

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่าย  
ประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ฟลักซ์ทางอ้อม

NEURAL NETWORK TECHNIQUE-BASED SPEED CONTROL OF  
THREE-PHASE INDUCTION MOTOR USING INDIRECT FLUX VECTOR  
CONTROL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2567

KMITL-2024-EN-M- 027-248

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NEURAL NETWORK TECHNIQUE-BASED SPEED CONTROL OF THREE-  
PHASE INDUCTION MOTOR USIN INDIRECT FLUX VECTOR CONTROL



THE THESIS SUBMITTED IN PARTAIL FULFILMENT  
OF THE REQUAMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN  
ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

SCHOOL OF ENGINNEERING

KING MONGKUT'SOF INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2024

KMITL-2024-EN-M- 027-248

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPY RIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S OF INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หัวข้อวิทยานิพนธ์

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ฟลักซ์ทางอ้อม

นักศึกษา

นายนิคม ก้านจักร

รหัสประจำตัวนักศึกษา

64601080

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

พ.ศ.

2567

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.เฉลิมชาติ มานพ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์(ร่วม)

ศ.ดร.วิจิตร ภิณเรศ

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาดพิกัดกำลัง 1.5 กิโลวัตต์ อาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้หลักการควบคุมเวกเตอร์ทางอ้อมแบบป้อนไปข้างหน้า ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งในการควบคุมความเร็วที่ให้การตอบสนองดีภายใต้เงื่อนไขสภาวะการทำงานต่างๆ โดยเฉพาะสภาวะพลวัต โดยมีการออกแบบโครงข่ายประสาทเทียม 3 ส่วน ได้แก่ การควบคุมความเร็วแบบวงรอบปิด, การควบคุมกระแสแบบวงรอบปิดและการสร้างไซน์อ้างอิงสามเฟสในส่วนแรก สำหรับการควบคุมความเร็วได้นำเสนอโครงข่ายประสาทเทียมผสมกับตัวควบคุมอินทิกรัล โดยใช้ความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่ต้องการและความเร็วจริงเป็นอินพุต นำไปทำนายหาค่าแรงบิดอ้างอิงที่ต้องการ ส่วนที่สอง สำหรับการควบคุมกระแสสเตเตอร์บนกรอบอ้างอิงดี-คิวที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโรตารีได้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ ANN (Artificial Neural Network) ชนิดโครงข่ายประสาทแบบป้อนไปข้างหน้า (feed-forward network) โดยเงื่อนไขอินพุตถูกกำหนดเป็นแรงบิดอ้างอิงและค่ากระแสผิดพลาด นำไปทำนายหาค่าแรงดันเอาต์พุตบนกรอบอ้างอิงแกนดี-คิวที่เหมาะสม ส่วนที่สาม สร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงสามเฟสที่เกิดจากการลอกเลียนแบบของโครงข่ายประสาทเทียม มีอินพุตโครงข่าย คือ แรงดันอ้างอิงแกนดี-คิว และมุมฟลักซ์ของโรเตอร์ โดยเอาต์พุตที่ได้จะเป็นไซน์อ้างอิงสามเฟส เพื่อนำไปสร้างสเปซเวกเตอร์พีดีบีลิวเอ็มชนิดคลื่นพาห์เพื่อควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีทีโมดูลของอินเวอร์เตอร์สามเฟส ความถูกต้องแนวคิด ได้ถูกตรวจสอบด้วยทั้งการจำลองการทำงานของระบบทั้งหมดด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และการสร้างและทดสอบจริงโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 รุ่นTMS320F28379D มีเงื่อนไขในการทดสอบทางพลวัตและสภาวะคงตัว เช่น สภาวะสตาร์ทมอเตอร์, เพิ่มและปลดโหลดอย่างฉับพลันชั่วขณะ, การกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์ฉับพลันและการติดตามความเร็วตามคำสั่งที่ตั้งไว้ จากผลตอบสนองของมอเตอร์ในช่วง สตาร์ทมอเตอร์ใช้เวลาเข้าสู่ความเร็วพิกัดภายใน 4 วินาที มีความเร็วพุ่งเกินอยู่ที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์ ผลการตอบสนองเพิ่มโหลดและปลดโหลดอย่างฉับพลันชั่วขณะ 4 นิวตันเมตรมีระยะเวลาฟื้นตัวกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวภายใน 0.8 วินาที และใช้เวลาในการกลับทางหมุน 6 วินาทีที่ความเร็วพิกัด เทคนิคที่นำเสนอสามารถควบคุมความเร็วได้ตามคำสั่ง ซึ่งในผลการทดสอบจริงให้ผลใกล้เคียงกับผลการจำลองในเงื่อนไขต่างๆ ที่ให้สมรรถนะเป็นที่น่าพอใจ

<b>Thesis</b>	Neural Network technique-based Speed Control of Three-Phase Induction Motor using Indirect Flux Vector Control
<b>Student</b>	Mr. Nikom Kanjak
<b>Student ID.</b>	64601080
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical and Computer Engineering
<b>Year</b>	2023
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof. Dr.Chalermchat Manop
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Professor Dr.Vijit Kinnares

## ABSTRACT

This paper proposes speed control of a 1.5 kW three-phase induction motor on the basis of artificial neural network techniques employing the feedforward flux vector control principle. This approach offers an alternative method for speed control, resulting in good response characteristics under various operating conditions, particularly dynamic condition. The neural network design comprises three components namely closed-loop speed control, closed-loop stator current control, and a three-phase reference signal synthesis. In the first component, a hybrid neural network combined with an integral controller is proposed, utilizing error between required and actual speeds as input to predict the required reference torque. For the second component, closed-loop stator currents on a d-q synchronously rotating frame are controlled by Artificial Neural Network (ANN) with a feedforward neural network type, using input conditions specified as the reference torque and the current error to predict the appropriate output voltages on a d-q frame. The third component generates a three-phase sinusoidal reference signal derived from the imitation of the neural network in which the inputs are obtained d-q reference voltages and rotor flux angle. The output obtained serves as the three-phase reference signals to generate PWM signals by Carrier-based Space Vector Pulse Width Modulation (CBSVPWM) technique, to control the IGBT switches module in the three-phase inverter. The validity of the proposed methodology are verified through both simulation of overall operating system and implementation and realistic testing using MATLAB/Simulink software and C2000 microcontroller, model TMS320F28379D, respectively. Testing conditions include dynamic and steady state conditions such as motor startup, sudden load increase and removal, rapid motor speed reversal, and speed tracking according to predefined commands. The motor response during startup is within 4 seconds, with an overshoot of the speed of 1.5%. Under sudden load increase and removal of 4 Nm load torque, the speed can recover to the steady state within 0.8 seconds, At rated speed, the rotation reversal time is 6 seconds. The proposed technique is able to control the speed as commands. Experimental and simulation results are in good agreement under various conditions, demonstrating satisfactory performance.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบคุณ รศ.ดร. เฉลิมชาติ มานพ และ ศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ในการให้ความรู้ทางด้านวิชาการ คำแนะนำด้านการพัฒนา คำปรึกษาเรื่องแนวทางการดำเนินการและ แนวทางวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอบคุณถึงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อให้อำนวยสถานที่ ในการทำวิจัยเล่มนี้ อีกทั้งเครื่องมือครุภัณฑ์ ๆ ในการวัดทดสอบและเก็บผลการทดลองของชุดต้นแบบ งานวิจัย และขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ ปริญญาโท-เอก ภายในห้องปฏิบัติการ Power Electronics and Machines Control; PMC ห้อง 405 ที่ให้ข้อคิดการวางแผน ประสบการณ์ และแนวทางการพัฒนา ตนในการทำงานและการจัดทำวิทยานิพนธ์

คุณงามความดีและความตั้งใจในตัวของข้าพเจ้า ข้าพเจ้าขอมอบความดีให้กับบิดา มารดา คุณยายเสาร์ ศรีชื่น และคุณป้า ประทุมพร ศรีชื่น ซึ่งคอยเลี้ยงดูตัวข้าพเจ้าและสั่งสอน ประสิทธิ์ประสาท วิชาความรู้ ประสบการณ์ แนวทางการใช้ชีวิต ให้มีสติและสามารถดำเนินชีวิตได้มาจนถึงปัจจุบันนี้

สุดท้ายขอขอบคุณ นางสาว พิจิตรา รัตนารักษ์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ดูแล ห่วงใยและให้ กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้และท้อใจ ช่วยให้มีพลัง และเข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาอุปสรรคต่างๆ จนผู้วิจัยประสบความสำเร็จ

นาย นิคม ก้านจักร

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XIV
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2.....	8
ทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในกรอบอ้างอิง $dq$ .....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ Induction Motors [12].....	8
2.2.1 วงจรสมมูลของโรเตอร์ต่อเฟส (Per Phase Rotor Equivalent Circuit).....	12
2.2.2 วงจรสมมูลของสเตเตอร์ต่อเฟส (Per Phase Stator Equivalent Circuit).....	13
2.2.3 คุณสมบัติของกำลังไฟฟ้าและแรงบิด (Power and Torque Characteristics).....	14
2.2.4 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	17
2.3 การแปลงแบบคลาร์ก (Clarke's Transformation) [13].....	18
2.4 การแปลงแบบปาร์ค (Park's Transformation) [13].....	20
2.5 การควบคุมแบบเวกเตอร์ [13].....	22
2.5.1 วงจรสมมูลทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	22
2.5.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงแกนหมุน.....	24

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.5.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงแกนหยุดนิ่ง .....	27
2.6 การควบคุมแบบฟิลด์อเรียนต์ดทางอ้อม [13] .....	31
2.7 สรุป .....	32
<b>บทที่ 3 .....</b>	<b>33</b>
<b>อินเวอร์เตอร์สามเฟส .....</b>	<b>33</b>
3.1 บทนำ.....	33
3.2 อินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบพีดีบีเปลยูเอ็ม [14] .....	33
3.2.1 อินเวอร์เตอร์สามเฟสมอดูละชั้นเชิงเส้น $m_a \leq 1$ .....	35
3.2.2 อินเวอร์เตอร์สามเฟสโอเวอร์มอดูละชั้น $m_a > 1$ .....	36
3.2.3 อินเวอร์เตอร์สามเฟสรูปคลื่นสี่เหลี่ยม .....	38
3.2.4 ประโยชน์ของการสวิตซ์ในอินเวอร์เตอร์ .....	40
3.3 เทคนิคการมอดูละชั้นขั้นสูงสำหรับอินเวอร์เตอร์ไฟฟ้าสามเฟส [15].....	41
3.3.1 เทคนิค Space vector pulse width modulation (SVPWM) .....	41
3.3.2 สัญญาณคลื่นพาหะ (Carrier Based Space Vector PWM; CSVPWM).....	48
3.4 สรุป .....	50
<b>บทที่ 4 .....</b>	<b>51</b>
<b>ทฤษฎีพื้นฐานและความเป็นมาโครงข่ายประสาทเทียม .....</b>	<b>51</b>
4.1 บทนำ.....	51
4.2 โครงสร้างลักษณะเซลล์ประสาทเชิงชีววิทยา [18].....	52
4.3 โครงข่ายประสาทเทียม [18] .....	55
4.3.1 แบบจำลองของนิวรอน .....	56
4.4 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม [19] .....	56
4.4.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดชั้นเดียว (Single Layer).....	57
4.4.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดหลายชั้น (Multi-layer).....	57
4.4.3 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแข่งขัน (Competitive Layer).....	58
4.5 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม [19] .....	59

