวมาคือหลักการในการควบคุมแบบ Volt/Hz ด้วยการควบคุมค่าสลลิป

## 2.4 การหาค่าพารามิเตอร์ระบบควบคุมแบบพีไอดีด้วยวิธีการของ Ziegler-Nichole

วิธีการนี้ถูกคิดค้นโดย Zeigler และ Nichole พนักงานบริษัท Taylor Instruments ในปี 1942 ได้นำเสนอ 2 วิธี ในการหาค่าพารามิเตอร์ระบบควบคุมแบบพีไอดี ประกอบด้วยวิธีที่ 1 เรียกว่า Reaction Curve Method และวิธีที่ 2 เรียกว่า Ultimate Sensitivity Method ซึ่งการหาค่าพารามิเตอร์ของทั้งสองวิธีนั้นไม่จำเป็นต้องทราบค่าแบบจำลองของระบบ การใช้งานเป็นดังนี้

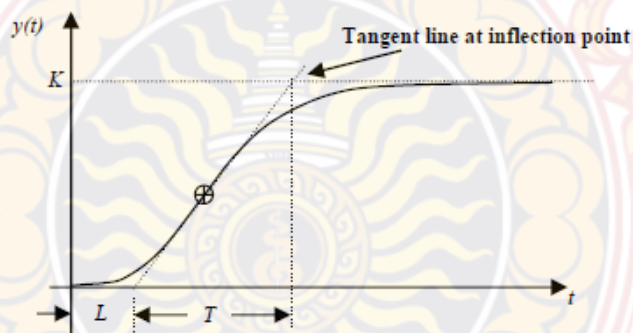
### 2.4.1 วิธีการที่ 1 Reaction Curve Method

ทำการจ่ายสัญญาณหนึ่งหน่วย (Unit-Step) ให้กับระบบที่สนใจแล้วดูผลตอบสนองของสัญญาณด้านออก แสดงดังรูปที่ 28



รูปที่ 28 บล็อกไดอะแกรมฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเปิด

สัญญาณเอาต์พุตจะต้องเป็นลักษณะ S-Curve จึงจะใช้วิธีการที่ 1 หาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม สัญญาณ S-Curve แสดงดังรูปที่ 29



รูปที่ 29 สัญญาณ S-Curve และตัวแปรที่ใช้ในการหาค่า

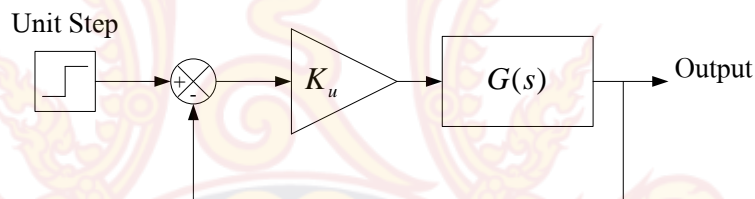
และใช้ค่าในตารางที่ 2 ในการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม

ตารางที่ 2 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบพีไอดีด้วย Ziegler-Nichole วิธีที่ 1

PID Type	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

#### 2.4.2 วิธีการที่ 2 Ultimate Sensitivity Method

เมื่อทำการหาด้วยวิธีการที่ 1 ไม่ได้จะใช้วิธีการที่ 2 ในการหาค่าพารามิเตอร์ หลักการของวิธีการที่ 2 คือ ระบบจะต้องมีการป้อนกลับสัญญาณเอาต์พุต ดังแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 30



รูปที่ 30 การต่อบล็อกไดอะแกรมวิธีการที่ 2 ของ Ziegler-Nichole

การวิเคราะห์วิธีการที่ 2 นั้นสามารถกระทำได้หลายวิธีเป้าหมายคือหาค่า  $K_u$  (Oscillate Factor) และ  $P_u$  (Oscillate Period) จากนั้นก็ใช้ตารางที่ 3 ในการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม

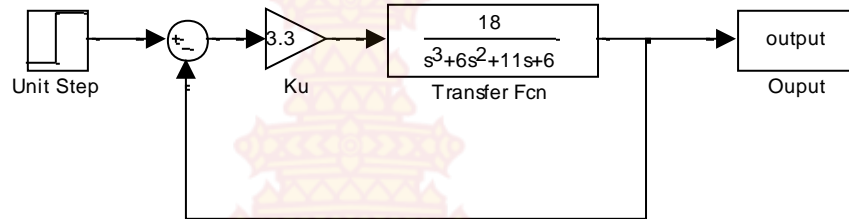
ตารางที่ 3 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบพีไอดี Ziegler-Nichole ด้วยวิธีที่ 2

PID Type	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_u$	$\infty$	0
PI	$0.45K_u$	$\frac{P_u}{1.2}$	0
PID	$0.6K_u$	$\frac{P_u}{2}$	$\frac{P_u}{8}$

โดยการนำเสนอในที่นี้จะใช้ 2 วิธีการคือ วิธีการแบบ Ultimate Sensitivity Method และ Routh Hurwitz Criterion

ตัวอย่างที่ 1 เมื่อระบบมีฟังก์ชันถ่ายโอน  $G(s) = \frac{18}{(s+1)(s+2)(s+3)}$  ใช้วิธีการแบบ

Ultimate Sensitivity Method ในการหาค่าพารามิเตอร์ระบบควบคุมแบบฟีดแบ็ค เริ่มจากการสร้างบล็อกดังรูปที่ 31



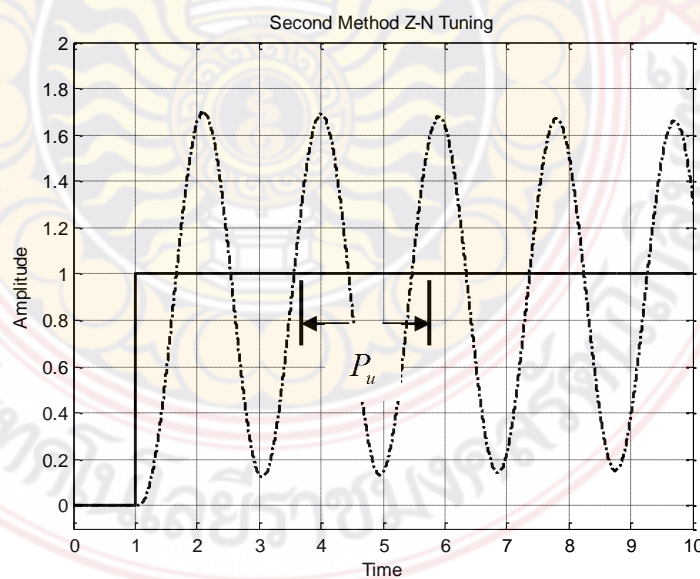
รูปที่ 31 บล็อกสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของ ZN Tuning วิธีการที่ 2

ทำการเพิ่มค่าของเกน  $K_u$  จนระบบเกิดการแกว่ง (Oscillate) ดังรูปที่ 32 โดยค่าเกนที่ทำให้การปรับจนระบบเกิดการแกว่งอย่างสม่ำเสมออยู่ที่  $K_u = 3.3$  และค่าคาบเวลาของการแกว่ง  $P_u = 1.90$  ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมฟีดแบ็คที่ได้เป็นดังนี้

$$\text{ค่า } K_p = 0.6 \times K_u = 0.6 \times 3.3 = 1.98$$

$$\text{ค่า } K_i = \frac{K_p}{T_i} \text{ เมื่อ } T_i = \frac{P_u}{2} = \frac{1.9}{2} = 0.95 \text{ ดังนั้น } K_i = \frac{1.98}{0.95} = 2.1$$

$$\text{ค่า } K_d = \frac{K_p}{T_d} \text{ เมื่อ } T_d = \frac{P_u}{8} = \frac{1.9}{8} = 0.2375 \text{ ดังนั้น } K_d = 1.98 \times 0.2375 = 0.47$$



รูปที่ 32 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการปรับค่าเกน  $k$  จนเกิดการแกว่งของระบบ



ตัวอย่างที่ 2 เมื่อระบบมีฟังก์ชันถ่ายโอน  $G(s) = \frac{18}{(s+1)(s+2)(s+3)}$  ใช้วิธีการแบบ Routh Hurwitz Criterion Method ในการหาค่าพารามิเตอร์ระบบควบคุมแบบฟีดแบ็ค การวิเคราะห์แบบเร้าท์เฮอริวิตซ์ จะใช้ตารางเร้าท์ในการวิเคราะห์

วิธีการเริ่มจากหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบ เพื่อทราบสมการคุณลักษณะ (Polynomial) ของระบบแบบวงปิด และค่าเกน  $K$  ดังนี้

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบเมื่อเพิ่มเกน  $K$  เท่ากับ  $G(s) = K \times \frac{18}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6}$

สมการคุณลักษณะของระบบได้จาก  $1 + KG(s) = 0$

ดังนั้น สมการคุณลักษณะของระบบ  $P(s) = s^3 + 6s^2 + 11s + 6 + K$  นำไปแทนตารางเร้าท์ จะได้

ตารางเร้าท์	$s^3$	1	11	0
	$s^2$	6	$6 + K$	0
	$s^1$	$60 - K$	0	0
	$s^0$	$6 + K$	0	0

จากตารางเร้าท์จะได้ค่าเกน  $K_u$  เท่ากับ 60 และได้สมการช่วยดังนี้

สมการช่วย  $6s^2 + 6 + 60 = 0$  ได้รากของสมการอยู่ที่  $\pm j3.32$  และ  $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$  สูงสุดเท่ากับ 3.32 Rad/sec ดังนั้น จะได้คาบเวลาการแกว่งเท่ากับ  $P_u = 1.89$  เมื่อทราบค่าเกน  $K_u$  และ  $P_u$  นำมาหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมฟีดแบ็ค โดยตารางที่ 3

ค่าเกนพี  $K_p = 0.6 \times K_u = 0.6 \times 60 = 36$

ค่าเกนไอ  $K_i = \frac{K_p}{T_i}$  เมื่อ  $T_i = \frac{P_u}{2} = \frac{1.89}{2} = 0.945$  ดังนั้น  $K_i = \frac{36}{0.945} = 38$

ค่าเกนดี  $K_d = \frac{K_p}{T_d}$  เมื่อ  $T_d = \frac{P_u}{8} = \frac{1.89}{8} = 0.24$  ดังนั้น  $K_d = 36 \times 0.24 = 8.5$

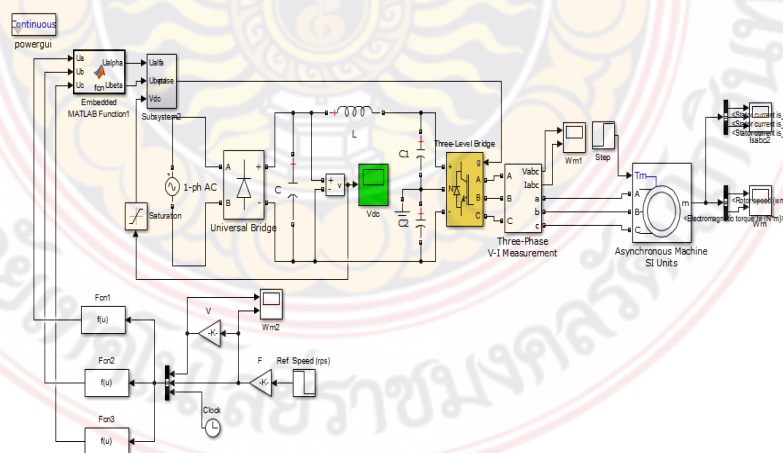
### บทที่ 3

## ขั้นตอนการปฏิบัติงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินการที่มีความเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของชุดควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า(power factor correction) และโครงสร้างของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสแบบเหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบการควบคุมเชิงปริมาณ (V/f) โดยที่ระบบควบคุมเป็นแบบวงปิด รวมถึงการจำลองการทำงานของระบบควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดและการจำลองอินเวอร์เตอร์โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บซิมูลิงค์(Matlab/Simulink) ในการจำลองรวมถึงการนำโปรแกรมห้มาใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4

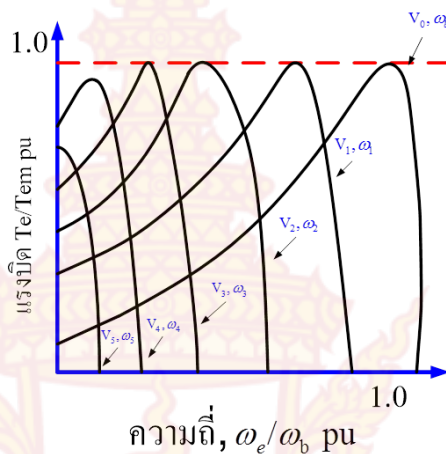
### 1. ส่วนประกอบทั้งหมดของระบบที่ดำเนินการ

รูปที่ 33 ซึ่งแสดงการจำลองการทำงานของระบบสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนใหญ่ได้ ดังนี้คือ ชุดแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง(rectifier) ระบบควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า(power factor) ระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ(inverter) มอเตอร์เหนี่ยวนำและชุดเซ็นเซอร์ ซึ่งทำหน้าที่ป้อนกลับค่า ความเร็ว กระแส แรงดันไฟฟ้า มายังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำหน้าที่ประมวลผลและควบคุมตัวประกอบกำลังและความเร็วตามลำดับ ระบบควบคุมนั้นจะประกอบด้วย ซอฟต์แวร์ และฮาร์ดแวร์ และในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างในส่วนต่างๆ ภายในระบบทั้งหมดโดยละเอียด



รูปที่ 33 ส่วนประกอบทั้งหมดของระบบที่ดำเนินการ

## 2. หลักการของระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ

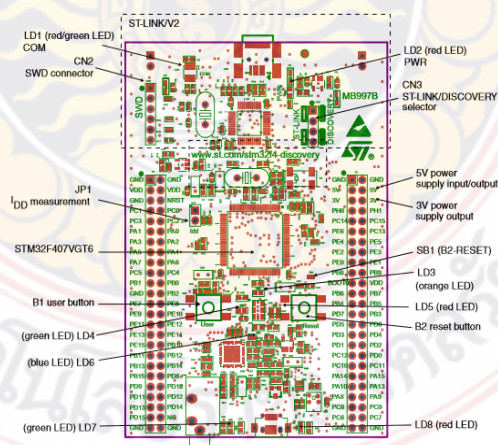


รูปที่ 34 หลักการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงปริมาณ

จากรูปที่ 34 หลักการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงปริมาณ นั้นคือต้องการรักษาแรงบิดให้คงที่เมื่อความเร็วของมอเตอร์เปลี่ยนแปลง โดยการรักษาสัดส่วนของแรงดันต่อความถี่ให้คงที่

### 2.1 การออกแบบ และสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบควบคุม

ระบบสมองกลที่นำมาใช้ในการสร้างระบบควบคุมของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นนั้น เป็นชิพตระกูล STM32F4 ดังรูปที่ 35



รูปที่ 35 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4

จุดเด่นของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลนี้คือ การรวมความสามารถทางด้านการควบคุม (MCU) และการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) ทำให้เพิ่มขีดความสามารถในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ สามารถประมวลผลได้สูงถึง 16 บิต และได้เพิ่มเติมความสามารถของโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลให้มีความละเอียดมากขึ้น และมีความเร็วในการสุ่มสัญญาณเพิ่มขึ้น ในขณะที่มีขนาดเล็กและราคาต่ำ และไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 ยังมีโมดูลและคุณสมบัติต่างๆ ที่น่าสนใจ อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับโปรแกรม matlab-semulink ซึ่งมีความจำเป็นในการนำมาใช้งานในงานวิจัยนี้

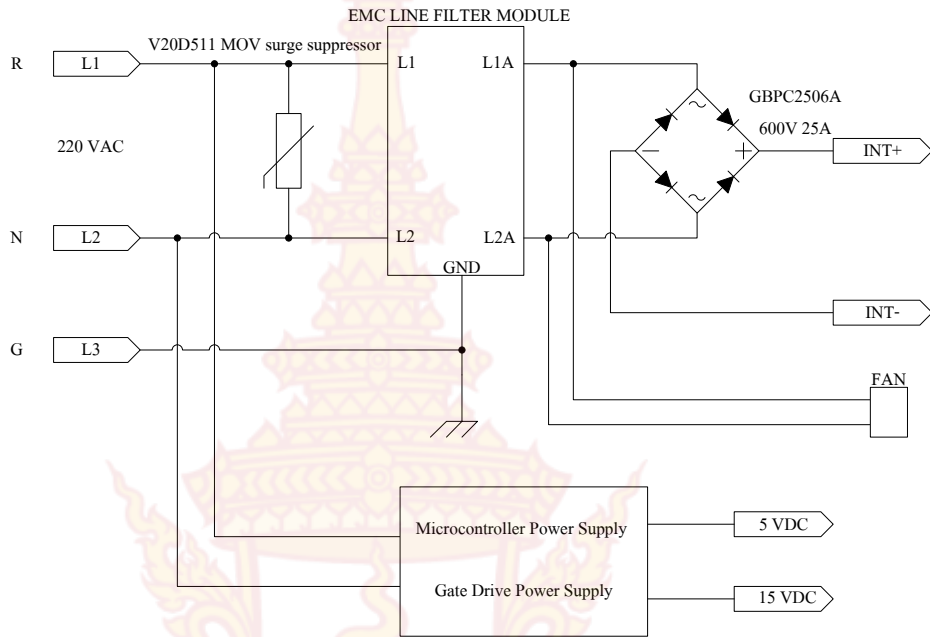
เนื่องจากระบบสมองกลนั้นเป็นอุปกรณ์ที่มีความไวต่อสัญญาณรบกวนต่างๆ เป็นอย่างมาก ยิ่งในงานควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้า นั้น จะมีสัญญาณรบกวนที่มีผลต่อระบบได้จากหลายๆทาง ดังนั้นในการออกแบบวงจรการทำงานนั้นจะต้องมีการป้องกันสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 แสดงดังรูปที่ 36



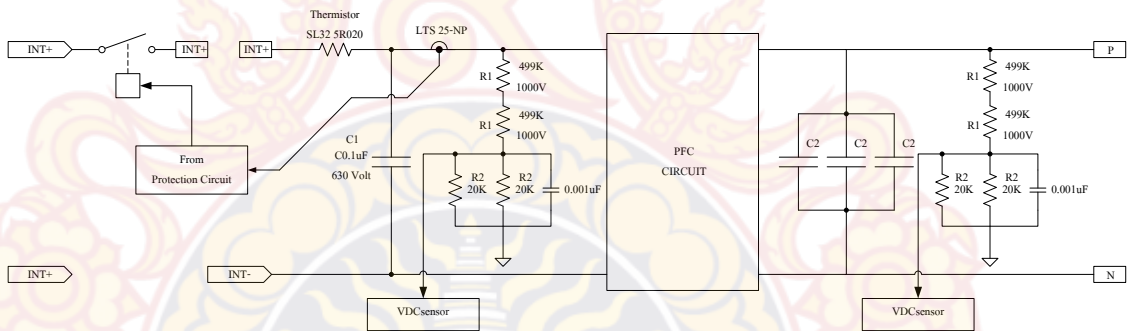
รูปที่ 36 ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4

## 2.2 ระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้า

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



รูปที่ 37 วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 38 วงจรป้องกันกระแสกระชากและวงจรกรองแรงดัน



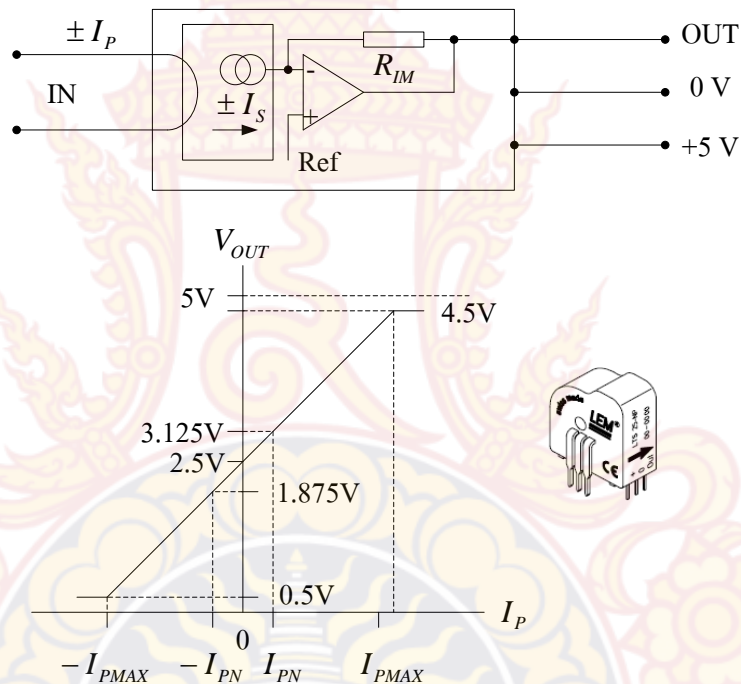
รูปที่ 39 3-phase Inverter

วงจร 3-Phase Inverter นั้นสร้างด้วยโมดูล IGBT บอร์ดอินเวอร์เตอร์ STK554U3XX

## 2.3 วงจรตรวจวัดสัญญาณ

### 1. วงจรวัดกระแส

วงจรวัดกระแสนั้นใช้สำหรับการวัดกระแสเฟสในขณะทดลองและป้องกันกระแสเกินที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่วงจร เป็นเซนเซอร์แบบ Hall Effect เบอร์ LTS 25-NP ของ LEM สามารถวัดกระแสได้สูงสุด 25 แอมแปร์ ในการออกแบบวงจรใช้นั้นจะใช้ข้อมูลจาก Data Sheet ของตัวเซนเซอร์ โดยข้อมูลที่จำเป็นในการออกแบบวงจรมานั้น แสดงดังรูปที่ 40



รูปที่ 40 วงจรใช้ประกอบการสร้างวงจรการใช้งานเซ็นเซอร์ LTS 25-NP [31]

และสามารถเลือกระดับของการวัดกระแสได้โดยใช้ตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ข้อมูลสำหรับการเลือกใช้เซ็นเซอร์กระแส LTS 25-NP

Number of primary turn	Primary nominal r.m.s. current	Nominal output voltage	Primary resistance	Primary Insertion inductance	Recommended connection
1	± 25	2.5 ± 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	

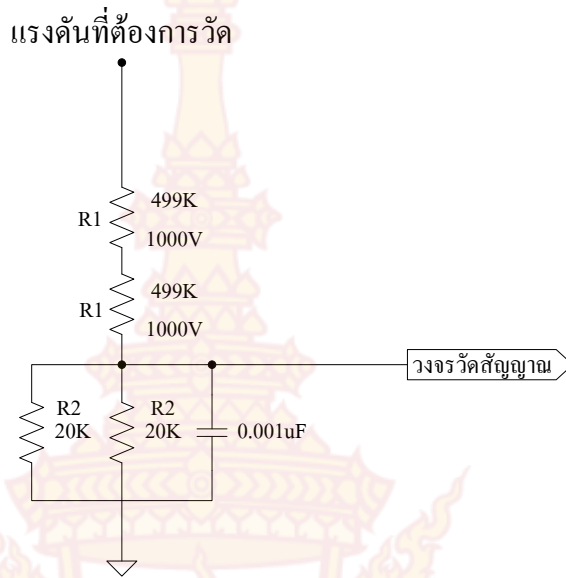
เซ็นเซอร์วัดกระแส LTS 25-NPLTS 25-NP แสดงดังรูปที่ 41



รูปที่ 41 เซ็นเซอร์วัดกระแส LTS 25-NP LTS 25-NP

## 2. วงจรการวัดแรงดัน

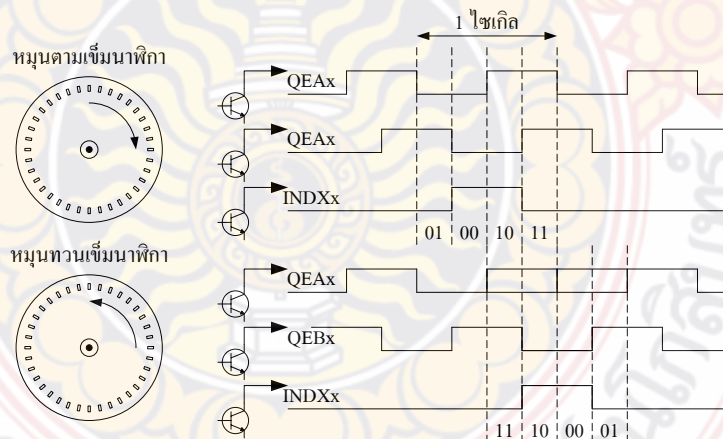
วงจรการวัดแรงดันนั้นใช้สำหรับวัดแรงดันเกินขณะที่มอเตอร์เกิดการเบรก เนื่องจากเมื่อเกิดการเบรกของมอเตอร์นั้นจะมีแรงดันกระแสตรงในบัสสูงขึ้น จะส่งผลให้วงจรกรองกระแสเกิดความเสียหายได้ วงจรการวัดแรงดันที่สร้างขึ้นใช้หลักการแบ่งแรงดัน ดังรูปที่ 42



รูปที่ 42 วงจรวัดแรงดัน

### 3. วงจรเซนเซอร์วัดความเร็ว

ในการสร้างระบบการขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบวงปิดนั้นจำเป็นต้องมีการวัดค่าความเร็ว เพื่อใช้เป็นตัวอ้างอิงในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ โมดูล QEI ย่อมาจาก Quadrature Encoder Interface หรือโมดูลเชื่อมต่อตัวเข้ารหัสแบบควอดราเจอร์ วงจรเข้ารหัสแบบควอดราเจอร์ จะให้ผลของสัญญาณ 2 เฟสคือ เฟส A และ B โดยสัญญาณทั้งสองจะมาเฟสต่างกัน 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 43

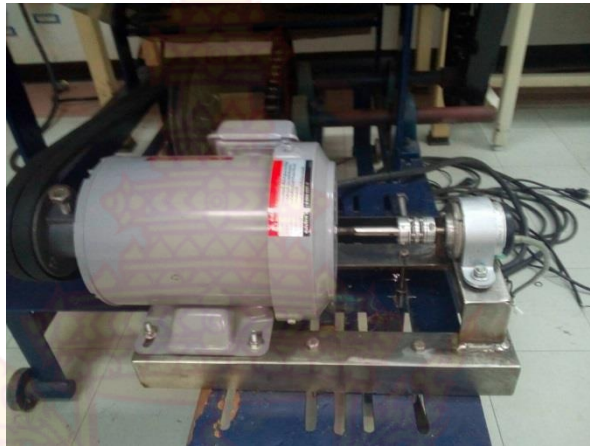


รูปที่ 43 สัญญาณที่ได้จาก Quadrature Encoder Interface

โมดูลของ STM32F4 นั้นได้รับการออกแบบมาให้สามารถเชื่อมต่อกับตัวเข้ารหัสแบบอินครีเมนตัล โดยภายในโมดูลประกอบด้วยตัวถอดรหัสควอดราเจอร์เพื่อแปลหรือตีความของสัญญาณเฟส A, B และทิศทางของตัวนับขึ้น-ลงเป็นค่าของการนับ เพื่อใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งและ