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.5.1 การฝึกสอนแบบซูปเปอร์ไวส์ (Supervised Training).....	59
4.5.2 การฝึกสอนแบบอันซูปเปอร์ไวส์ (Unsupervised Training) .....	60
4.5.2 การฝึกสอนแบบเสริม (Reinforcement Learning).....	60
4.6 ฟังก์ชันถ่ายโอน [19].....	61
4.7 การเรียนรู้แบบแพร่กลับ (Backpropagation learning).....	62
4.7.1 ตัวแปรที่ใช้ในการเรียนรู้แบบแพร่กลับ.....	63
4.7.2 ขั้นตอนกระบวนการเรียนรู้แบบแพร่กลับ.....	65
4.8 บทสรุป.....	68
<b>บทที่ 5.....</b>	<b>69</b>
<b>การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบ</b>	
<b>เวกเตอร์ทางอ้อม.....</b>	<b>69</b>
5.1 บทนำ.....	69
5.2 MATLAB Simulink.....	70
5.2.1 การเปิดใช้งาน MATLAB Simulink.....	71
5.2.2 การจำลองระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่าย	
ประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม.....	74
5.3 การออกแบบตัวควบคุมประสาทเทียม.....	82
5.3.1 การออกแบบตัวควบคุมของลูปควบคุมความเร็ว.....	82
5.3.2 การออกแบบตัวควบคุมของลูปควบคุมกระแส.....	91
5.3.3 การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการเรียนรู้ฟังก์ชัน $dq$ to $abc$ .....	100
5.4 โปรแกรม Code composer studio (CCS).....	104
5.4.2 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม CCS V 8.2.0.....	105
5.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 เบอร์ TMS320F28379D.....	111
5.6 สรุป.....	115

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 .....	116
ผลจำลองและผลทดสอบการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิค โครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม .....	116
6.1 บทนำ.....	116
6.2 การสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงสามเฟสด้วยโครงข่ายประสาทเทียม .....	118
6.3 จำลองเปรียบเทียบทดสอบการควบคุมความเร็วรอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียม .....	124
6.3.1 ผลการตอบสนองทางพลวัตของการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ .....	124
6.3.2 ผลการตอบสนองทางพลวัตโดยรวม.....	135
6.4 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบดั้งเดิม PI เปรียบเทียบกับโครงข่าย ประสาทเทียม.....	139
6.5 สรุปผลการทดสอบ .....	144
บทที่ 7 .....	146
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	146
7.1 สรุปผลงานวิจัย .....	146
7.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัยต่อ .....	149
เอกสารอ้างอิง.....	150
ภาคผนวก.....	154

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมแนวคิดการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม.....	5
รูปที่ 2.1 โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก [12] .....	8
รูปที่ 2.2 โครงสร้างโรเตอร์แบบกรงกระรอก [12] .....	9
รูปที่ 2.3 โครงสร้างโรเตอร์แบบฟันขดลวด [12] .....	9
รูปที่ 2.4 โครงสร้างสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำประกอบด้วยขดลวดอาร์มาเจอร์แบบสามเฟส [12] .....	9
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	11
รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของโรเตอร์ต่อเฟส .....	12
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลทำไฟฟ้าของสเตเตอร์ต่อเฟส.....	13
รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ พิจารณาทางด้านสเตเตอร์.....	13
รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ใช้สำหรับพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้า .....	14
รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส .....	15
รูปที่ 2.12 กราฟแสดงคุณลักษณะค่าแรงบิดและสลิปของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำสามเฟส.....	17
รูปที่ 2.13 การแปลงปริมาณสามเฟส ABC ให้อยู่บนแกน $\alpha\beta$ .....	18
รูปที่ 2.14 การแปลงแกนจาก $\alpha\beta$ ให้อยู่บนแกน $dq$ .....	20
รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส .....	22
รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลทางด้านขดลวดสเตเตอร์.....	24
รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลในกรอบอ้างอิงแกนหมุน.....	25
รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลทางพลวัตของมอเตอร์ในกรอบอ้างอิงแกนหมุน.....	26
รูปที่ 2.19 วงจรสมมูล $d-q$ .....	27
รูปที่ 2.20 ค่าพลังค์ของโรเตอร์เมื่อใช้หลักการควบคุมแบบฟิลด์ออร์เรียนเต็ด .....	29
รูปที่ 2.21 ไดอะแกรมการควบคุมแบบเวกเตอร์.....	32
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์สามเฟส .....	33

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.2 คลื่นและฮาร์มอนิกสเปกตรัมของอินเวอร์เตอร์สามเฟส .....	35
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{LL} / V_d$ กับ $m_a$ ในอินเวอร์เตอร์สามเฟส.....	36
รูปที่ 3.4 รูปฮาร์มอนิกสเปกตรัมของอินเวอร์เตอร์สามเฟสโอเวอร์มอดูเลชัน.....	37
รูปที่ 3.5 รูปฮาร์มอนิกสเปกตรัมของอินเวอร์เตอร์สามเฟสรูปคลื่นสี่เหลี่ยม.....	39
รูปที่ 3.6 สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ที่สถานะนำและไม่นำกระแส .....	42
รูปที่ 3.7 การสวิตช์แบบกึ่งสี่เหลี่ยมสถานะของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ .....	43
รูปที่ 3.8 สเปกตรัมแรงดัน.....	44
รูปที่ 3.9 รูปแบบการสวิตช์จากการคำนวณในแต่ละเซกเตอร์.....	47
รูปที่ 3.10 สเปกตรัมแรงดัน $V_{SA}, V_{SB}, V_{SC}$ .....	47
รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมเทคนิคสเปกตรัมสำหรับอินเวอร์เตอร์ไฟฟ้าสามเฟส .....	50
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างของเซลล์สมอง (HTTPS:// WIKIMEDIA.ORG).....	52
รูปที่ 4.2 นิเวศน์ในสมองมนุษย์ (HTTPS:// WIKIMEDIA.ORG).....	53
รูปที่ 4.3 การแบ่งชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมตามโครงสร้างสถาปัตยกรรม .....	55
รูปที่ 4.4 แบบจำลองนิเวศน์ของโครงข่ายประสาทเทียม.....	56
รูปที่ 4.5 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดชั้นเดียว.....	57
รูปที่ 4.6 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดหลายชั้น .....	58
รูปที่ 4.7 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแข่งขัน .....	58
รูปที่ 4.8 บล็อกไดอะแกรมการฝึกสอนแบบซูปเปอร์ไวส์ .....	59
รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมการฝึกสอนแบบอันซูปเปอร์ไวส์ .....	60
รูปที่ 4.10 บล็อกไดอะแกรมการฝึกสอนแบบเสริม .....	60
รูปที่ 4.11 การเรียนรู้แบบแพร่กลับแบบชั้นซ่อนหนึ่งชั้น .....	62
รูปที่ 4.12 โฟลว์ชาร์ตกระบวนการเรียนรู้ แบบแพร่กลับ.....	67
รูปที่ 4.13 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการทำงานโครงข่ายประสาทเทียม.....	68
รูปที่ 5.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบที่ใช้ในการทดสอบ .....	69

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.2 บล็อกเซตฟังก์ชันที่มี INPUT ,PROCESSและOUTPUT.....	70
รูปที่ 5.3 การเปิดใช้งาน MATLAB SIMULINK.....	71
รูปที่ 5.4 ส่วนประกอบหน้าต่าง SIMULINK START PAGE .....	72
รูปที่ 5.5 การเปิดหน้าต่าง SIMULINK EDITOR.....	72
รูปที่ 5.6 การเปิดใช้งาน SIMULINK LIBRARY BROWSER.....	73
รูปที่ 5.7 การจำลองเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมจากทูลบล็อก SIMULINK LIBRARY.....	74
รูปที่ 5.8 การจำลองลูปความเร็วรอบจาก ทูลบล็อก SIMULINK LIBRARY .....	75
รูปที่ 5.10 ชุดรับสัญญาณความเร็วรอบของเ็ดโค้ดเดอร์.....	75
รูปที่ 5.11 การจำลองลูปกระแสจาก ทูลบล็อก SIMULINK LIBRARY.....	77
รูปที่ 5.12 ชุด ADC ตรวจสอบกระแสแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอล.....	78
รูปที่ 5.13 บล็อกฟังก์ชัน GIAN สร้างสมการกระแสอ้างอิงในแกน $d$ .....	78
รูปที่ 5.14 ชุดบล็อกฟังก์ชัน FCN การแปลงแบบคลาร์ก.....	78
รูปที่ 5.15 ชุดบล็อกฟังก์ชัน FCN การแปลงแบบคลาร์กและปาร์ค.....	79
รูปที่ 5.17 ชุดรีเซตสัญญาณ $\omega_c$ ที่ $2\pi$ .....	80
รูปที่ 5.18 ชุดแปลงสัญญาณสเปซเวกเตอร์.....	80
รูปที่ 5.19 ชุด EPWM ขับสัญญาณ PWM.....	81
รูปที่ 5.20 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ต้องการใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียม .....	84
รูปที่ 5.21 สร้างตัวแปรรับข้อมูลโครงข่ายสำหรับการฝึกสอน.....	85
รูปที่ 5.22 เริ่มต้นใช้งานฟังก์ชันเริ่มโครงข่ายประสาทเทียม.....	85
รูปที่ 5.23 เลือกข้อมูลและตัวแปรที่สร้างโมเดลของโครงข่ายประสาทเทียม .....	86
รูปที่ 5.24 การตรวจสอบและทดสอบข้อมูล TRAINING ,VALIDATIONและTESTING .....	87
รูปที่ 5.25 กำหนดโหนดของนิวรอนในชั้นซ่อน.....	88
รูปที่ 5.26 NEURAL NETWORK TRAINING การฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียม .....	89