ความเร็วในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ นอกจากนั้นยังมีวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลเพื่อขจัดสัญญาณรบกวนที่อาจปะปนเข้ามาทางอินพุต การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับความเร็วแสดงดังรูปที่ 44



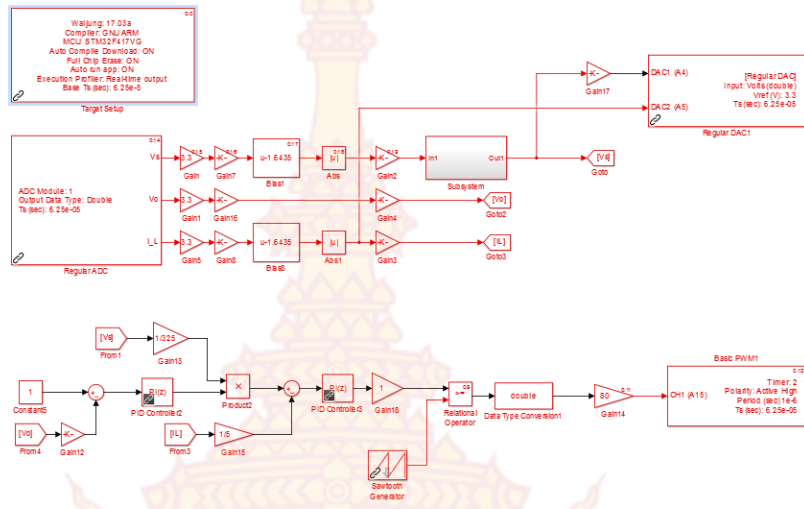
รูปที่ 44 Encoder เบอร์ AEDB-9140-A13

### 3. การออกแบบซอฟต์แวร์

โปรแกรมควบคุมการทำงานที่ทำการเขียนขึ้นนั้น เขียนโดยโปรแกรม matlab-simulink เป็นตัว Editor และ vjunc เป็นตัว Compiler โดยทำการแบ่งไฟล์โปรแกรมออกดังนี้

- ไฟล์โปรแกรมหลัก
- ไฟล์โปรแกรมอ่านค่าจากโมดูลแปลงสัญญาณ ADC
- ไฟล์โปรแกรม Ramp Control
- ไฟล์โปรแกรมกำเนิดสัญญาณ SVPWM
- ไฟล์โปรแกรม V/f
- ไฟล์โปรแกรมระบบควบคุมแบบพีโอ

ซึ่งโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 45

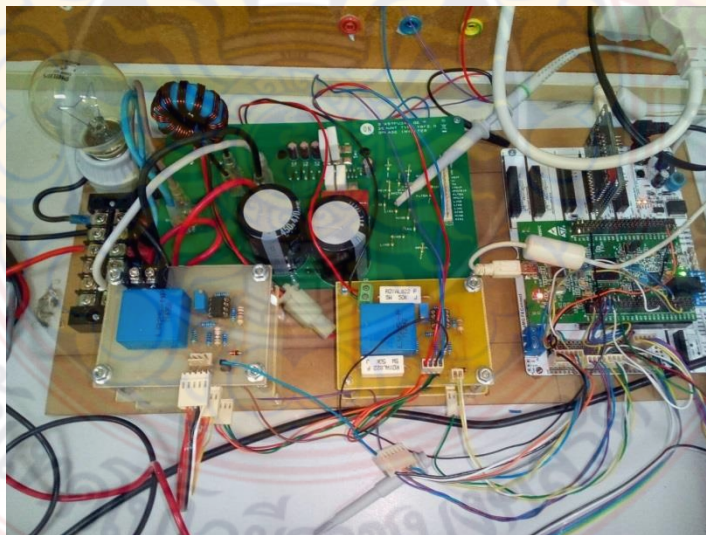


รูปที่ 45 โปรแกรมการทำงานของระบบ

ในการเขียนโปรแกรมสำหรับระบบควบคุมนั้นใช้ Matlab-Simulink ร่วมกับ Wajung ซึ่งถูกพัฒนาโดยบริษัท Amajin เพื่อเชื่อมต่อกับ stm32 ดังแสดงในรูปที่ 45

#### 4. เครื่องจักรรีดยางไฟฟ้าและระบบควบคุม

รูปที่ 46 แสดงชุดควบคุมตัวประกอบกำลังและอินเวอร์เตอร์ ส่วนรูปที่ 47 แสดงเครื่องจักรรีดยางไฟฟ้า



รูปที่ 46 ชุดควบคุมตัวประกอบกำลังและอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 47 เครื่องจักรรีดยางไฟฟ้า



## บทที่ 4

### ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบพีไอ ด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีของ Ziegler และ Nichole ผลการทดสอบเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ควบคุมแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่สร้างขึ้น และการทำงานของระบบสมองกลที่ทำการสร้างขึ้น

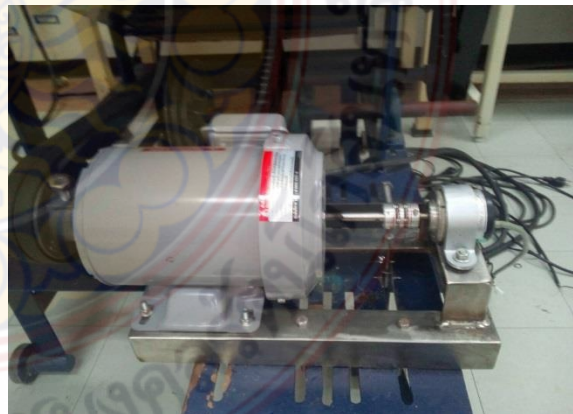
#### 1. เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. ออสซิลโลสโคป Tektronix TDS2014B และ KEYSIGHT MSOX4024A
2. โวลต์มิเตอร์ Fluke 867B
3. Tektronix A622 AC/DC Current probe
4. Induction Motor ขนาด 1 HP ( 746 W )

ชุดต้นแบบระบบควบคุมและชุดมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 48(ก) และ 48(ข) ซึ่งระบบควบคุมนั้นประกอบด้วยชุดควบคุมมุมกำลังและชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบปรับรูปร่างแม่เหล็กในส่วนของมอเตอร์นั้นใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า



(a)

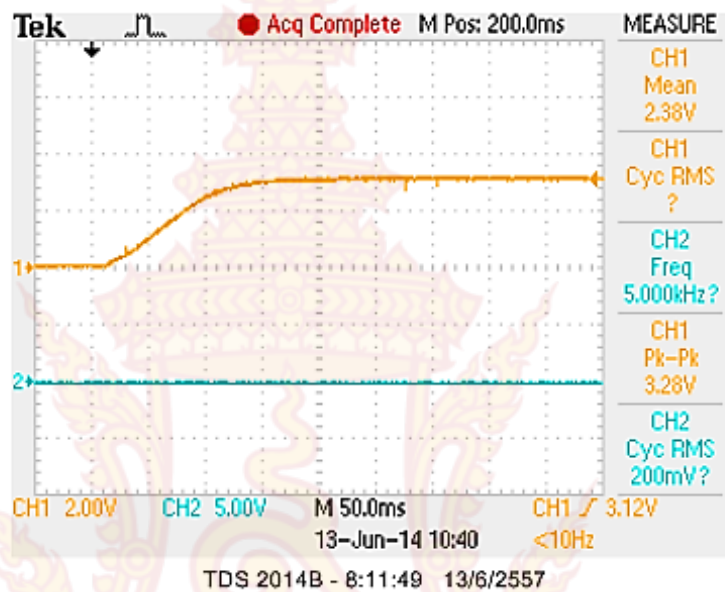


(b)

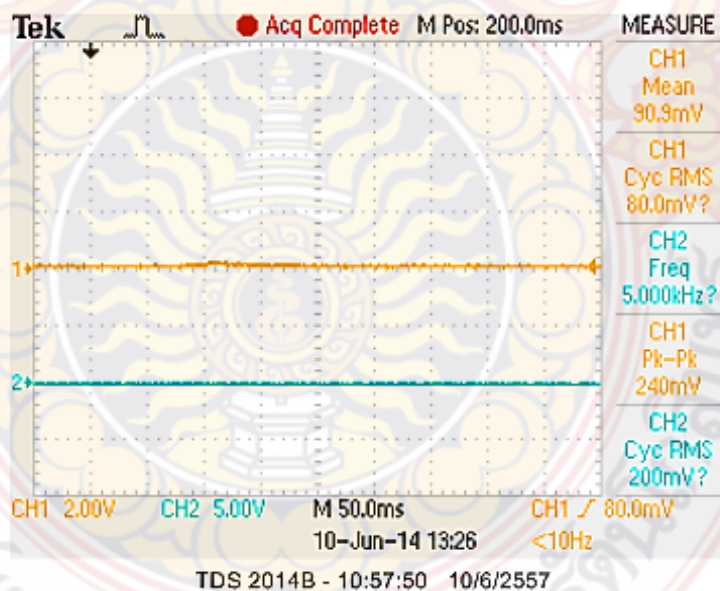
รูปที่ 48 ชุดต้นแบบระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ

## 2. ผลการทดสอบความเร็ว และแรงบิดของมอเตอร์

2.1 ทดสอบมอเตอร์ที่ความเร็ว 1490 r/min และแรงบิดเท่ากับ 0 N-m

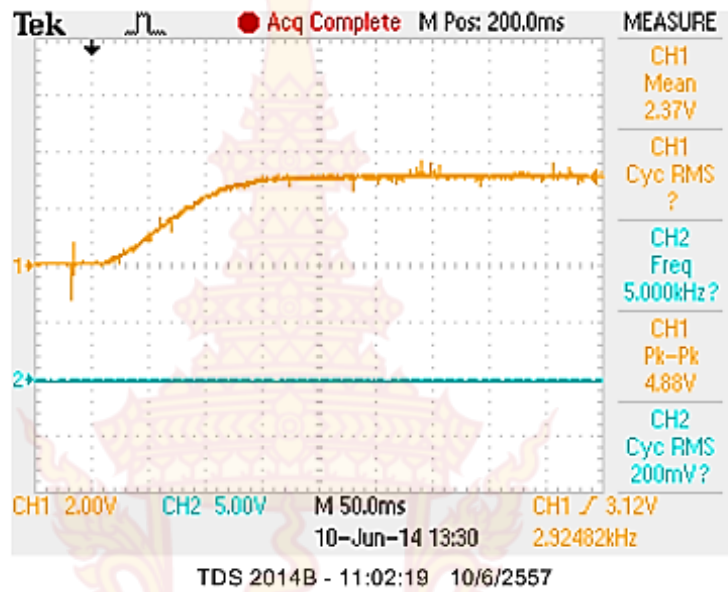


รูปที่ 49 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1490 r/min

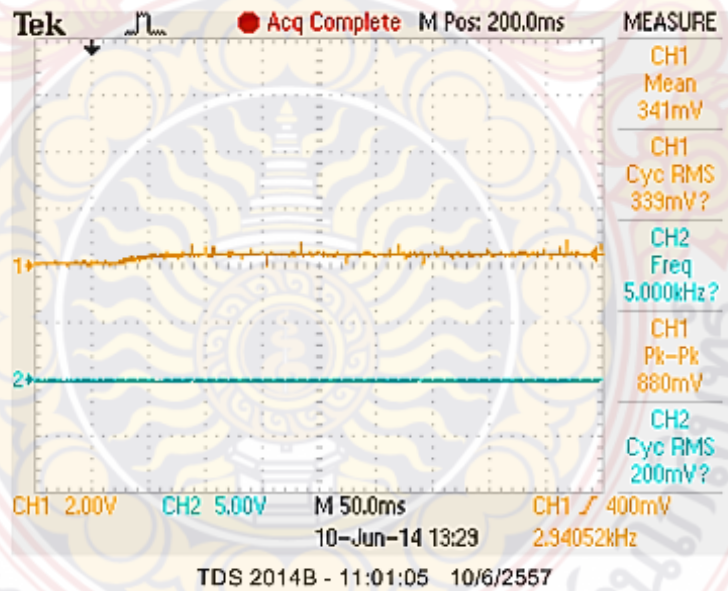


รูปที่ 50 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0 N-m

2.2 ทดสอบมอเตอร์ที่ความเร็ว 1488 r/min และแรงบิดเท่ากับ 0.1 N-m

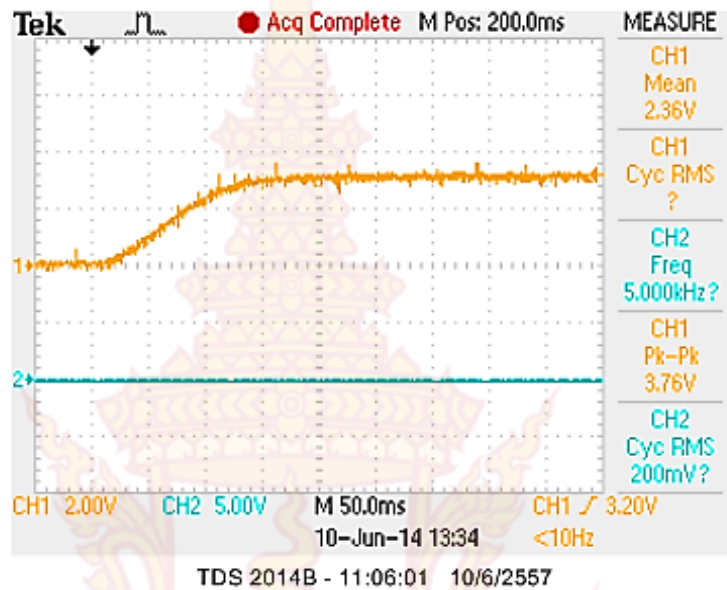


รูปที่ 51 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1488 r/min

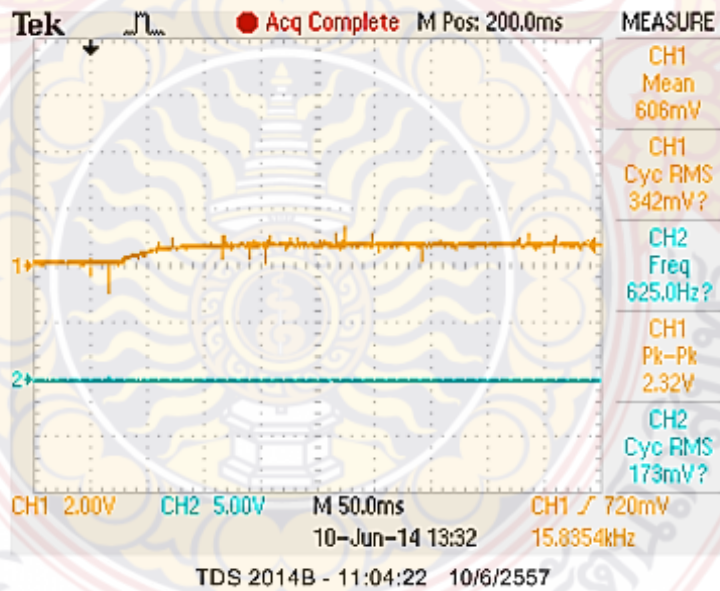


รูปที่ 52 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0.1 N-m

2.3 ทดสอบมอเตอร์ที่ความเร็ว 1485 r/min และแรงบิดเท่ากับ 0.2 N-m

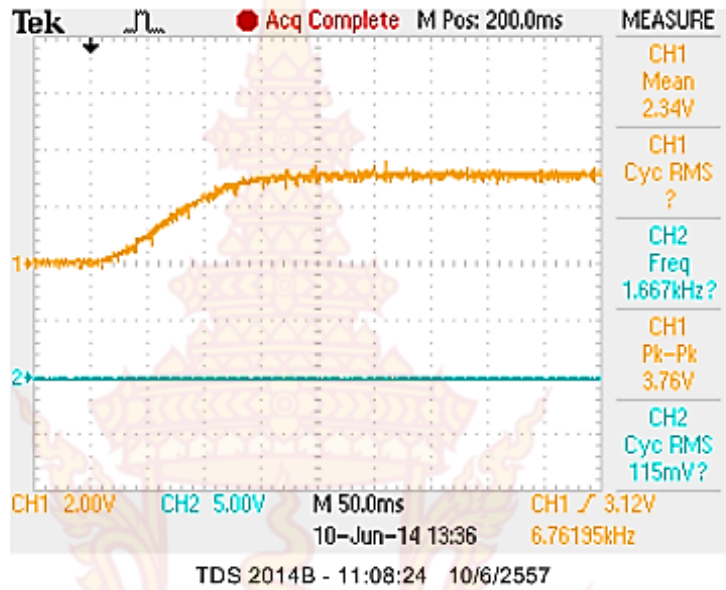


รูปที่ 53 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1485 r/min

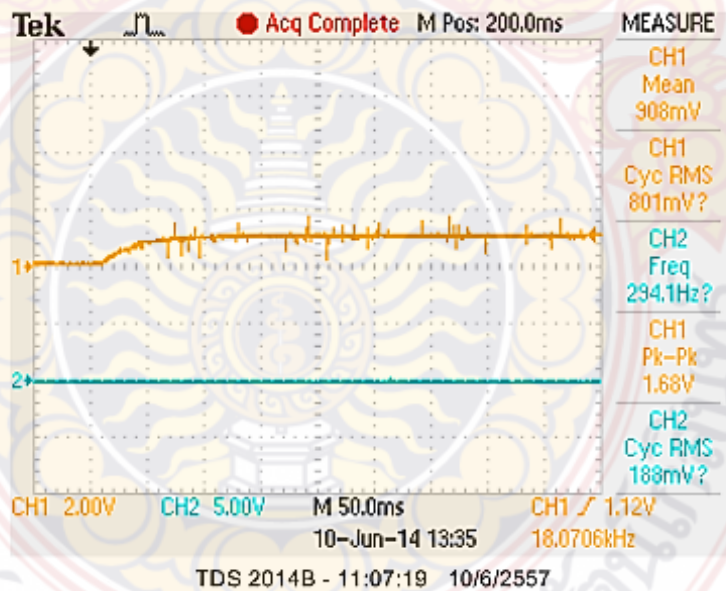


รูปที่ 54 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0.2 N-m

2.4 ทดสอบมอเตอร์ที่ความเร็ว 1482 r/min และแรงบิดเท่ากับ 0.3 N-m



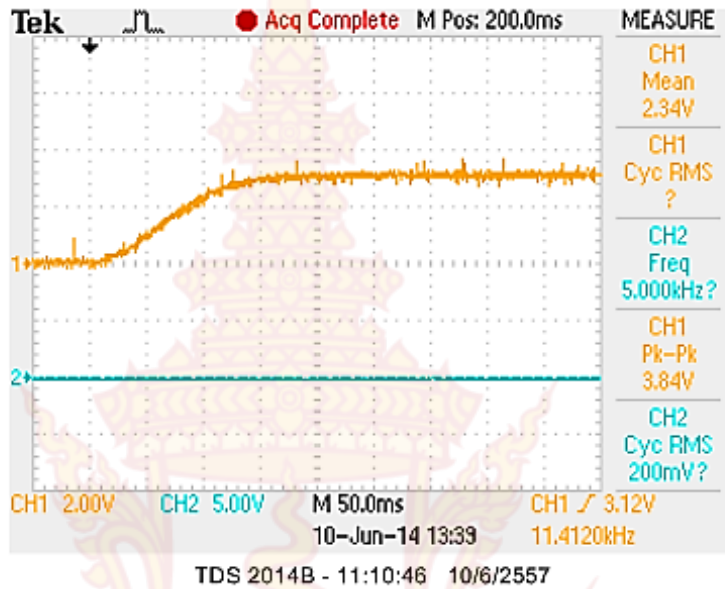
รูปที่ 55 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1482 r/min



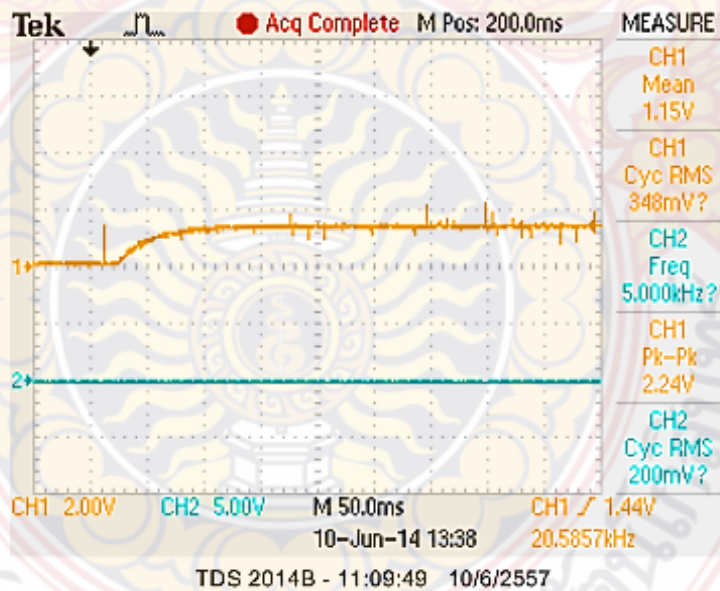
รูปที่ 56 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0.3 N-m