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.27 รายละเอียดอัลกอริทึมในการฝึกสอน .....	89
รูปที่ 5.28 ประเมินโครงข่าย (EVALUATE NETWORK) .....	90
รูปที่ 5.29 DEPLOY SOLUTION .....	90
รูปที่ 5.30 SIMULINK DIAGRAM .....	91
รูปที่ 5.31 ตัวควบคุมลูประแสดของเวกเตอร์ทางอ้อม .....	92
รูปที่ 5.32 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมในลูประแสด .....	92
รูปที่ 5.33 ข้อมูลความสัมพันธ์อินพุตและเอาต์พุตกระแสนแกน $d$ .....	94
รูปที่ 5.34 ข้อมูลความสัมพันธ์อินพุตและเอาต์พุตกระแสนแกน $q$ .....	96
รูปที่ 5.35 โครงข่ายประสาทเทียมกระแสนแกน $d$ ที่มีการฝึกสอนแล้ว .....	98
รูปที่ 5.36 โครงข่ายประสาทเทียมกระแสนแกน $q$ ที่มีการฝึกสอนแล้ว .....	99
รูปที่ 5.37 ฟังก์ชันแปลงรอบอ้างอิง 2 เฟส เป็น 3 เฟส $dq$ TO $abc$ .....	100
รูปที่ 5.38 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมฟังก์ชัน $dq$ TO $abc$ .....	101
รูปที่ 5.39 ข้อมูลความสัมพันธ์อินพุตและเอาต์พุตฟังก์ชัน $dq$ TO $abc$ .....	102
รูปที่ 5.40 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมฟังก์ชัน $dq$ TO $abc$ ที่มีการฝึกสอนแล้ว .....	104
รูปที่ 5.41 หน้าต่างเปิดใช้งานโปรแกรม CODE COMPOSER STUDIO (CCS) .....	105
รูปที่ 5.42 บล็อกเซ็ตของ TEST_CCS.SLX ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK .....	105
รูปที่ 5.43 การตั้งค่า MODEL CONFIGURATION PARAMETERS ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK .....	106
รูปที่ 5.44 ผลการ BUILD บล็อกเซ็ตของ TEST_CCS.OUT ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK .....	106
รูปที่ 5.45 NEW TARGET CONFIGURATIONS .....	107
รูปที่ 5.46 สร้างไฟล์ชื่อที่จะเชื่อมต่อกับโปรแกรม CCS .....	107
รูปที่ 5.47 ตั้งค่าอุปกรณ์ที่จะเชื่อมต่อกับโปรแกรม CCS .....	108
รูปที่ 5.48 ค้นหา TARGET CONFIGURATIONS .....	108
รูปที่ 5.49 เลือก LAUNCH SELECTED CONFIGURATION .....	109
รูปที่ 5.50 แสดงช่อง DEBUG .....	110

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.51 CONNECT TARGET .....	110
รูปที่ 5.52 เชื่อมต่อกับบอร์ด TMS320F28379D .....	111
รูปที่ 5.53 หยุดเชื่อมต่อกับบอร์ด TMS320F28379D .....	111
รูปที่ 5.54 C2000 เบอร์ TMS320F28379D .....	112
รูปที่ 5.55 บล็อกไดอะแกรมการประยุกต์โปรแกรมร่วมกับชุดต้นแบบ .....	115
รูปที่ 6.1 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิค โครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม .....	116
รูปที่ 6.2 ชุดต้นแบบในการทดสอบการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัย เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม .....	117
รูปที่ 6.3 สัญญาณไซน์อ้างอิงความถี่สูงค่าที่ 57.4Hz และกรอบอ้างอิงแกน $dq$ คงที่ 1 V .....	118
รูปที่ 6.4 สัญญาณไซน์อ้างอิงความถี่ต่ำค่าที่ 1 Hz และกรอบอ้างอิงแกน $dq$ คงที่ 1 V .....	119
รูปที่ 6.5 สัญญาณไซน์อ้างอิงความถี่ 50 Hz กรอบอ้างอิงแกน $dq$ คงที่ 1 V และ $\theta_e$ เปลี่ยนมุมรีเซ็ต .....	120
รูปที่ 6.6 สัญญาณไซน์อ้างอิงค่ากรอบอ้างอิงแกน $dq$ เป็น 0.34 V, 0.56 V ความถี่คงที่ 25Hz .....	120
รูปที่ 6.7 สัญญาณไซน์อ้างอิงค่าความถี่และกรอบอ้างอิงแกน $dq$ เป็นศูนย์.....	121
รูปที่ 6.8 สัญญาณไซน์อ้างอิงและ $\theta_e$ ความถี่สูงค่าที่ 57.4Hz และกรอบอ้างอิงแกน $dq$ คงที่ 1 V..	123
รูปที่ 6.9 สัญญาณไซน์อ้างอิงและ $\theta_e$ ที่มุมเปลี่ยนแปลง 50 Hz กรอบอ้างอิงแกน $dq$ คงที่ 1 V.....	123
รูปที่ 6.10 สัญญาณไซน์อ้างอิงและ $\theta_e$ ค่ากรอบอ้างอิงแกน $dq$ เป็น 0.34V,0.56V ความถี่คงที่ 25Hz .....	123
รูปที่ 6.11 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ ความเร็วรอบ,แรงบิด สภาวะเริ่มต้นการหมุน .....	124
รูปที่ 6.12 จำลองเปรียบเทียบทดสอบโรเตอร์ฟลักซ์คำนวณ,กระแสแกน $dq$ สภาวะเริ่มต้นหมุน ...	125
รูปที่ 6.13 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ กระแสมอเตอร์ สภาวะเริ่มต้นการหมุน .....	126
รูปที่ 6.14 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ ความเร็วรอบ,แรงบิด สภาวะเพิ่มโหลดปลดโหลด .....	126
รูปที่ 6.15 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ โรเตอร์ฟลักซ์คำนวณ,กระแสแกน $dq$ เพิ่มโหลดปลดโหลด	127

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.16 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ กระแสมอเตอร์ เพิ่มโหลดปลดโหลด .....	128
รูปที่ 6.17 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ ความเร็วรอบ,แรงบิด กลับทิศทางหมุน .....	128
รูปที่ 6.18 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ โรเตอร์ฟลักซ์คำนวณ,กระแสแกน $dq$ กลับทิศทางหมุน ....	129
รูปที่ 6.19 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ กระแสมอเตอร์ กลับทิศทางหมุน .....	130
รูปที่ 6.20 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ ความเร็วรอบ,แรงบิด มอเตอร์หยุดนิ่งเป็นศูนย์.....	130
รูปที่ 6.21 จำลองเปรียบเทียบทดสอบโรเตอร์ฟลักซ์คำนวณ,กระแสแกน $dq$ มอเตอร์หยุดนิ่งเป็นศูนย์ .....	131
รูปที่ 6.22 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ กระแสมอเตอร์ สภาวะมอเตอร์หยุดนิ่งเป็นศูนย์.....	132
รูปที่ 6.23 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ ความเร็วรอบ,แรงบิด เปลี่ยนความเร็วรอบ.....	132
รูปที่ 6.24 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ ความเร็วรอบ,แรงบิด ที่ความเร็วรอบ 750RPM.....	133
รูปที่ 6.25 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ ความเร็วรอบ,แรงบิด ที่ความเร็วรอบ 350 RPM.....	134
รูปที่ 6.26 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ ความเร็วรอบและแรงบิดที่ความเร็วรอบ 50 RPM .....	134
รูปที่ 6.27 ผลการตอบสนองทางพลวัตโดยรวม .....	136
รูปที่ 6.28 องค์ประกอบ L-L ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสความเร็วคงที่ 1500 RPM .....	136
รูปที่ 6.29 องค์ประกอบ L-L ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะเพิ่มโหลด .....	137
รูปที่ 6.30 องค์ประกอบ L-N ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสความเร็วคงที่ 1500 RPM.....	137
รูปที่ 6.31 องค์ประกอบ L-N ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะเพิ่มโหลด.....	138
รูปที่ 6.32 ผลการทดสอบเปรียบเทียบความเร็วรอบและแรงบิด .....	140
รูปที่ 6.33 ผลการทดสอบกรอบอ้างอิงแกนหมุน $q$ กรอบอ้างอิงแกนหมุน $d$ .....	141
รูปที่ 6.34 ผลการทดสอบกรอบอ้างอิงแกนหมุน $q$ กรอบอ้างอิงแกนหมุน $d$ .....	141
รูปที่ 6.35 ผลการทดสอบเปรียบเทียบโรเตอร์ฟลักซ์คำนวณและกระแสแกน $dq$ .....	142
รูปที่ 6.36 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกระแสมอเตอร์ .....	142

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 สถานะของแรงดันของอินเวอร์เตอร์.....	42
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบเซลล์ขนาดเล็กและเซลล์ขนาดใหญ่.....	53
ตารางที่ 4.2 ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบต่างๆ.....	61
ตารางที่ 5.1 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ต้องการใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียม .....	82
ตารางที่ 5.2 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตกระแสนแกน $d$ ที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม .....	93
ตารางที่ 5.3 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตกระแสนแกน $q$ ที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม .....	94
ตารางที่ 5.4 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตฟังก์ชัน $dq$ to $abc$ ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม .....	101