2.5 ทดสอบมอเตอร์ที่ความเร็ว 1479 r/min และแรงบิดเท่ากับ 0.4 N-m

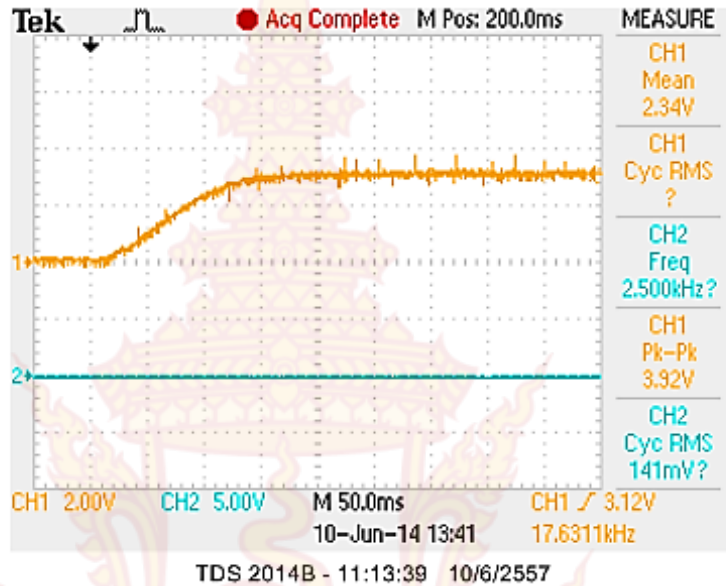


รูปที่ 57 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1479 r/min

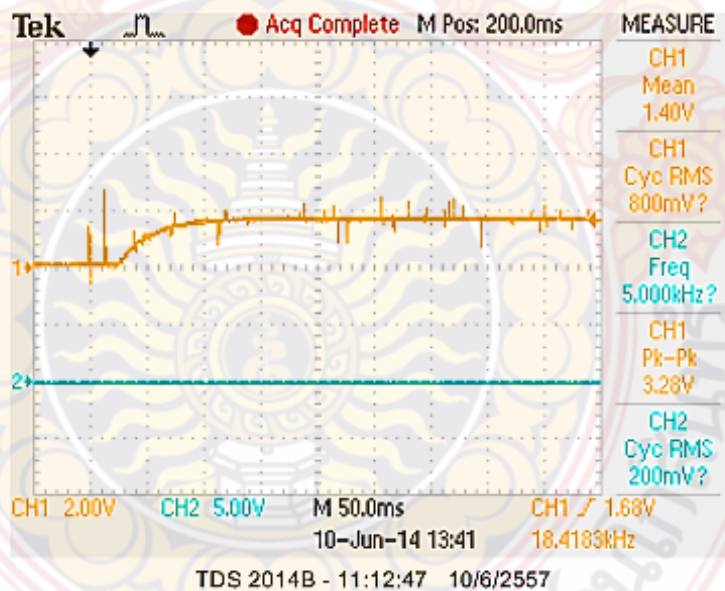


รูปที่ 58 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0.4 N-m

2.6 ทดสอบมอเตอร์ที่ความเร็ว 1477 r/min และแรงบิดเท่ากับ 0.5 N-m

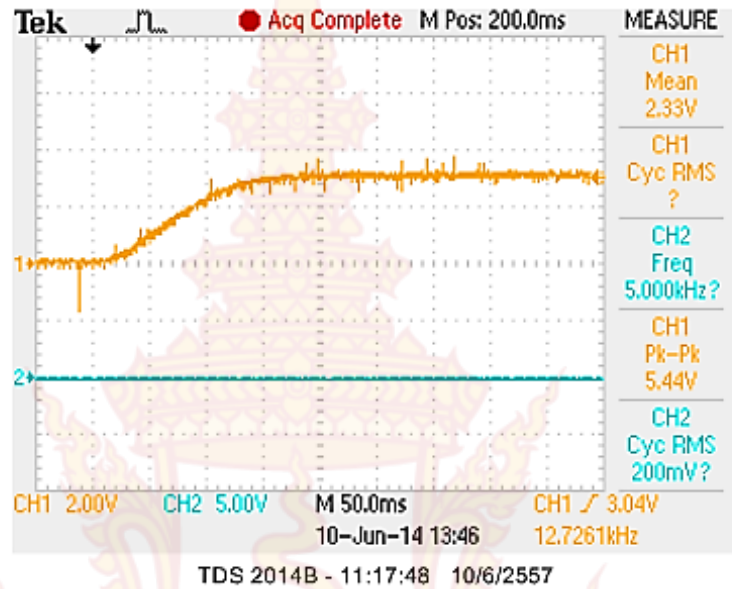


รูปที่ 59 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1477 r/min

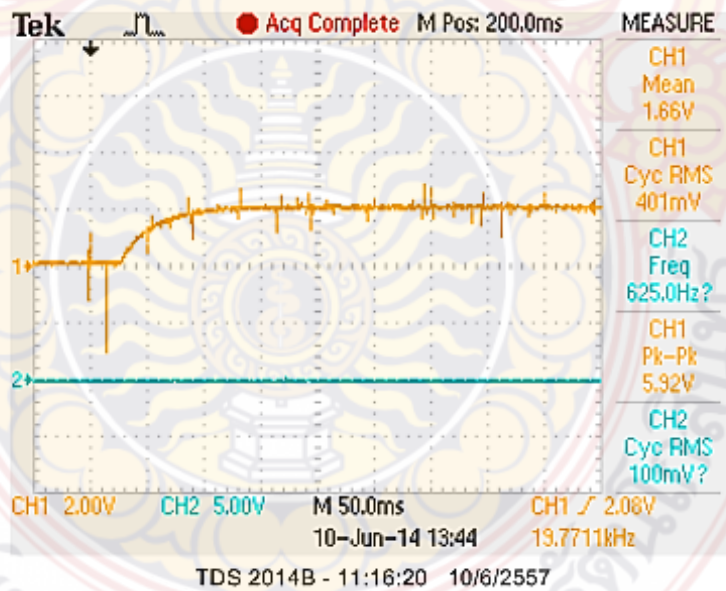


รูปที่ 60 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0.5 N-m

2.7 ทดสอบมอเตอร์ที่ความเร็ว 1474 r/min และแรงบิดเท่ากับ 0.6 N-m

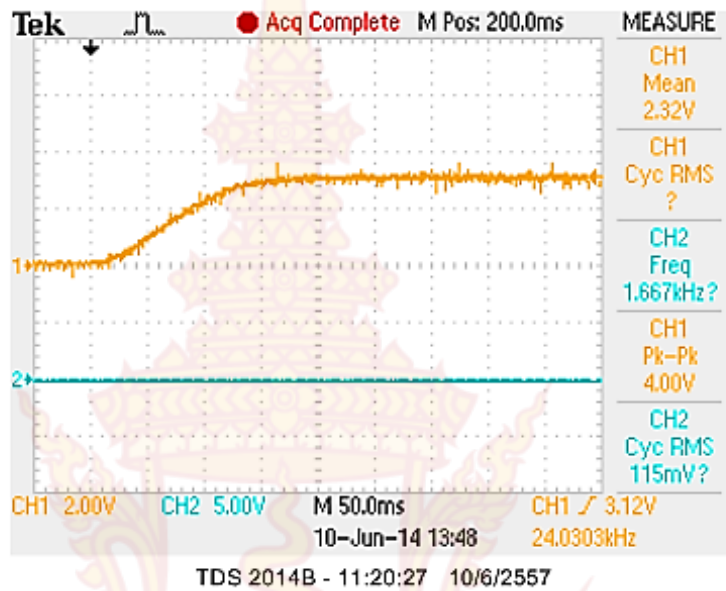


รูปที่ 61 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1474 r/min

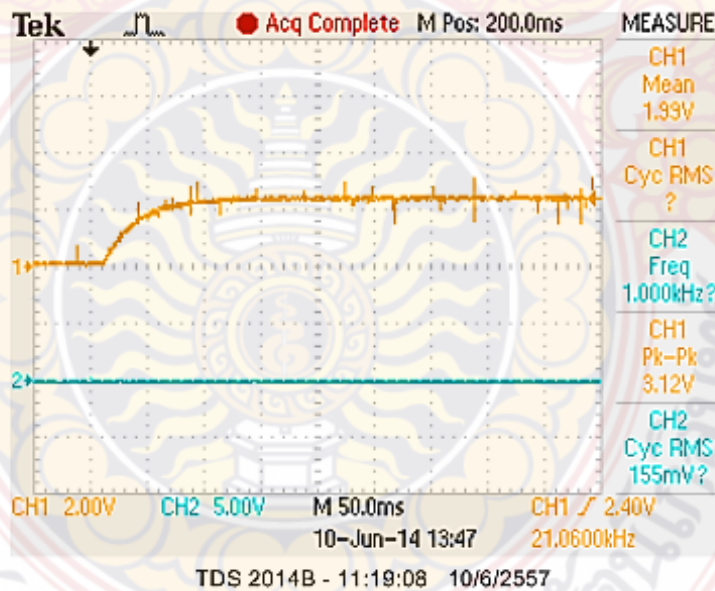


รูปที่ 62 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0.6 N-m

2.8 ทดสอบมอเตอร์ที่ความเร็ว 1471 r/min และแรงบิดเท่ากับ 0.7 N-m

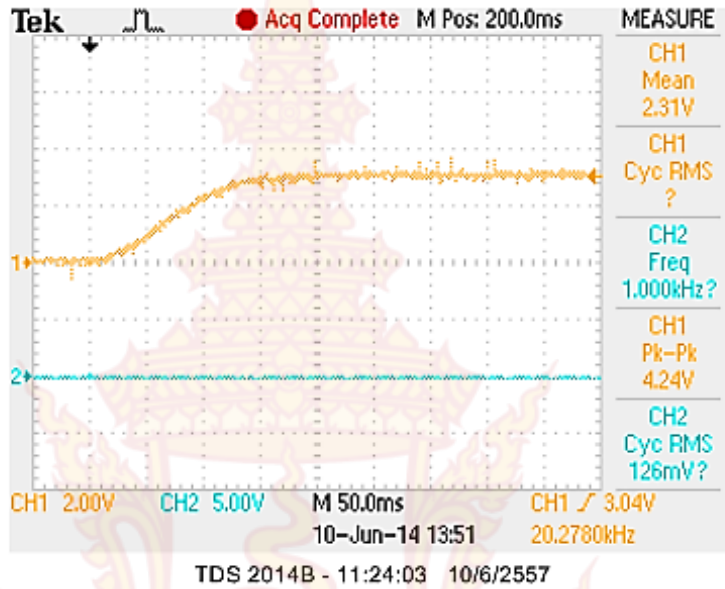


รูปที่ 63 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1471 r/min

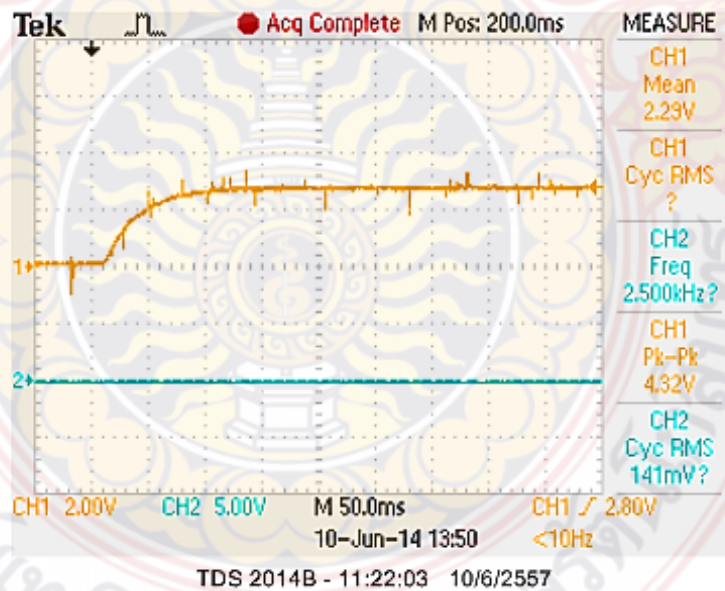


รูปที่ 64 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0.7 N-m

2.9 ทดสอบมอเตอร์ที่ความเร็ว 1467 r/min และแรงบิดเท่ากับ 0.8 N-m

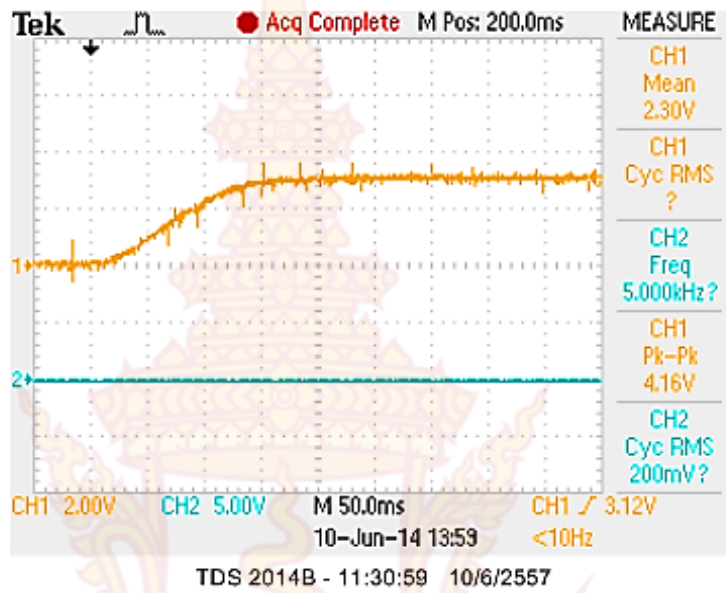


รูปที่ 65 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1467 r/min

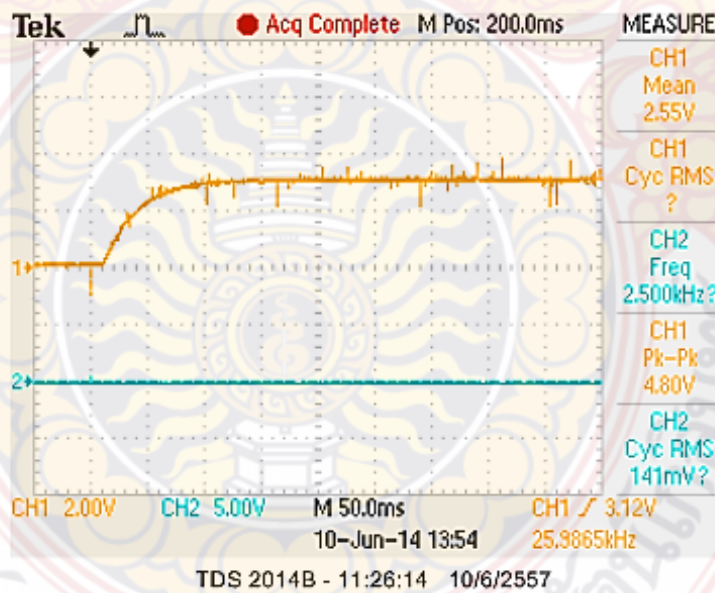


รูปที่ 66 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0.8 N-m

2.10 ทดสอบมอเตอร์ที่ความเร็ว 1464 r/min และแรงบิดเท่ากับ 0.9 N-m

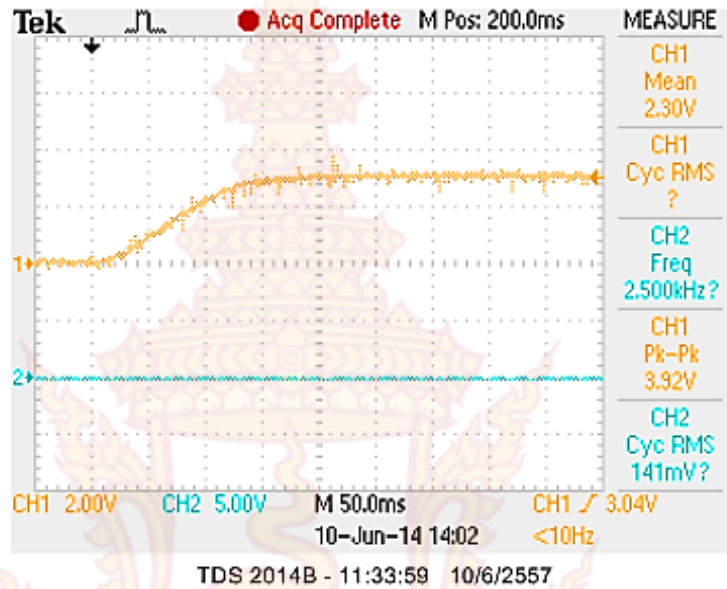


รูปที่ 67 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1464 r/min

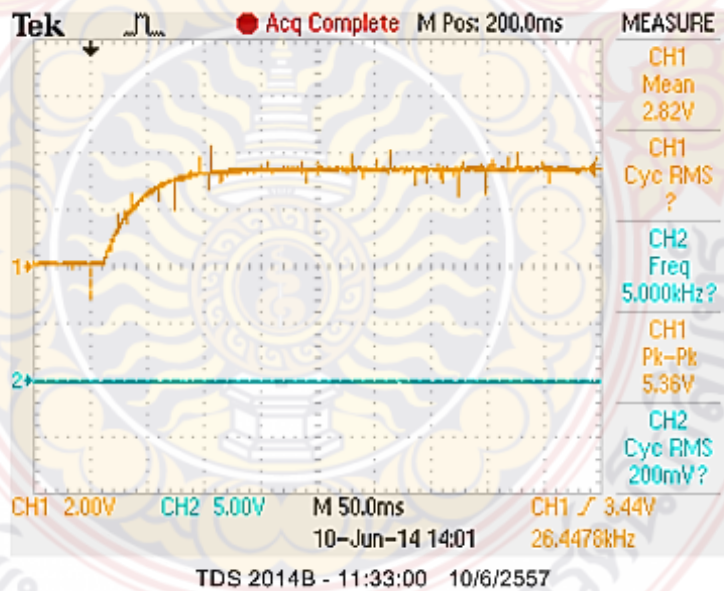


รูปที่ 68 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 0.9 N-m

2.11 ทดสอบมอเตอร์ที่ความเร็ว 1461 r/min และแรงบิดเท่ากับ 1.0 N-m



รูปที่ 69 สัญญาณของความเร็วมอเตอร์ขณะสตาร์ทที่ความเร็ว 1461 r/min

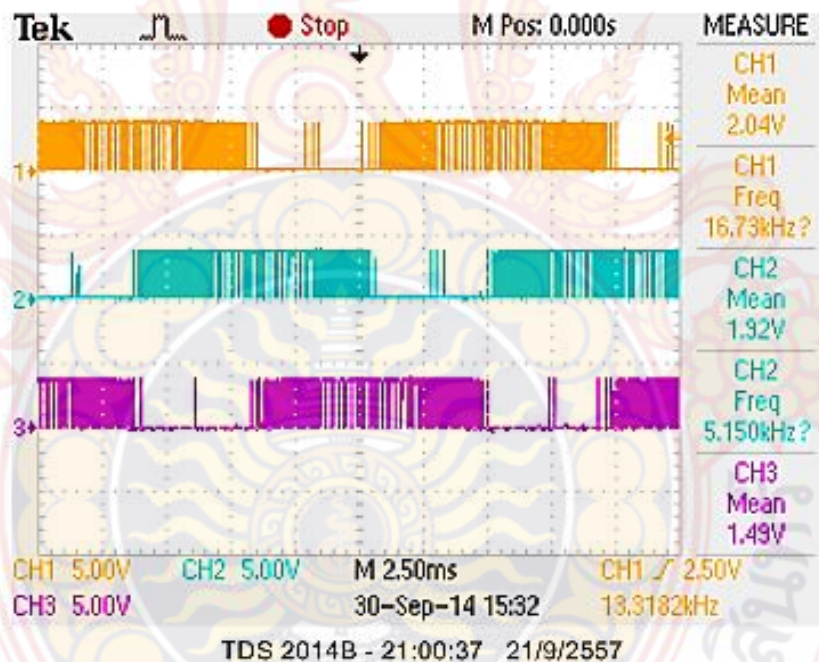


รูปที่ 70 สัญญาณของแรงบิดที่แรงบิดเท่ากับ 1.0 N-m

### 3. ผลการทดลองการสร้างสัญญาณ SPWM โดย STM32F4

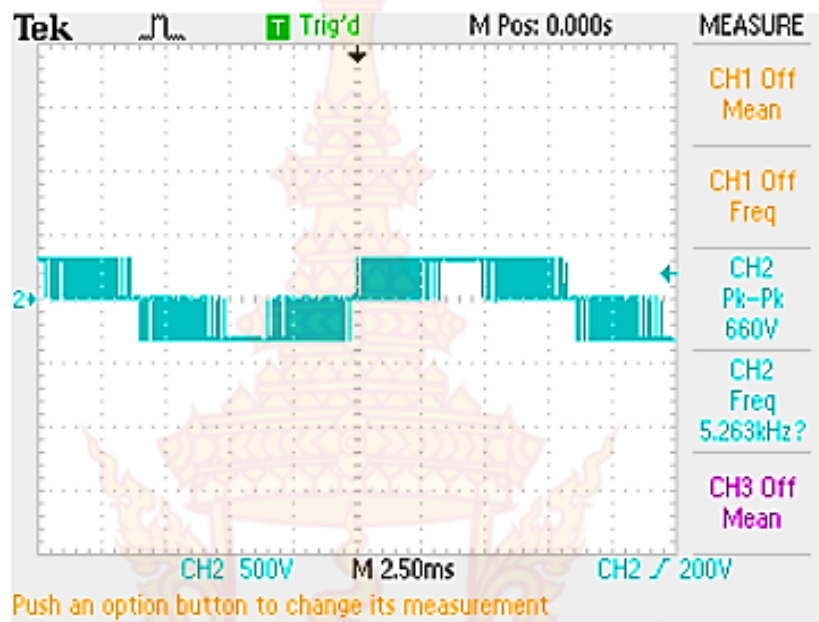
ในการสวิตช์การทำงานของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (IGBT) นั้น ใช้เทคนิคการสวิตช์แบบสัญญาณ PWM ด้วยเทคนิค Space Vector Modulation (SVM) ซึ่งทำการสร้างสัญญาณโดยสมองกล STM32F4

การทดลองเริ่มจากการวัดสัญญาณ PWM ที่สร้างด้วยเทคนิค SVPWM สัญญาณ PWM ของ STM32F4 นั้นมีขนาด 3.3 โวลต์ สัญญาณที่สร้างขึ้นมีขนาดความถี่ 16 กิโลเฮิร์ตซ์ แสดงดังรูปที่ 71 ผลการวัดสัญญาณที่ได้มีความสมบูรณ์ จากนั้นทำการวัดค่าเวลาวิฤต (Dead Time) เนื่องจากการทำงานของสวิตช์แต่ละตัวนั้น สวิตช์จะต้อง ON และ OFF สนิท มิฉะนั้นจะเกิดค่าสูญเสียในการสวิตช์ ดังนั้นจะต้องมีช่วงเวลาที่ไม่ให้สวิตช์ ON และ OFF สนิท เรียกช่วงเวลานี้ว่า Dead Time โดยแสดงดังรูปที่ 72 และ 73

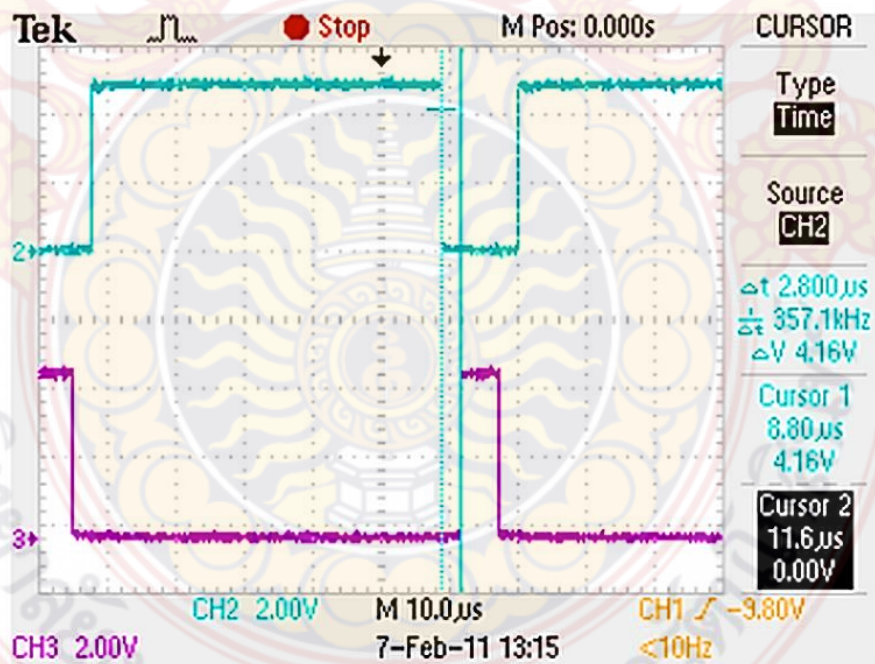


รูปที่ 71 สัญญาณ PWM ของ STM32F4

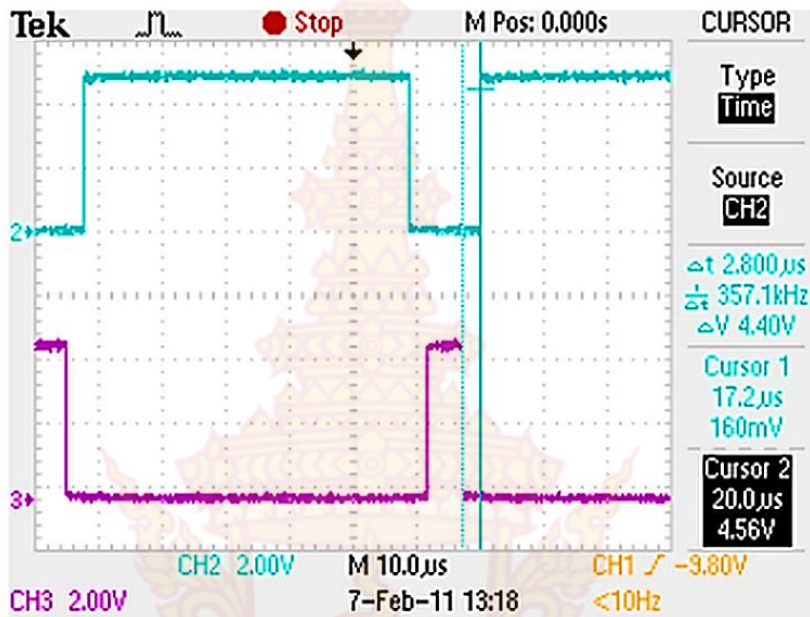




รูปที่ 72 สัญญาณที่จะนำไปขับมอเตอร์

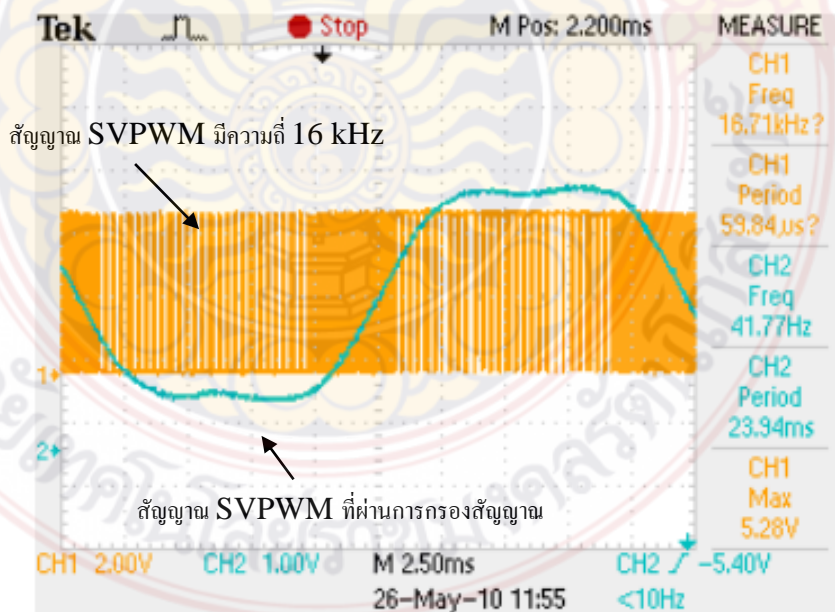


รูปที่ 73 เวลาวิกฤต (Dead Time) ด้านหน้าขนาด 2.8 ไมโครวินาที

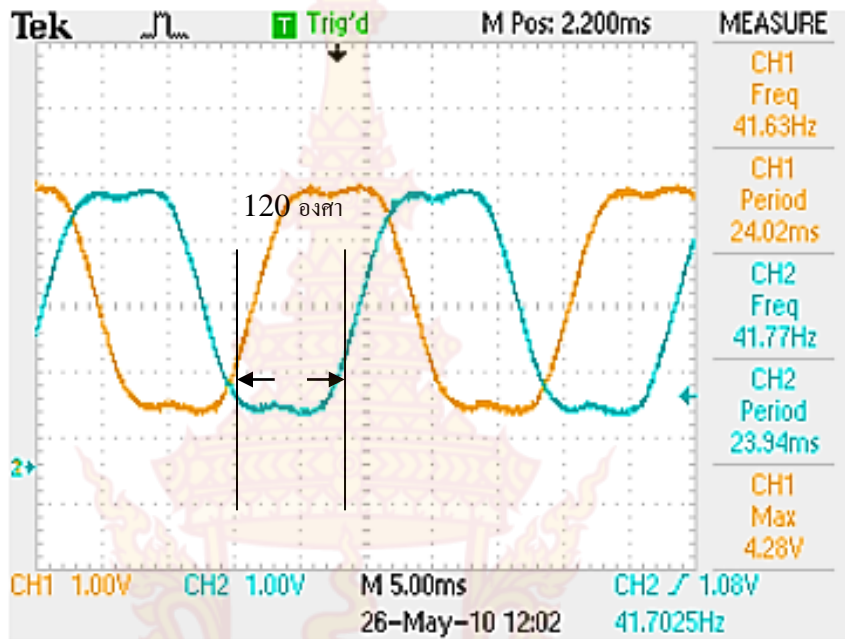


รูปที่ 74 เวลาวิกฤต (Dead Time) ด้านหลังขนาด 2.8 ไมโครวินาที

ลำดับถัดไปทำการวัดสัญญาณ SVPWM ระหว่างสัญญาณที่ยังไม่ได้ผ่านการกรอง และสัญญาณที่ได้ผ่านการกรองสัญญาณแล้ว ผลการวัดแสดงดังรูปที่ 75 โดยสัญญาณ SVPWM ที่ผ่านการกรองสัญญาณแล้วจะมีรูปร่างเหมือนสัญญาณฮาร์มอนิกส์ที่สามของสัญญาณไซน์ และทำการวัดสัญญาณที่สร้างขึ้นจะต้องมีความต่างเฟสกัน 120 องศาทางไฟฟ้า สัญญาณที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 76