## คำศัพท์ย่อในงานวิจัย

$n_s$	ความเร็วเชิงโคโรนัส
$n_r$	ความเร็วโรเตอร์
$s$	ค่าสลิปมอเตอร์เหนี่ยวนำ
$f_r$	ความถี่โรเตอร์
$f_e$	ความถี่สเตเตอร์
$X_{2s}$	ปฏิกิริยาการรั่วไหลของโรเตอร์ที่ค่าสลิปใด ๆ
$X_2$	
$E_{2s}$	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ที่ค่าสลิปใด ๆ
$E_2$	
$I_{2s}$	กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ที่ค่าสลิปใด ๆ
$R_r$	ความต้านทานไฟฟ้าของโรเตอร์
$V$	แรงดันไฟฟ้าพิกัด
$I$	กระแสไฟฟ้าพิกัด
$R$	ความต้านทานไฟฟ้า
$X$	ความต้านทานเสมือน
$R_c$	ความต้านทานไฟฟ้าการสูญเสียในแกนเหล็ก
$X_m$	ความต้านทานเสมือนการสร้างสนามแม่เหล็ก
$P_i$	กำลังไฟฟ้าขาเข้า
$P_{cu,1}$	ค่าสูญเสียทองแดงสเตเตอร์
$P_g$	กำลังไฟฟ้าที่ผ่านช่องว่างอากาศ
$P_{cu,2}$	ค่าสูญเสียจากลวดทองแดงที่โรเตอร์
$P_e$	กำลังไฟฟ้าขาออกของโรเตอร์
$T_e$	แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า
$P_o$	กำลังทางกลทั้งหมดที่ออกจากมอเตอร์
$P_r$	ค่าสูญเสียจากการหมุนในแกนเหล็ก
$T_o$	แรงบิดทางกลของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\omega_s$	ความเร็วเชิงมุมที่ความเร็วซิงโครนัสมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
$P$	จำนวนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์
$f$	ความถี่ทางไฟฟ้าของแหล่งจ่าย
$\omega$	ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า
$\alpha$	กรอบอ้างอิงแกนแอลฟา
$\beta$	กรอบอ้างอิงแกนเบต้า
$d$	กรอบอ้างอิงแกนดี
$q$	กรอบอ้างอิงแกนคว
$\theta$	มุมระหว่าง
$i_d$	กระแสบนแกนดี
$i_q$	กระแสบนแกนคว
$V_{ds}$	แรงดันสเตเตอร์แกนดี
$V_{qs}$	แรงดันสเตเตอร์แกนคว
$i_{ds}$	กระแสสเตเตอร์แกนดี
$i_{qs}$	กระแสสเตเตอร์แกนคว
$R_s$	ความต้านทานสเตเตอร์
$R_r$	ความต้านทานโรเตอร์
$\lambda_{ds}$	ฟลักซ์สเตเตอร์แกนดี
$\lambda_{qs}$	ฟลักซ์สเตเตอร์แกนคว
$\lambda_{dr}$	ฟลักซ์โรเตอร์แกนดี
$\lambda_{qr}$	ฟลักซ์โรเตอร์แกนคว
$L_s$	ความเหนี่ยวนำสเตเตอร์
$L_r$	ความเหนี่ยวนำโรเตอร์
$L_m$	ตัวเหนี่ยวนำแม่เหล็ก
$\omega_{sl}$	ความถี่สลลิป
$\theta_e$	มุมหมุนแบบซิงโครนัส
$\lambda_s$	ฟลักซ์สเตเตอร์
$\lambda_r$	ฟลักซ์โรเตอร์
$m_f$	อัตราส่วนระหว่างความถี่ที่ใช้สวิตช์
$m_a$	ดัชนีมอดูเลชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_d$	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
$h$	ลำดับฮาร์มอนิกส์
$T_s$	เวลาแซมปลิง
$t_{0-7}$	ช่วงเวลาการสวิตช์
$w, -\varepsilon$	น้ำหนักของโครงข่ายประสาท
$b$	ค่ายกระดับของโครงข่ายประสาท
$Y$	หน่วยชั้นชั้นซ่อนเอาต์พุต
$y$	เอาต์พุตฟังก์ชันชั้นซ่อนเอาต์พุต
$d$	เอาต์พุตโครงข่ายประสาทที่ใช้
$z_j$	เป้าหมายเอาต์พุตฟังก์ชันชั้นซ่อนอินพุต
$x$	หน่วยอินพุตโครงข่าย
$Z$	หน่วยชั้นชั้นซ่อนอินพุต
$v$	ทิศทางการไหลของสัญญาณ
$\delta_j$	ค่าผิดพลาดหน่วยชั้นซ่อนอินพุต
$\delta_k$	ค่าผิดพลาดหน่วยชั้นซ่อนเอาต์พุต
$X_i$	อินพุตฟังก์ชันชั้นซ่อนอินพุต
$y_k$	เป้าหมายเอาต์พุตฟังก์ชันชั้นซ่อนเอาต์พุต
$v_{0j}$	ค่าไบอัสหน่วยชั้นซ่อนอินพุต
$w_{0k}$	ค่าไบอัสหน่วยชั้นซ่อนเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเริ่มมีการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในงานวิจัยด้านอุตสาหกรรมในหลาย ๆ รูปแบบด้วยกัน เช่น การควบคุมเครื่องจักร การวิเคราะห์ในระบบไฟฟ้า เพราะโครงข่ายประสาทเทียมสามารถที่จะปรับตัวให้สามารถรับรู้สภาพที่เปลี่ยนแปลงได้ สิ่งนี้เป็นประโยชน์อย่างมากในการแก้ปัญหาอีกหลายประเภท เพราะสมองของมนุษย์เรานั้นสามารถที่จะเกิดและวิเคราะห์ได้อย่างลึกลับซับซ้อน จึงได้มีการนำแนวคิดการทำงานของสมองมนุษย์นั้นมาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพความชาญฉลาดของคอมพิวเตอร์ โดยวิธีการนี้จะทำหน้าที่คล้ายกับสมองของมนุษย์ในรูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียม อันเป็นการลอกเลียนการทำงานของเซลล์ประสาท (nerve cells) ซึ่งมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า นิวรอน (neuron) ของโครงข่ายประสาทเทียม การนำไปประยุกต์ใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมถูกสร้างขึ้นเพื่อเลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์ มีการทำงานแบบขนานจำนวนมาก ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซพตรอนหลายชั้น (Multi-layer perceptron Neural Network) หรือโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ(Feed-forward Backpropagation Neural Network) ซึ่งเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบต้องมีผู้สอน(Supervised Learning)

ซึ่งนำมาใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เพราะในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ได้มีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอย่างแพร่หลายเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะเห็นได้ว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีราคาที่สูงและต้องบำรุงรักษาแปร่งถ่านอยู่เสมอดังนั้นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจึงถูกนำมาวิจัยและพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานในภาคอุตสาหกรรม คริว เรือน ยานยนต์ การเกษตรกรรมและอีกมากมายเนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีต้นทุนที่ถูก มีความแม่นยำสูงและโครงสร้างไม่ซับซ้อนจึงเป็นที่นิยมในปัจจุบัน การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ (1)การควบคุมแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่ (V/F) (2)การควบคุมแบบเวกเตอร์ ข้อดีคือจะควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ได้โดยตรง ซึ่งการควบคุมเวกเตอร์ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เป็นแบบการควบคุมเวกเตอร์แบบทางอ้อม ในการพัฒนางานทำวิจัยในครั้งนี้ได้นำการควบคุมเวกเตอร์แบบทางอ้อมมาศึกษาเพื่อพัฒนาเป็นทางเลือก ในส่วนของระบบควบคุมนำหลักการปัญญาประดิษฐ์ นั่นคือโครงข่ายประสาทเทียมนำมาใช้สำหรับการทำนายหาอัตราส่วนค่าแรงบิดอ้างอิงในรูปควบคุมความเร็วและค่ากระแสในรูปควบคุมกระแสในแกน  $d$  และแกน  $q$  เพื่อสร้างสัญญาณ

ไซน์อ้างอิงสามเฟสที่เหมาะสมกับการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ในกรณีที่ต้องการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ในสภาวะต่างๆ ซึ่งทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

## 1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาและนำเสนอหลักการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสทางอ้อม โดยทั่วไปมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับไม่สามารถควบคุมความเร็วรอบให้มีประสิทธิภาพได้ จึงได้ใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมอาศัยโครงข่ายประสาทเทียมทำนายหาแรงบิดอ้างอิงในรูปควบคุมความเร็วและลูปควบคุมกระแสในแกน  $d$  และแกน  $q$  เพื่อไปสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงที่เหมาะสม นำไปมอดูเลชันสร้างสัญญาณพัลส์ชนิดแบบไม่ต่อเนื่องให้อินเวอร์เตอร์สามเฟสขับเคลื่อนมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพ

## 1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้หลักการวิเคราะห์ทฤษฎีเบื้องต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และแนวความคิดการทำงานโครงข่ายประสาทเทียมโดยได้แนวคิดมาจากบทความต่อไปนี้

1.3.1 Miloudi, Y. Miloud และ A. Draou ได้นำเสนอบทความวิชาการ A Neural Network Based Speed Control Design Strategy of an Indirect Vector Controlled Induction Machine Drive ได้เสนอเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมด้วย ANN สำหรับการปรับความเร็วของการขับเคลื่อนเครื่องจักรไฟฟ้าแบบอินดักชันที่ใช้เทคนิคฟลด์โอเรียนเต้ด ผู้เขียนได้เสนอตัวควบคุมแบบ PI เปรียบเทียบโครงข่ายประสาทเทียมโดยโครงข่ายประสาทเทียมจะเป็นแบบ feed-forward ที่มีชั้นซ่อนหนึ่งชั้นในการเรียนรู้ความสัมพันธ์ไม่เชิงเส้นของ input-output ผลการจำลองของระบบที่ควบคุมด้วย ANN แสดงให้เห็นถึงผลการทำงานที่ดี โดยมีการปรับความเร็วของมอเตอร์ได้อย่างรวดเร็วและไม่มี overshoot ในส่วนการติดตาม step commands ก็ถูกต้องโดยไม่มี steady-state error และไม่มี overshoot load disturbances ถูกปฏิบัติได้อย่างรวดเร็วและการแปรผันแปรของพารามิเตอร์ของมอเตอร์

1.3.2 Shuhui Li, Hoyun Won และ Donald C. Wunsch ได้นำเสนอบทความวิจัยเรื่อง Neural-Network Vector Controller for Permanent-Magnet Synchronous Motor

Drives: Simulated and Hardware-Validated Results ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการควบคุมกระแสในเครื่องยนต์ไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร (PMSM) มีวัตถุประสงค์หลักสองข้อ วัตถุประสงค์แรกคือการพัฒนาตัวควบคุมเวกเตอร์แบบโครงข่ายประสาทเทียม (NN) เพื่อลดปัญหาความไม่แม่นยำกับวิธีการควบคุมเวกเตอร์ โครงข่ายประสาทเทียมถูกพัฒนาเพื่อใช้กับสมการพลศาสตร์ของ PMSM และได้รับการฝึกสอนให้มีการควบคุมที่ดีที่สุด วัตถุประสงค์ที่สองคือการเปรียบเทียบการทำงานของตัวควบคุม ANN ควบคุมแบบเวกเตอร์ และแบบดั้งเดิม (PI) ใต้การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของมอเตอร์และสภาพการล้มควบคุมแบบไดนามิก

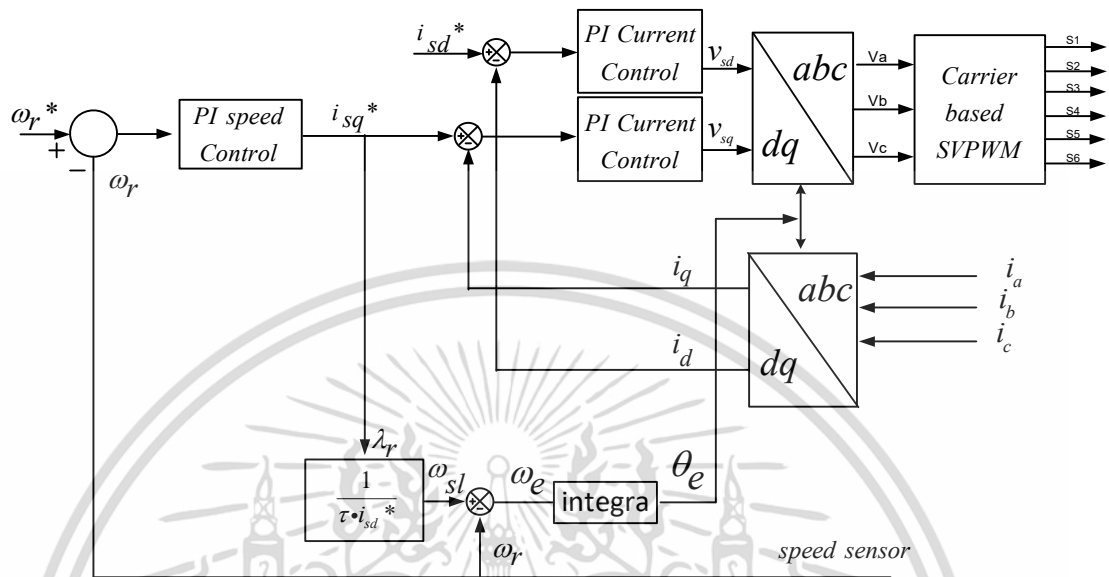
- 1.3.3 Mustafa Mohamadian, Farhad Ashrafzadeh และ Alfred Chu ได้นำเสนองานวิจัย A Novel Neural Network Controller and Its Efficient DSP Implementation for Vector-Controlled Induction Motor Drives ในงานวิจัยนี้ได้แนะนำตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมถูกนำไปใช้งานบนตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) รุ่น TMS320C30 ของ Texas Instruments ตัวควบคุมนี้จำลองการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยสร้างสัญญาณกระแสในกรอบหุตุหนึ่งคงที่สองเฟส ในที่นี้โครงข่ายประสาทเทียมถูกสอนให้เป็นฟังก์ชันที่สำคัญในการประมาณค่ากระแสในแกน  $i_{ds}$  และแกน  $i_{qs}$  ในการหมุน ตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมมีสัญญาณอินพุต 5 อินพุต ได้แก่ 1) สัญญาณความเร็ว  $\omega$ , 2) ค่ากระแสปัจจุบันของแกนในกรอบการอ้างอิง  $i_{qs}^e$ , 3) ค่ากระแสปัจจุบันที่ถูกหน่วงเวลาไว้  $i_{qs}^e$  ให้ล่าช้า 4) สัญญาณผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม  $i_{ds}$  ที่ถูกหน่วงเวลาระยะหนึ่ง 5) สัญญาณผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม  $i_{qs}$  ที่ถูกหน่วงเวลาระยะหนึ่ง โดยตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมใช้แบบสามชั้น 17 เซลล์ประสาท เพื่อลดการคำนวณของ DSP ผลลัพธ์ที่ได้จากการตอบสนองความเร็วมอเตอร์เป็นไปอย่างรวดเร็วโดยผิดพลาดเล็กน้อยในสภาวะความเร็วคงที่

- 1.3.4 Bimal K. Bose ได้นำเสนอบทความเกี่ยวกับ Neural Network Applications in Power-Electronics and Motor Drives An Introduction and Perspective บทความนี้แนะนำมุมมองการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมในการควบคุมอัจฉริยะประมาณค่าสำหรับงานเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งคุณสมบัติโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าและแบบป้อนกลับมีการยอมรับในการใช้งานเกี่ยวกับด้านเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ แอปพลิเคชันตัวอย่างในบทความนี้คือ ฟังก์ชันไม่เชิงเส้น, การกรองสัญญาณ

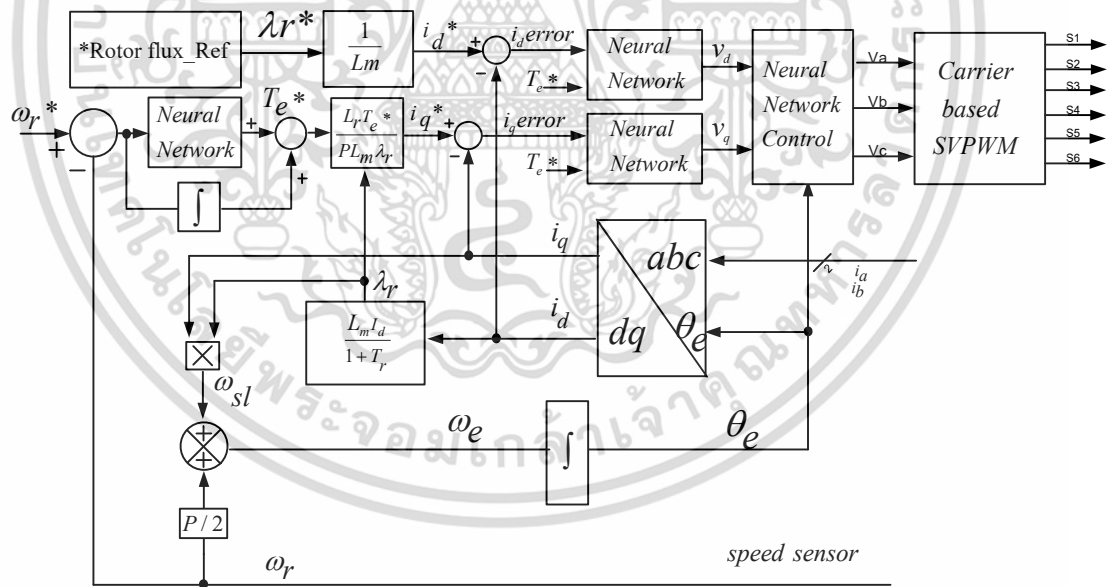
ล่าช้าและประมวลผลสัญญาณ, ประมวลผลสัญญาณป้อนกลับของการขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์, สเปซเวกเตอร์ PWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับและหลายระดับ, การประมวลผลค่าฟลักซ์แบบปรับตัวได้สำหรับการควบคุมเวกเตอร์ AC ไดรฟ์ ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์และการขับเคลื่อนมอเตอร์

- 1.3.5 E. S. Abdin, G. A. Ghoneem, H. M. M. Diab, และ S. A. Deraz. ได้นำเสนอบทความเรื่อง Efficiency Optimization of a Vector Controlled Induction Motor Drive Using an Artificial Neural Network บทความนี้นำเสนอวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพของไดรฟ์มอเตอร์ไฟฟ้าแบบควบคุมด้วยเวกเตอร์ จุดสำคัญคือการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการหาคะแสที่สร้างฟลักซ์ที่ดีที่สุดโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมถูกสร้างโดยโปรแกรม Matlab/Simulink ซึ่งโมเดลนี้มีชุดข้อมูลอินพุตคือโหลดแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ที่ควบคุมแบบเวกเตอร์แบบอ้อม โดยเอาต์พุตเป็นการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานการสูญเสียในแกนเหล็กเนื่องจากฟลักซ์และความผันแปรของความถี่จะถูกนำมาพิจารณา ผลการจำลองของแนวทางที่นำเสนอแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงในด้านการประหยัดพลังงานและการเพิ่มประสิทธิภาพ

จากทฤษฎีและแนวคิดในงานวิจัยที่ได้กล่าวมา นำมาซึ่งการประยุกต์ใช้ในงานวิจัย การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม ในบทความวิจัยที่ 1.3.1 นำโครงข่ายประสาทเทียมแบบ ANN มาควบคุมในรูปของความเร็วรอบเพื่อลด overshoot ความเร็วรอบในสภาวะพลวัต บทความวิจัยที่ 1.3.2 ประยุกต์โครงข่ายประสาทเทียมในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ในรูปกระแสโดยใช้เทคนิคเวกเตอร์คอนโทรลโดยกำหนดเงื่อนไขอินพุตเพียง 2 เงื่อนไข อีกทั้งในบทความวิจัยที่ 1.3.3 ได้นำแนวคิดและประยุกต์โครงข่ายประสาทเทียมนำไปใช้งานในการประมวลผลบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งรับสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลเพื่อประมวลผลเทคนิคเวกเตอร์คอนโทรล เพื่อนำไปสร้างสัญญาณสวิตช์ (PWM) ไปขับอินเวอร์เตอร์ โดยทั้งนี้ได้นำแนวคิดจากบทความวิจัยที่ 1.3.4 โครงข่ายประสาทเทียมมาพัฒนาในอุตสาหกรรมเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ในการแก้ปัญหาเชิงวิเคราะห์ สัญญาณ PWM โดยใช้สัญญาณไซน์อ้างอิงที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม และบทความวิจัยที่ 1.3.5 เป็นการจำลองโครงข่ายประสาทเทียมด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยแนวความคิดที่ได้กล่าวมานำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แสดงบล็อกไดอะแกรมแนวคิดหลักการควบคุมเวกเตอร์ทางอ้อมแบบเดิม (ก) และหลักการควบคุมเวกเตอร์ทางอ้อมที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียม (ข) ได้ดังรูปที่ 2.1



(ก) บล็อกไดอะแกรมแนวคิดหลักการควบคุมเวกเตอร์ทางอ้อมแบบเดิม



(ข) บล็อกไดอะแกรมแนวคิดหลักการควบคุมเวกเตอร์ทางอ้อมใช้โครงข่ายประสาทเทียม

รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมแนวความคิดหลักการควบคุมเวกเตอร์ทางอ้อมป้อนไปข้างหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้มีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม

1.4.1 ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมภายใต้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม

1.4.2 ออกแบบตัวควบคุมโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์โครงข่ายประสาทเทียมผ่านทางโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

1.4.3 การยืนยันผลการตอบสนองของระบบด้วยชุดต้นแบบของงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบกับผลการจำลอง เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านทางโปรแกรมสำเร็จรูป Power System Block sets ใน SIMULINK

1.4.4 ทำการเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางพลวัตของชุดต้นแบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียมและแบบดั้งเดิม (Pi control)

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 การใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ที่มีการนำไปประยุกต์ใช้กับโปรแกรม Code composer studio (CCS) กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28379D

1.5.2 ได้เรียนรู้โครงสร้างและออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบ (ANN) ข้อมูลในการฝึกสอนของโครงข่ายในเชิงสถิติ

1.5.3 เป็นแนวทางพื้นฐานในการศึกษาถึงการคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม ข้อดีและข้อเสียของตัวควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียม

1.5.4 ผลการศึกษาและวิจัยสามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อนำไปใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม

## 1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม ทำการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาทำนายค่าแรงบิดอ้างอิงและกระแสแกน  $dq$  และสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงในการนำไปมอดูเลชันกับสัญญาณคล้ายสามเหลี่ยม สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์สามเฟสได้ตามบททดสอบที่ตั้งไว้ได้ โดยเนื้อหาวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยรายละเอียดจำนวน 7 บท โดยมีเค้าโครงของแต่ละบทโดยสังเขปดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ที่นำไปทำให้อยู่ในกรอบอ้างอิงสองเฟสในการการแปลงแบบคลาร์กและการแปลงแบบปาร์ค ในการนำไปควบคุมแบบเวกเตอร์ที่ใช้หลักการควบคุมแบบฟีดแบ็คอเรียนต์ดักทางอ้อมหรือการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม

บทที่ 3 ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบPWM ในการมอดูเลชันขั้นสูงสำหรับอินเวอร์เตอร์ไฟฟ้าสามเฟส ที่ใช้เทคนิค Space vector pulse width modulation (SVPWM)

บทที่ 4 บทนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานความเป็นมาของโครงข่ายประสาทเทียมและทฤษฎี โดยจะกล่าวถึงโครงสร้างลักษณะเซลล์ประสาทเชิงชีววิทยา และการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมอีกทั้งอธิบายถึงสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม และการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อไปใช้งาน