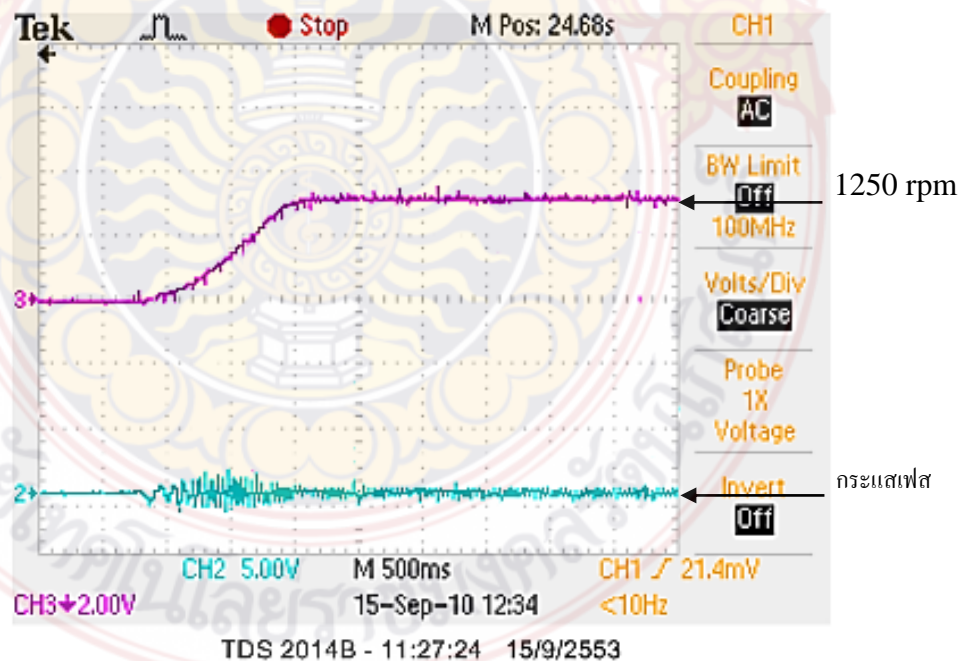


รูปที่ 75 สัญญาณ SVPWM ที่เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ผ่านวงจรกรองความถี่

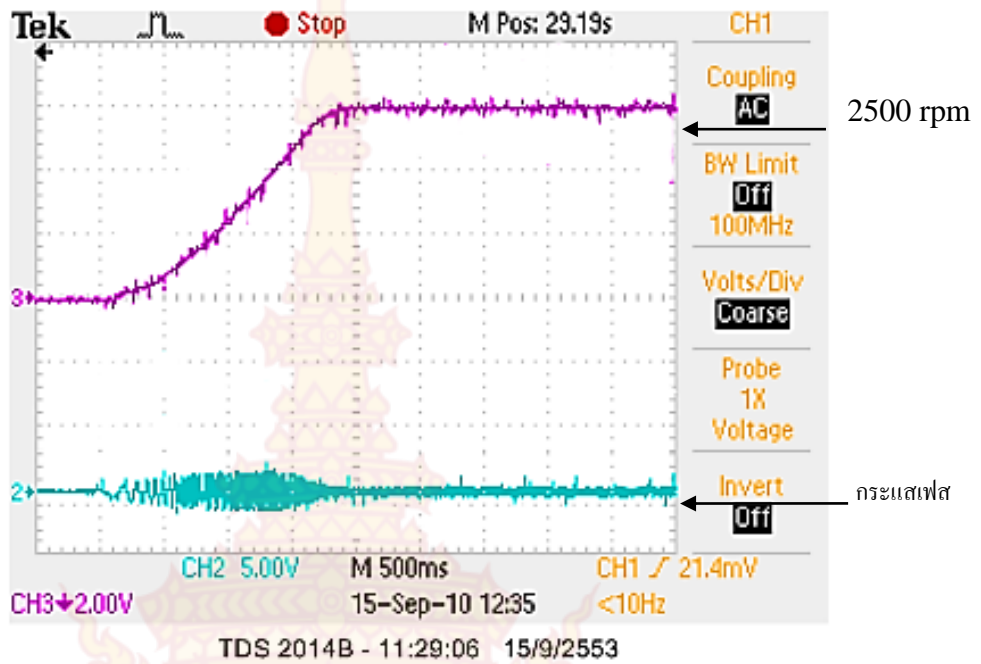


รูปที่ 76 สัญญาณเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ต่างเฟสกัน 120 องศา

ทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยทำการปรับค่าความเร็วที่ 1250 rpm ในขณะที่ไม่มีโหลด ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 77 สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่ 1250 rpm ได้ และเพิ่มความเร็วเป็น 2500 rpm ขณะไม่มีโหลด ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 78

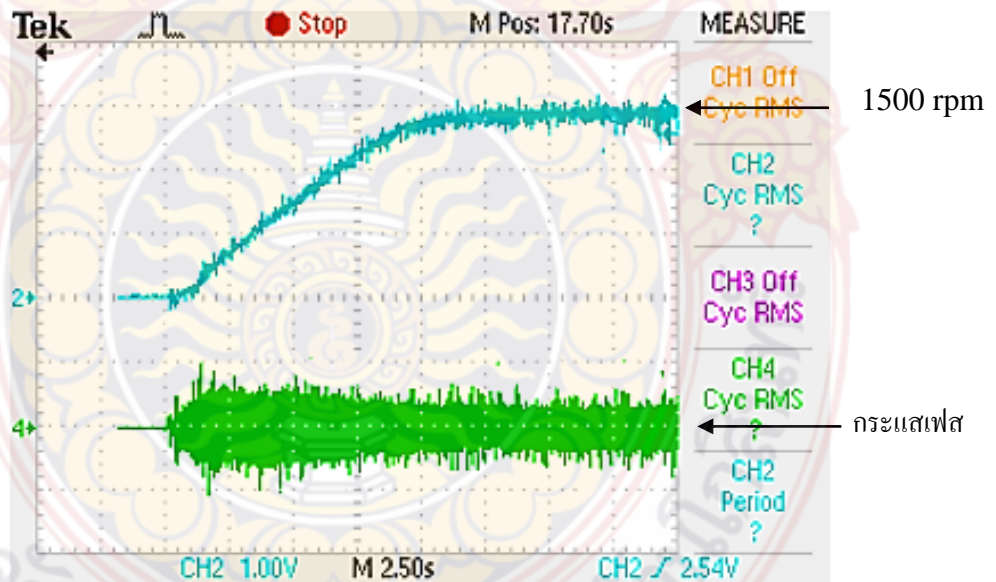


รูปที่ 77 ผลตอบสนองความเร็วและกระแสเฟสโดยทำการปรับความเร็วอ้างอิงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เซิงเส้นที่ 1250 rpm ขณะไม่มีโหลด

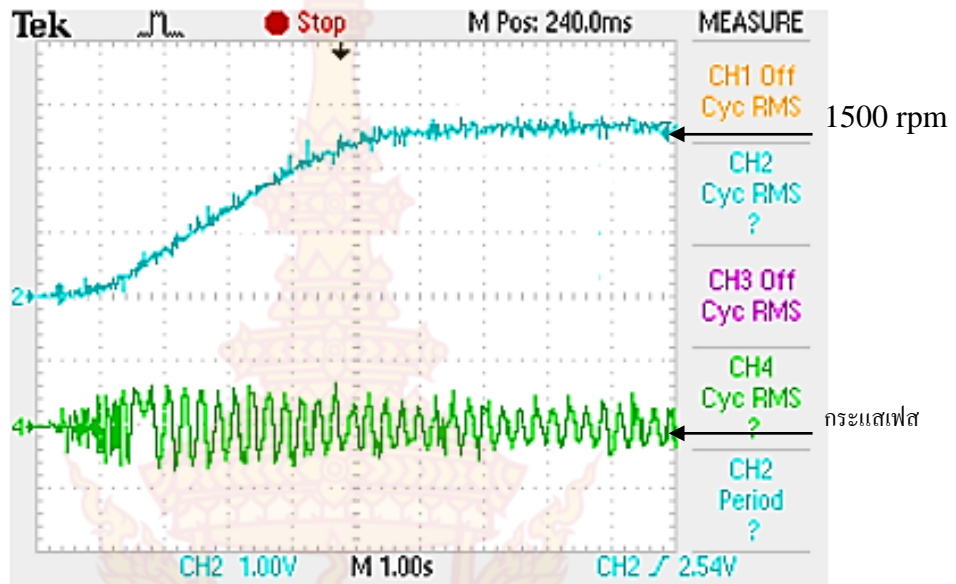


รูปที่ 78 ผลตอบสนองความเร็วและกระแสเฟสโดยทำการปรับความเร็วอ้างอิงที่ 2500 rpm ขณะไม่มีโหลด

ทำการทดลองโดยการปรับความเร็วไว้ที่ 1500 rpm และบรรทุกโหลดขนาด 0.5 นิตัน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.40 ผลการทดลองสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1500 rpm ได้ และรูปที่ 79 คือภาพขยายของรูปที่ 80

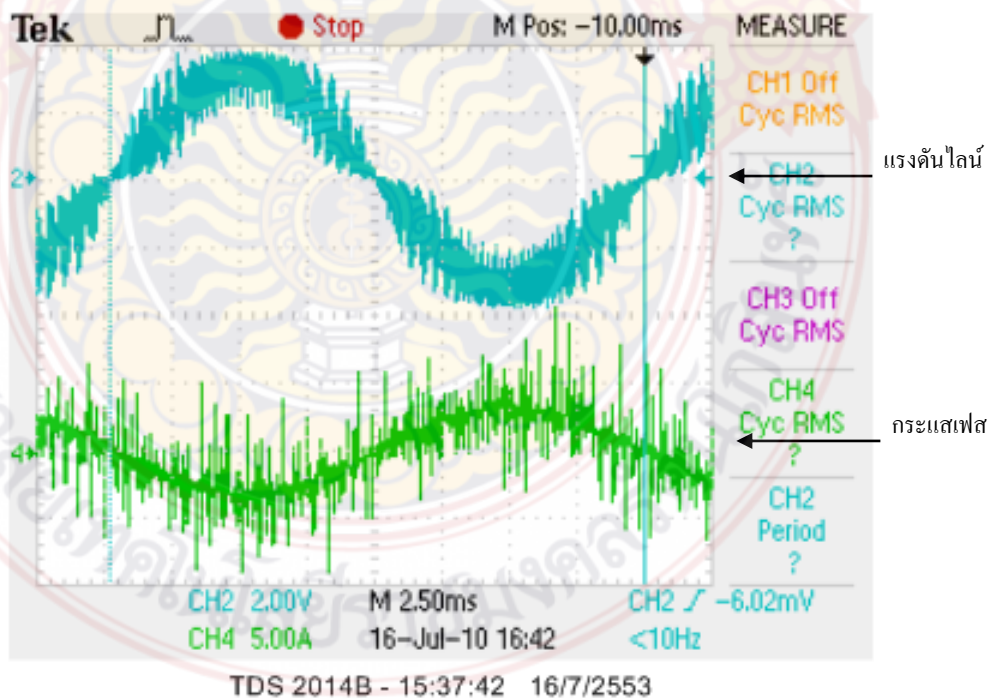


รูปที่ 79 ผลตอบสนองความเร็วและกระแสเฟสโดยทำการปรับความเร็วอ้างอิงที่ 1500 rpm ขณะบรรทุกโหลดขนาด 0.5 Nm



รูปที่ 80 ภาพขยายผลตอบสนองความเร็วและกระแสเฟสโดยทำการปรับความเร็วอ้างอิงที่ 1500 rpm โหลดขนาด 0.5 Nm

ทำการวัดแรงดันไลน์และกระแสเฟสที่ความเร็ว 1500 rpm และบรรทุกโหลดขนาด 0.5 Nm กระแสเฟสประมาณ 2 แอมแปร์

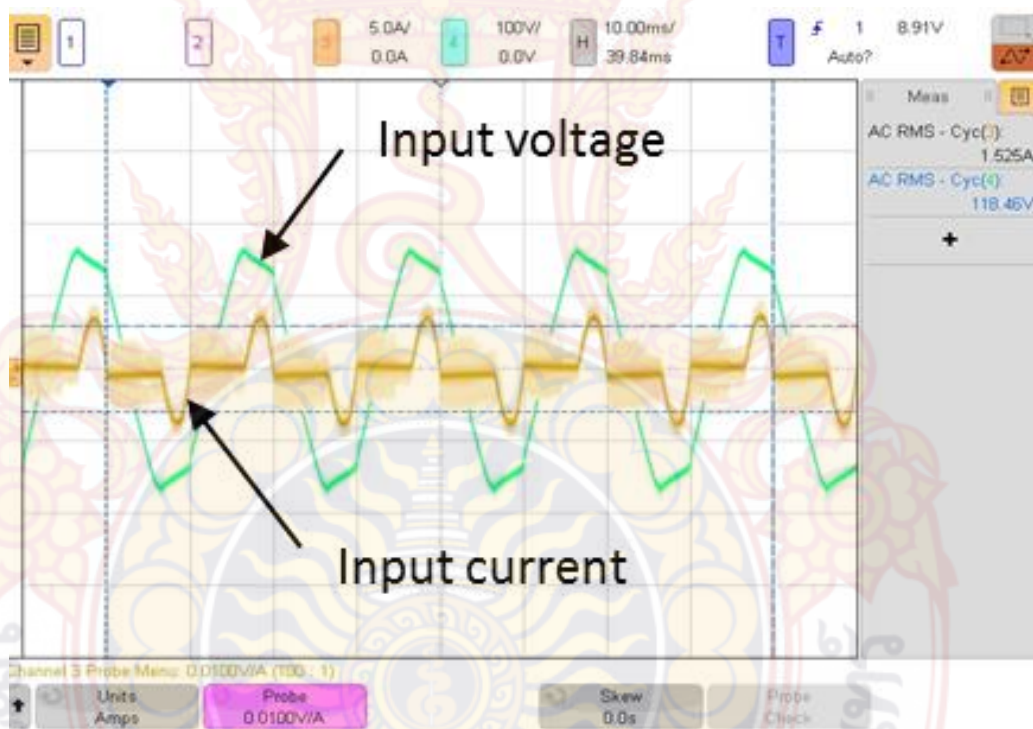


รูปที่ 81 แรงดัน Line to Line และกระแสเฟสที่ความเร็ว 1500 rpm และโหลด 0.5 Nm

#### 4. ผลการทดสอบและจำลองเมื่อมีการควบคุมตัวประกอบกำลัง

จากรูปที่ 81 คือขนาดของกระแสเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นขณะบรรทุกโหลด 0.5 Nm ซึ่งมีขนาดประมาณ 2 A ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม SIMULINK และผลการทดสอบชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่สร้างขึ้น สามารถควบคุมเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นได้ โดยดูจากผลการทดลองเมื่อทำการปรับตั้งความเร็วอ้างอิงไว้ แล้วทำการรันระบบให้ทำงาน