บทที่ 5 การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม การใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ที่มีการออกแบบของโครงข่ายประสาทเทียมนำไปประยุกต์ใช้กับโปรแกรม Code composer studio (CCS) และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28379D โดยมีโมดูลกำลังอินเวอร์เตอร์สามเฟส PM25RSB120 เป็นตัวรับสัญญาณ PWM เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตชิง (switching) ไปขับมอเตอร์

บทที่ 6 ผลการจำลองและผลการทดสอบ การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม โดยทำการวิเคราะห์การตอบสนองทางพลวัต ความเร็วรอบ แรงบิด โรเตอร์ฟลักซ์ค่านวม กระแสแกน  $d$  กระแสแกน  $q$  ในสภาวะ เริ่มต้นการหมุนของมอเตอร์ ,เพิ่มโหลดและปลดโหลด ,กลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ , มอเตอร์หยุดนิ่งเป็นศูนย์ ,เปลี่ยนความเร็วรอบความเร็วรอบของมอเตอร์ และได้ทำการทดสอบกับชุดต้นแบบจริงเพื่อยืนยันความถูกต้องในการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

บทที่ 7 การกล่าวสรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ รวมถึงการวิเคราะห์ผลการจำลองและทดสอบ การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม ที่ได้นำเสนอและในส่วนสุดท้ายเป็นส่วนขอเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาต่อรวมถึงการประยุกต์ใช้งานในงานวิจัยด้านอื่นๆ

## บทที่ 2

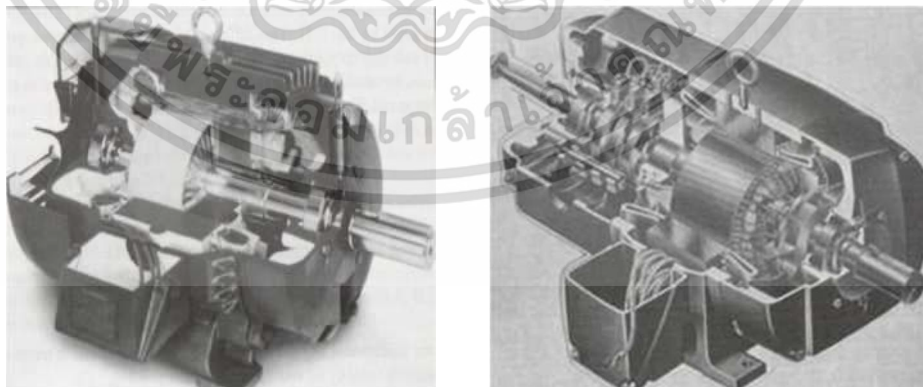
# ทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในกรอบอ้างอิง $dq$

### 2.1 บทนำ

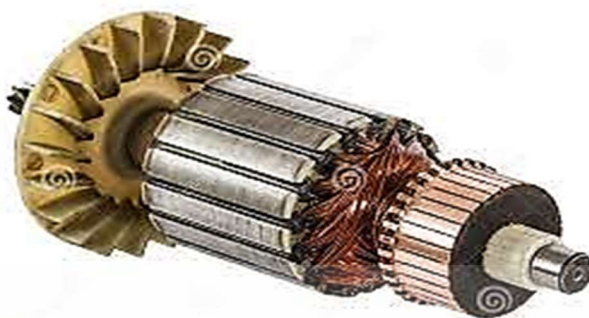
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เป็นรากฐานที่สำคัญของการควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธีการทางเวกเตอร์ ซึ่งการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์รวมถึงนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ดังนั้น จะต้องรู้โครงสร้างภายในและระบบการทำงานของตัวมอเตอร์ศึกษาได้จากวงจรสมมูลที่อยู่ในรูปแบบกรอบอ้างอิง  $dq$  โดยใช้การแปลงแบบคลาร์กและการแปลงแบบพาร์คซึ่งง่ายต่อการนำไปปรับปรุง

### 2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ Induction Motors [12]

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยอาศัยหลักการของการเกิด สนามแม่เหล็กหมุน โครงสร้างเครื่องจักรแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะมีลักษณะแท่งตัวนำวางเรียงอยู่ในแนวตามความยาวของโรเตอร์ และแท่งตัวนำเหล่านี้มีการเชื่อมต่อถึงกันทางไฟฟ้าโดยการ ลัดวงจรที่ปลายทั้งสองข้าง ดังรูปที่ 2.2 โรเตอร์ลักษณะนี้เรียกชื่อว่าแบบกรงกระรอก (Squirrel-cage rotor) โรเตอร์อีกแบบหนึ่งจะมีลักษณะเป็นการพันขดลวด (Wound rotor) ซึ่งสามารถลัดวงจรให้ขดลวดต่อถึงกัน หรือต่อเชื่อมกับวงจรไฟฟ้าภายนอกได้ โดยผ่านวงแหวนสลิป (Slip rings) และแปรงถ่าน (Brush) ดังรูปที่ 2.3



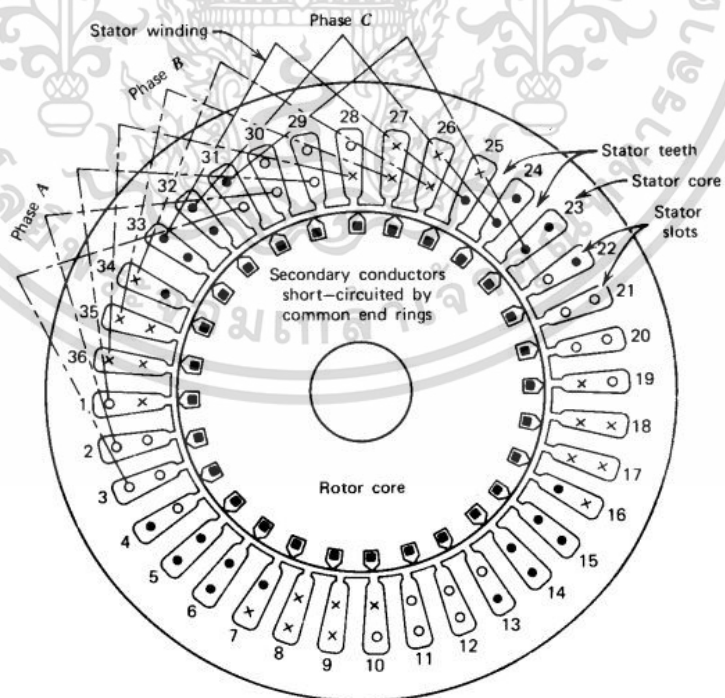
รูปที่ 2.1 โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก [12]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโรเตอร์แบบกรงกระรอก [12]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโรเตอร์แบบพันขดลวด [12]

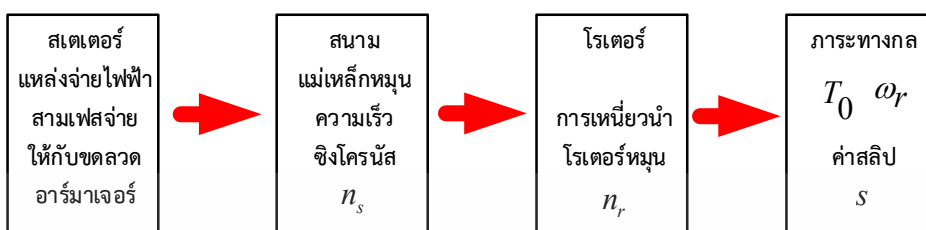


รูปที่ 2.4 โครงสร้างสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำประกอบด้วยขดลวดอาร์มาเจอร์แบบสามเฟส [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของสเตเตอร์จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสคือประกอบด้วยขดลวดอาร์มาเจอร์ แบบสามเฟส ( $a, b, c$ ) และมีการต่อร่วมกันแบบสตาร์หรือแบบเดลต้าดังรูปที่ 2.4 เมื่อขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสได้รับค่า กระแสไฟฟ้าสามเฟสจากแหล่งจ่ายภายนอกจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นมาที่มีความเร็วซิงโครนัส  $n_s$  โดยที่ความเร็วมีจะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและจำนวนขั้วแม่เหล็กของเครื่องจักรไฟฟ้าและยังสามารถกำหนดทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนนี้ได้โดยการสลับลำดับเฟสของสัญญาณกระแสไฟฟ้าสามเฟสคู่ใดคู่หนึ่ง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแท่งตัวนำต่าง ๆ ที่วาง อยู่บนโรเตอร์จะเกิดการตัดกับสนามแม่เหล็กหมุนโดยพิจารณาในลักษณะแนวเคลื่อนที่สัมพัทธ์แท่งตัวนำจะเกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้นมาซึ่งทำให้เกิดค่ากระแสเหนี่ยวนำในแท่งตัวนำ ค่ากระแสนี้จะมีผลทำให้เกิดแรงทางกลกระทำกับแท่งตัวนำ ต่าง ๆ ในทิศทางที่ทำให้เคลื่อนที่ไปในแนวเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วของโรเตอร์  $n_r$  จะเห็นได้ว่าความเร็วโรเตอร์นี้จะไม่สามารถมีขนาดเท่ากับความเร็วซิงโครนัสทั้งนี้เนื่องจากถ้าความเร็ว  $n_r = n_s$  แท่งตัวนำจะมีสภาพหยุดนิ่งอยู่กับที่เมื่อเทียบกับสนามแม่เหล็กหมุนทำให้ไม่สามารถเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นได้ทั้งนี้เพราะแท่งตัวนำไม่มีการตัดกับสนามแม่เหล็กจึงไม่สามารถเกิดแรงทางกลกระทำกับแท่งตัวนำ

ขั้นตอนของการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ดังนั้นจากหลักการพื้นฐานดังกล่าว เครื่องจักรไฟฟ้านี้เรียกชื่อว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำ พิจารณาการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะเริ่มหมุน (โรเตอร์อยู่นิ่งกับที่กำลังจะหมุน  $n_r = 0$ ) แท่งตัวนำจะตัดกับสนามแม่เหล็กหมุนเต็มทีด้วยความเร็วซิงโครนัส  $n_s$  และเมื่อโรเตอร์เกิดการหมุนด้วยความเร็ว  $n_r$  แท่งตัวนำจะตัดกับสนามแม่เหล็กด้วยความเร็ว  $n_s - n_r$  จะเห็นได้ว่าในขณะที่เริ่มหมุนโรเตอร์จะเกิดการเหนี่ยวนำมากที่สุด และต่อจากนั้นการเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับความเร็วโรเตอร์ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าภาระทางกล เช่น เมื่อมีภาระทางกลน้อยๆหรือสภาพไม่มีภาระทางกล (No-load) ความเร็วโรเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัส โรเตอร์จะเกิดค่ากระแสเหนี่ยวนำเล็กน้อยเนื่องจากต้องการภาระทางกลเพียงเล็กน้อย (ค่าแรงเสียดทานทางกลของโรเตอร์) และเมื่อภาระทางกลเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความเร็วโรเตอร์ลดลงมีผลทำให้โรเตอร์เกิดการเหนี่ยวนำที่มากขึ้นและจะทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำ และแรงทางกลมากขึ้นได้ตามความต้องการของภาระทางกล การเพิ่มขึ้นของกระแสเหนี่ยวนำในลักษณะนี้เป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำมีความต้องการกำลังไฟฟ้า (กระแส) ที่เพิ่มขึ้นจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอกตามความต้องการของภาระทางกลที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถแสดงให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของค่าสลิป  $s$  (Slip) ดังนี้