รูปที่ 82 แสดงแรงดันและกระแสอินพุทเมื่อไม่มีการควบคุมตัวประกอบกำลังซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่ากระแสไฟฟ้านั้นไม่เป็นสัญญาณไซน์ (sine wave)



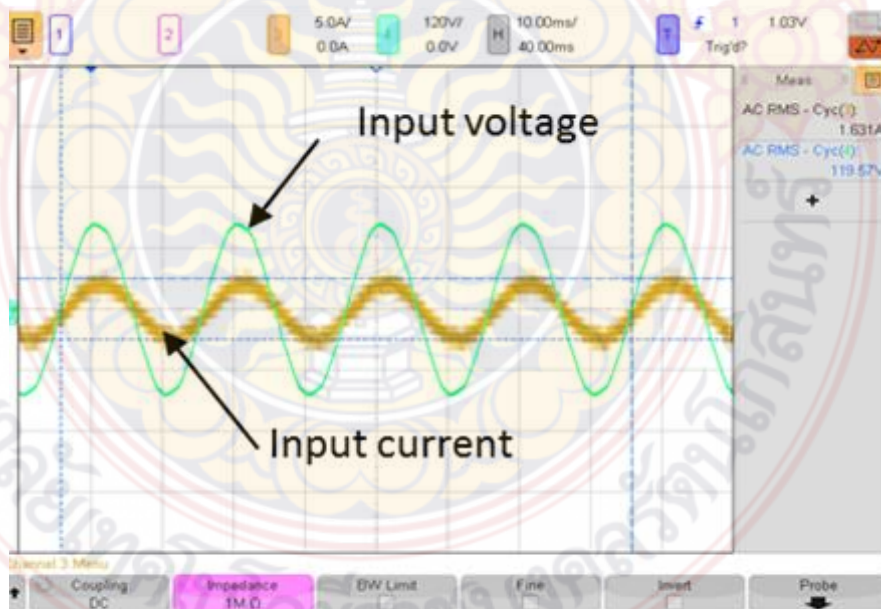
รูปที่ 82 แรงดันและกระแสอินพุทเมื่อไม่มีการควบคุมตัวประกอบกำลัง

เมื่อทำการวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของสัญญาณดังรูปที่ 83 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อไม่มีการควบคุมตัวประกอบกำลังจะทำให้ค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณสูงเกินกว่าค่ามาตรฐาน



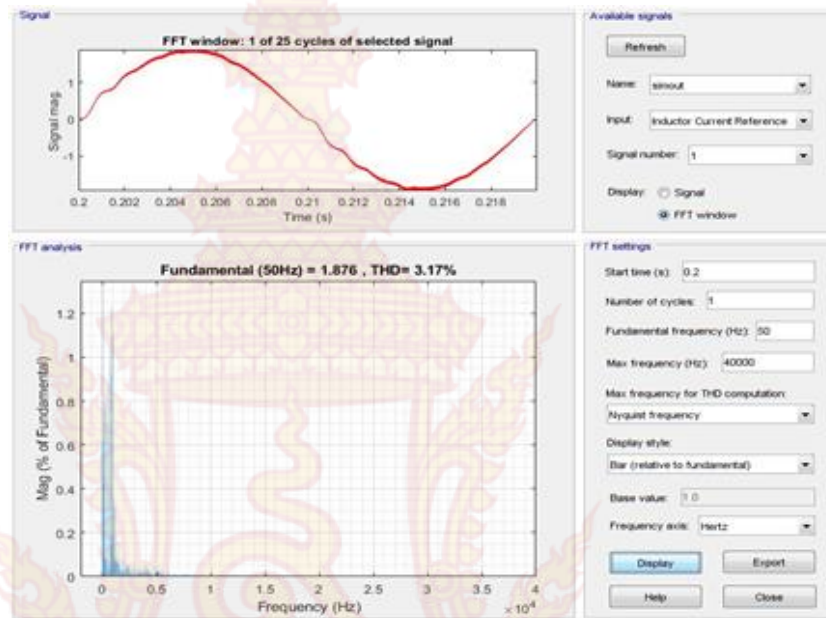
รูปที่ 83 ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อไม่มีการควบคุมตัวประกอบกำลัง

รูปที่ 84 ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นถึงสัญญาณของแรงดันและกระแสอินพุทเมื่อมีการควบคุมตัวประกอบกำลังซึ่งส่งผลให้กระแสเป็นรูปคลื่นไซน์และเกิดขึ้นพร้อมกันกับแรงดัน

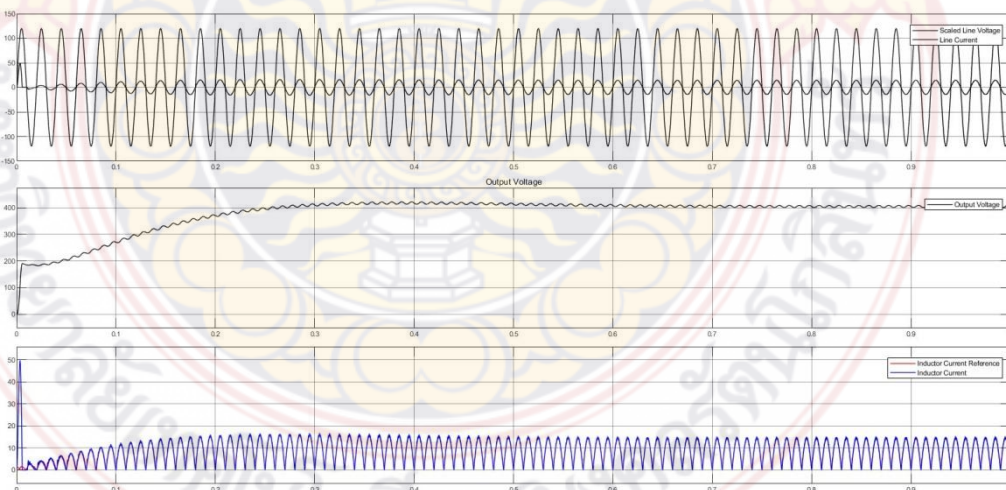


รูปที่ 84 สัญญาณของแรงดันและกระแสอินพุทเมื่อมีการควบคุมตัวประกอบกำลัง

รูปที่ 85 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสามารถของระบบควบคุมที่สามารถควบคุมความเร็วและตัวประกอบกำลังตลอดจนค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (THD) ที่อยู่ในย่านที่ยอมรับได้



รูปที่ 85 ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อมีการควบคุมตัวประกอบกำลัง ผลจากการจำลองของระบบแสดงให้เห็นถึงกระแสและแรงดันอินพุทของระบบเมื่อมีการควบคุมตัวประกอบกำลังซึ่งเห็นได้ชัดเลยว่ากระแสและแรงดันเกิดขึ้นพร้อมกัน



รูปที่ 86 ผลจากการจำลองระบบเมื่อมีการควบคุมตัวประกอบกำลัง



## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 1. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างวงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลังตลอดจนระบบอินเวอร์เตอร์ที่แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสำหรับใช้กับเครื่องจักรรีดยาง ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องจักรเพิ่มขึ้นและเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในเรื่องของค่าไฟฟ้าและสามารถลดขนาดของมอเตอร์ลงได้เนื่องจากขนาดของมอเตอร์สามเฟสมีขนาดเล็กกว่ามอเตอร์เฟสเดียวที่พิกัดแรงม้าเท่ากัน อีกทั้งมอเตอร์สามเฟสไม่ต้องมีคาปาซิเตอร์เพื่อช่วยในการเริ่มเดิน(start)ดังนั้นมอเตอร์สามเฟสจึงบำรุงรักษาง่ายกว่ามอเตอร์เฟสเดียว ซึ่งกระบวนการในการดำเนินงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือการออกแบบและการสร้างระบบควบคุม โดยในกระบวนการออกแบบนั้นนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยการใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์(vector control) ด้วยวิธีการควบคุมค่าสนามแม่เหล็ก (field-oriented control) โดยที่ระบบควบคุมเป็นแบบวงปิด (Close loop) มีการป้อนกลับความเร็ว กระแส และแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ ตัวควบคุม (Controller) ที่ใช้เป็นแบบ PI Controller ในการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม นำวิธีการกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) มาประยุกต์ใช้ และในการออกแบบฮาร์ดแวร์นำเสนอการประยุกต์ใช้ระบบสมองกลฝังตัว (Embedded System) โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล STM32F4 เป็นส่วนประมวลผลและสั่งงานทั้งระบบโดยมีการจำลองการทำงานและการเขียนโปรแกรมด้วยโปรแกรมแมทแลบซิมูลิงค์(matlab-simulink) เมื่อทำการออกแบบระบบทั้งหมดแล้วจึงทำการสร้างระบบจริงเพื่อทดสอบการทำงาน ผลการทดลองที่ได้สามารถการควบคุมตัวประกอบกำลังและความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้

### 2. สรุปผลการทดสอบ

ชุดควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นได้ ผลการทดสอบชุดควบคุมที่ใช้ระบบสมองกลเป็นตัวควบคุมในระบบต้นแบบสามารถใช้ในการควบคุมความเร็ว แรงบิด และตัวประกอบกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ตามที่ต้องการโดยที่จากผลการทดสอบและผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแรงดันและกระแสทางด้านอินพุตเกิดขึ้นพร้อมกันและในส่วนของความผิดเพี้ยนของสัญญาณนั้น เท่ากับ 3.15% และตัวประกอบกำลังอยู่ที่ 0.94 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่สูง

### 3. ข้อเสนอแนะ

1. ระบบการจ่ายพลังงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นยังมีการออกแบบในรูปแบบอื่นๆ ดังนั้นหากมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนนี้ก็จะทำให้ระบบการจ่ายพลังงานนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้น
2. ระบบควบคุมความเร็วที่นำเสนอ นั้นเป็นแบบ V/f โดยไม่มีการป้อนกลับของความเร็วรอบ ซึ่งมีข้อดีคือไม่มีความซับซ้อนซึ่งถ้าหากเป็นระบบที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำของความเร็ว นั้นยังมีรูปแบบอื่นอีกที่น่าจะศึกษาเพิ่มเติมเพื่อนำใช้ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ



## เอกสารอ้างอิง

- [1] วิทยานิพนธ์เรื่องการออกแบบและสร้างระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบด้านเดียวโดยการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยตัวควบคุมด้วยเทคนิคกลุ่มอนุภาค
- [2] รศ.ดร.วีระเชษฐ ชื่นเงิน, วุฒิพล ธาราธิระเชษฐ. 2550. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. สำนักพิมพ์ ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินต์ติ้ง, กรุงเทพฯ, หน้า 423-480.
- [3] ทรงกลด ศรีปรารงค์, วันชัย ทรัพย์สิงห์, “การออกแบบและประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล dsPIC30xF ในอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6, ENETT6-1191, 2553.
- [4] ทรงกลด ศรีปรารงค์, วันชัย ทรัพย์สิงห์, “การดำเนินการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นโดยใช้ dsPIC30F2010” การประชุมวิชาการ “แม่ฟ้าหลวงวิชาการ” ประจำปี พ.ศ. 2553 : 12 ปี ตามรอยสมเด็จพระเจ้าวันที่ 19-20 พฤศจิกายน 2553
- [5] Microchip Technology Inc. “dsPIC30F2010 Data Sheet” (DS70118H), 2008
- [6] Microchip Technology Inc. “dsPIC30F Family Reference Manual” (DS70046D), 2005
- [7] [www.retc.ac.th/v3/kru\\_pitoon/1/10.docx](http://www.retc.ac.th/v3/kru_pitoon/1/10.docx)
- [8] Iwamoto, M., S. Sakabe, et al. (1981). "Experimental and theoretical study of high-speed single-sided linear induction motors." Electric Power Applications, IEE Proceedings B 128(6): 306-312.
- [9] Iwamoto, M., E. Ohno, et al. (1973). "End-Effect of High-Speed Linear Induction Motor." Industry Applications, IEEE Transactions on IA-9(6): 632-639.



ประวัตผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ สกุล นายอนุชิต อุไรรัตน์

2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี  
หมายเลขโทรศัพท์ 032-618500 E-mail : anuchit.aur@rmutr.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

ปริญญาโท สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ หลักสูตร M.S. สาขาวิชา  
Electrical Power Engineering ปี พ.ศ. 2547

ปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติราชมงคล หลักสูตร วศ.บ. สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ปี  
พ.ศ. 2543

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

พลังงานทดแทน

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

“การให้แสงสว่างภายในอาคารโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถควบคุมความสว่างได้”  
หน่วยงานที่ให้ทุน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2559