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2-1)$$

เมื่อ  $s$  เป็นค่าสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ไม่มีหน่วย  $n_s$  และ  $n_r$  มีหน่วยเป็น rpm

$$n_r = (1-s)n_s \quad (2-2)$$

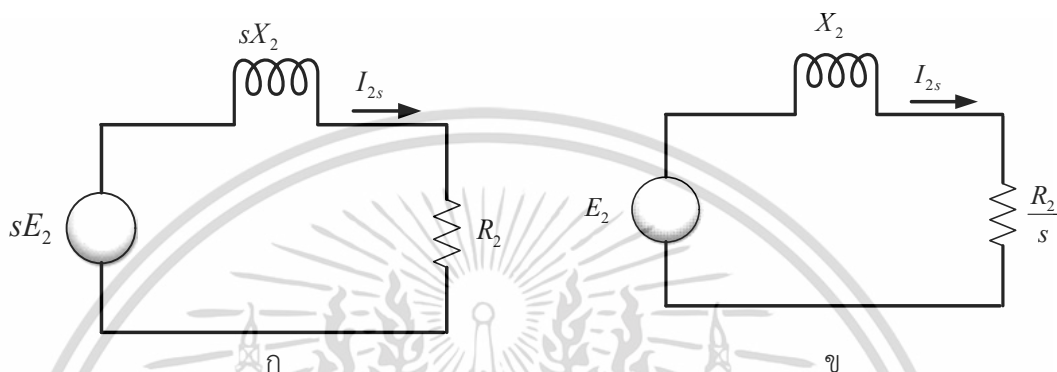
ในขณะที่เริ่มหมุนค่าสลิปจะเท่ากับ 1 และขณะที่ไม่มีภาระทางกลค่าสลิปจะมีค่าน้อยมาก (เข้าใกล้ศูนย์) ดังนั้นค่าสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะมีค่าเป็นบวกและอยู่ระหว่างค่า 0 ถึง 1 และค่าสลิปจะไม่มีค่าเป็นศูนย์

$$\text{ความถี่ของโรเตอร์ } f_r = sf_e \quad (2-3)$$

ในขณะที่เริ่มหมุน (Starting) ค่าสลิปจะเท่ากับ 1 ความถี่ของโรเตอร์  $f_r$  จะเท่ากับความถี่  $f_e$  ของสเตเตอร์

### 2.2.1 วงจรสมมูลของโรเตอร์ต่อเฟส (Per Phase Rotor Equivalent Circuit)

จากสมการที่ (2-3) จะเห็นได้ว่าค่าความถี่ของโรเตอร์จะมีค่าเปลี่ยนไปตามค่าสลิป ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้าที่โรเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าสลิป



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของโรเตอร์ต่อเฟส

$$X_{2s} = sX_2 \quad (2-4)$$

เมื่อ  $X_{2s}$  และ  $X_2$  เป็นค่า leakage reactance ของโรเตอร์ที่ค่าสลิปใด ๆ และขณะหยุดนิ่งตามลำดับ

$$E_{2s} = sE_2 \quad (2-5)$$

เมื่อ  $E_{2s}$  และ  $E_2$  เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ที่ค่าสลิปใด ๆ และขณะหยุดนิ่งตามลำดับ วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของโรเตอร์ต่อเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 จากรูปที่ (2.6ก) จะได้ว่า

$$I_{2s} = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} \quad (2-6)$$

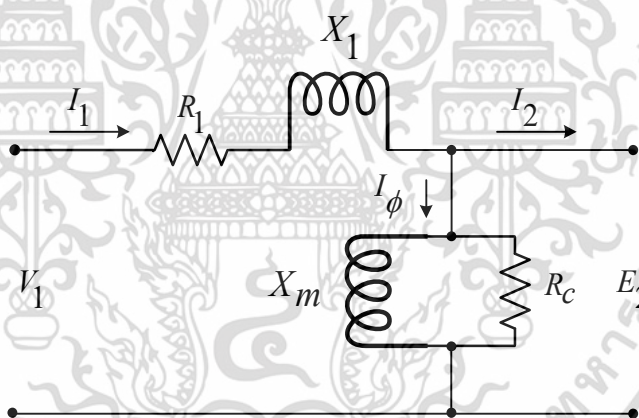
เมื่อ  $I_{2s}$  เป็นค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ที่ค่าสลิปใด ๆ และ  $R_2$  เป็นความต้านทานไฟฟ้าของโรเตอร์จัดรูปสมการที่ (2-6) ใหม่จะได้ว่า

$$I_{2s} = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2/s)^2 + (X_2)^2}} \quad (2-7)$$

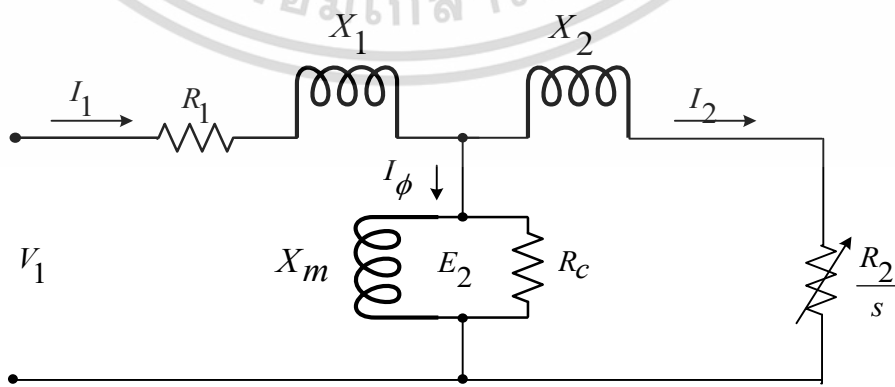
ซึ่งสามารถแสดงเป็นวงจรสมมูลไฟฟ้าใหม่ได้ดังรูปที่ (2.6ข)

### 2.2.2 วงจรสมมูลของสเตเตอร์ต่อเฟส (Per Phase Stator Equivalent Circuit)

วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ต่อเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 กำหนดให้  $V_1, I_1, R_1$  และ  $X_1$  เป็นค่าแรงดัน ไฟฟ้าพิกัด ค่ากระแส ค่าความต้านทานไฟฟ้า และความต้านทานเสมือน (Leakage reactance) ขณะหยุดนิ่งของสเตเตอร์ตามลำดับ  $R_c$  และ  $X_m$  เป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss resistance) และค่าความต้านทานเสมือนการสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizing reactance) ของสเตเตอร์ตามลำดับการพิจารณาสมมูลในรูปที่ 2.6 และ 2.7 จะได้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังรูปที่ 2.8 โดยกำหนดให้ค่า  $E_2, I_2, R_2$  และ  $X_2$  เป็นค่าที่พิจารณาอยู่ทางด้านสเตเตอร์แล้ว



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ต่อเฟส



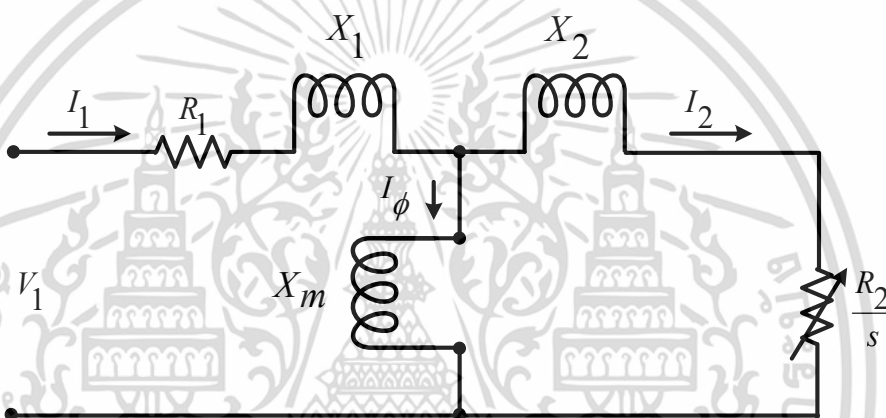
รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ พิจารณาทางด้านสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

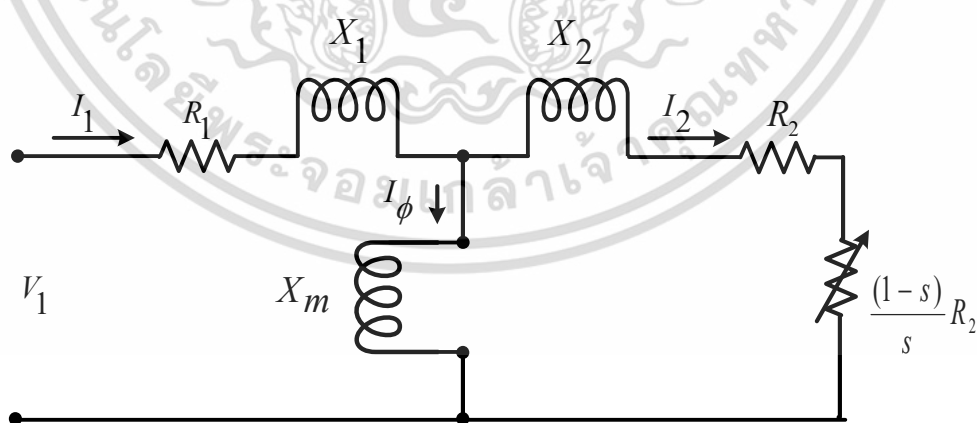
### 2.2.3 คุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าและแรงบิด (Power and Torque Characteristics)

เมื่อพิจารณาให้ค่าสูญเสียในแกนเหล็ก(Core loss) ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ มีค่าคงที่ และนำไปคิดรวมกับการสูญเสียทางกลจะได้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสดังรูปที่ 2.9 ซึ่งค่า  $I_2$  ,  $R_2$  และ  $X_2$  เป็นค่าที่พิจารณาอยู่ทางด้านสเตเตอร์แล้วและกำหนดให้วงจรสมมูลในส่วนโรเตอร์เปลี่ยนใหม่เป็นดังรูปที่ 2.10 โดยที่

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + \frac{(1-s)}{s} R_2 \quad (2-8)$$



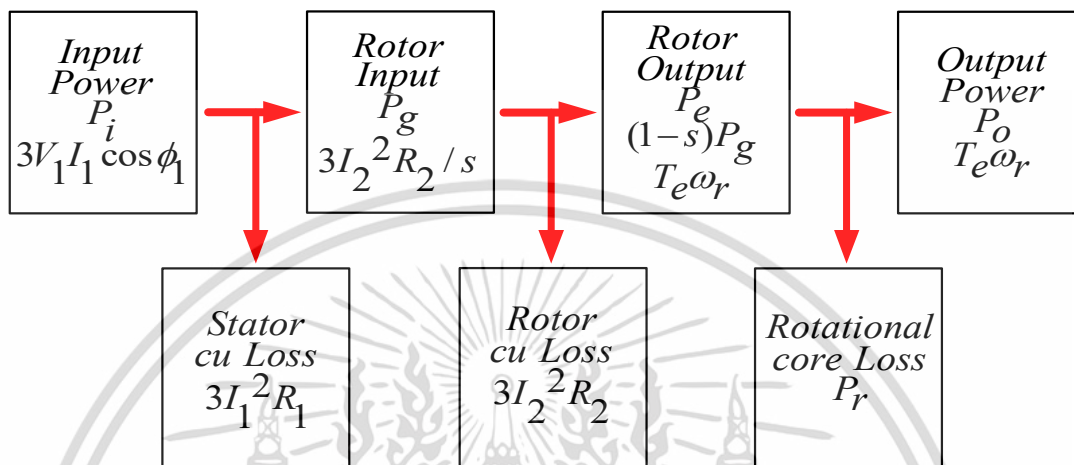
รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ พิจารณาให้ค่าสูญเสียในแกนเหล็กคงที่ และนำไปคิดรวมกับการสูญเสียทางกล



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ใช้สำหรับพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2-8) และรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าค่า  $R_2$  แสดงถึงค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์และค่า  $\frac{(1-s)}{s} R_2$  จะแสดงถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากโรเตอร์ซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานกล



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

จากรูปที่ 2.11 ค่ากำลังไฟฟ้าสามเฟสทั้งหมดที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (Input power - electrical power) พิจารณาได้จาก

$$P_i = 3V_1 I_1 \cos \phi_1 \quad (2-9)$$

ค่าสูญเสียจากลวดทองแดงที่สเตเตอร์ (Stator copper loss)

$$P_{cu,1} = 3I_1^2 R_1 \quad (2-10)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโรเตอร์ (Rotor input -power across air gap)

$$P_g = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2-11)$$

ค่าสูญเสียจากลวดทองแดงที่โรเตอร์ (Rotor copper loss)

$$P_{cu,2} = 3I_2^2 R_2 = sP_g \quad (2-12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากำลังไฟฟ้าที่ออกจากโรเตอร์ (Rotor output - electromagnetic power)

$$P_e = P_g - P_{cu,2} = 3I_2^2 R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) \quad (2-13)$$

$$P_e = P_g - sP_g = (1-s)P_g \quad (2-14)$$

ค่าแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque)

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (2-15)$$

ค่ากำลังทางกลทั้งหมดที่ออกจากมอเตอร์ (Output power - mechanical power)

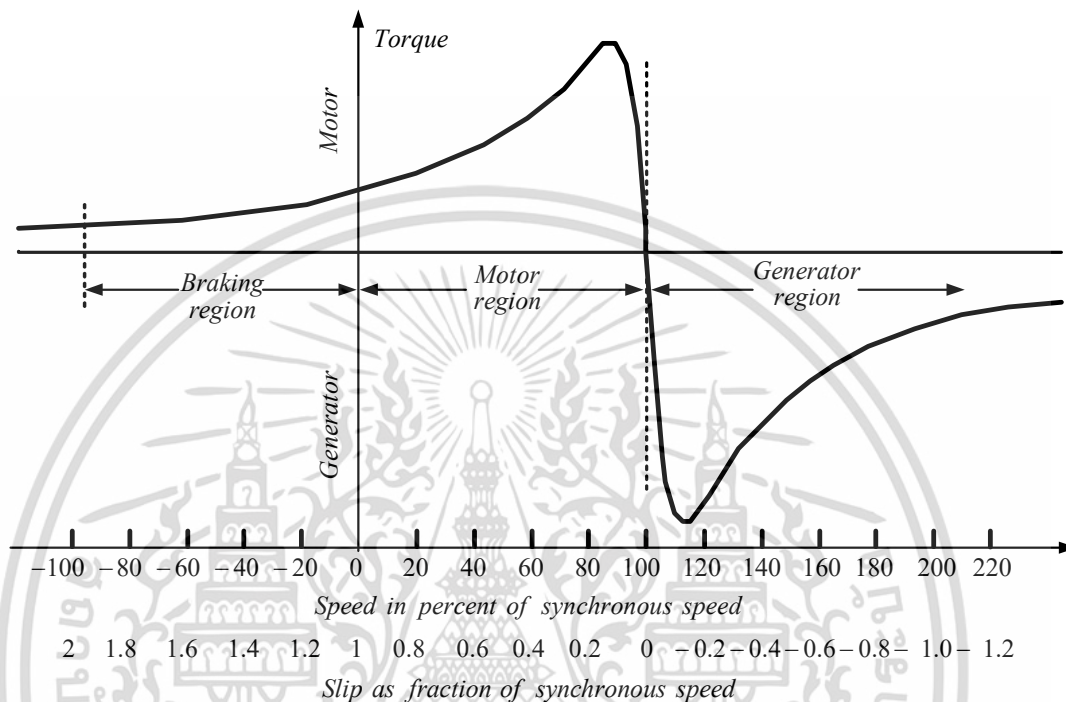
$$P_o = P_e - P_r \quad (2-16)$$

เมื่อ  $P_r$  เป็นค่ารวมของค่าสูญเสียจากการหมุน (Rotational losses) และค่าสูญเสียในแกนเหล็ก ดังนั้นค่าแรงบิดทางกลของมอเตอร์ (Output torque) พิจารณาได้จาก

$$T_o = \frac{P_o}{\omega_r} \quad (2-17)$$

ในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำทำงาน โรเตอร์จะหมุนในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนที่สร้างขึ้นโดยกระแสที่สเตเตอร์ความเร็วของโรเตอร์จะมีค่าอยู่ระหว่างศูนย์และความเร็วซิงโครนัสทำให้เกิดสลลิป  $s$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1.0 และ 0 ซึ่งแสดงได้ในช่วง Motor region ดังรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าขณะมอเตอร์เริ่มหมุนจะมีค่า  $s = 1.0$  สำหรับการทำงานในช่วงที่ ค่าสลลิปมีค่ามากกว่า 1.0 จะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของมอเตอร์มีค่าเป็นลบ นั่นคือมอเตอร์จะต้องถูกทำให้หมุนทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กหมุนเดิมซึ่งจะกระทำได้โดยการสลับเฟสของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพียงคู่ใดคู่หนึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนกลับทิศในทันทีทันใด วิธีการนี้เป็นการทำให้มอเตอร์หยุดหมุนอย่างรวดเร็ว (Plugging) ซึ่งแสดงอยู่ในช่วง Breaking region ดังรูปที่ 2.12 เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำจะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ถ้าขดลวดสเตเตอร์ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสและโรเตอร์ของเครื่องจักรถูก

ขับเคลื่อนโดยต้นกำลังทางกล (Prime mover) ให้มีความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัสทำให้ สลิป  $s$  มีค่าเป็นลบซึ่งแสดงได้ในช่วง Generator region ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงคุณลักษณะค่าแรงบิดและสลิปของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำสามเฟส

#### 2.2.4 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอกประกอบด้วยขดลวดสเตเตอร์ (Stator) ซึ่งมีขดลวดสามเฟสพันอยู่บนร่องของสเตเตอร์โดยวางเรียงห่างกันทำมุม  $120^\circ$  และยังมีส่วนประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือขดลวดโรเตอร์(Rotor)โดยพันอยู่บนแท่งตัวนำ แบบกรงกระรอกถูกคั่นกลางด้วยฉนวนและที่ปลายทั้งสองข้างจะเชื่อมเข้าด้วยกันกับวงแหวนทำให้มีรูปร่างคล้ายกับ กรงกระรอกซึ่งเป็นโครงสร้างที่ง่ายและมีราคาต่ำและได้แสดงโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุลเข้าไป ขดลวดสเตเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนกระจายออกมาในช่องว่างอากาศ (air gap) โดยมีขนาดและหมุนรอบโรเตอร์ด้วยความเร็วคงที่เรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed,  $\omega_s$ ) มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที

ความเร็วเชิงมุมที่ความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะขึ้นอยู่กับความถี่ทางไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2-18)

$$\omega_s = \frac{2}{P} 2\pi f = \frac{2}{P} \omega \quad (2-18)$$

$\omega_s$  คือ ความเร็วเชิงมุมที่ความเร็วเชิงโคจรของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

$P$  คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์

$f$  คือ ความถี่ทางไฟฟ้าของแหล่งจ่าย

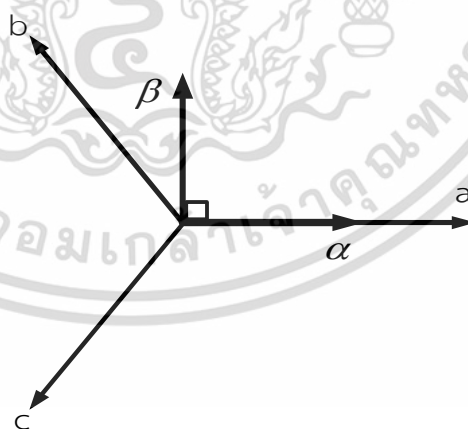
$\omega$  คือ ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของแหล่งจ่าย

จากสมการที่ (2-18) สามารถคำนวณค่าความเร็วเชิงโคจรของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในหน่วยรอบต่อนาทีได้ดังสมการที่ (2-19)

$$n_s = 60 \times \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{120}{P} f \quad (2-19)$$

### 2.3 การแปลงแบบคลาร์ก (Clarke's Transformation) [13]

แบบจำลองสถานการณ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จำเป็นต้องจัดรูปแบบสมการในระบบสามเฟส abc ให้อยู่บนแกน  $\alpha\beta$  ซึ่งจะช่วยลดความซับซ้อนลงได้ตั้งนั้น การศึกษาแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จะนำเสนอในรูปแบบสองแกนโดยใช้รูปแบบการแปลงของการแปลงแบบคลาร์กซึ่งจะแปลงแกน abc ไปเป็นแกน  $\alpha\beta$  แสดง ลักษณะการแปลงแกนได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การแปลงปริมาณสามเฟส abc ให้อยู่บนแกน  $\alpha\beta$

พิจารณาจากรูปที่ 2.13 จะได้สมการการแปลงแกน abc เป็น  $\alpha\beta$  ได้ดังนี้

$$\alpha = a - b \sin 30^\circ - c \sin 30^\circ = a - \frac{1}{2}b - \frac{1}{2}c \quad (2-20)$$

$$\beta = 0 - b \cos 30^\circ - c \cos 30^\circ = -\frac{\sqrt{3}}{2}b - \frac{\sqrt{3}}{2}c \quad (2-21)$$

เขียนเป็นเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (2-22)

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

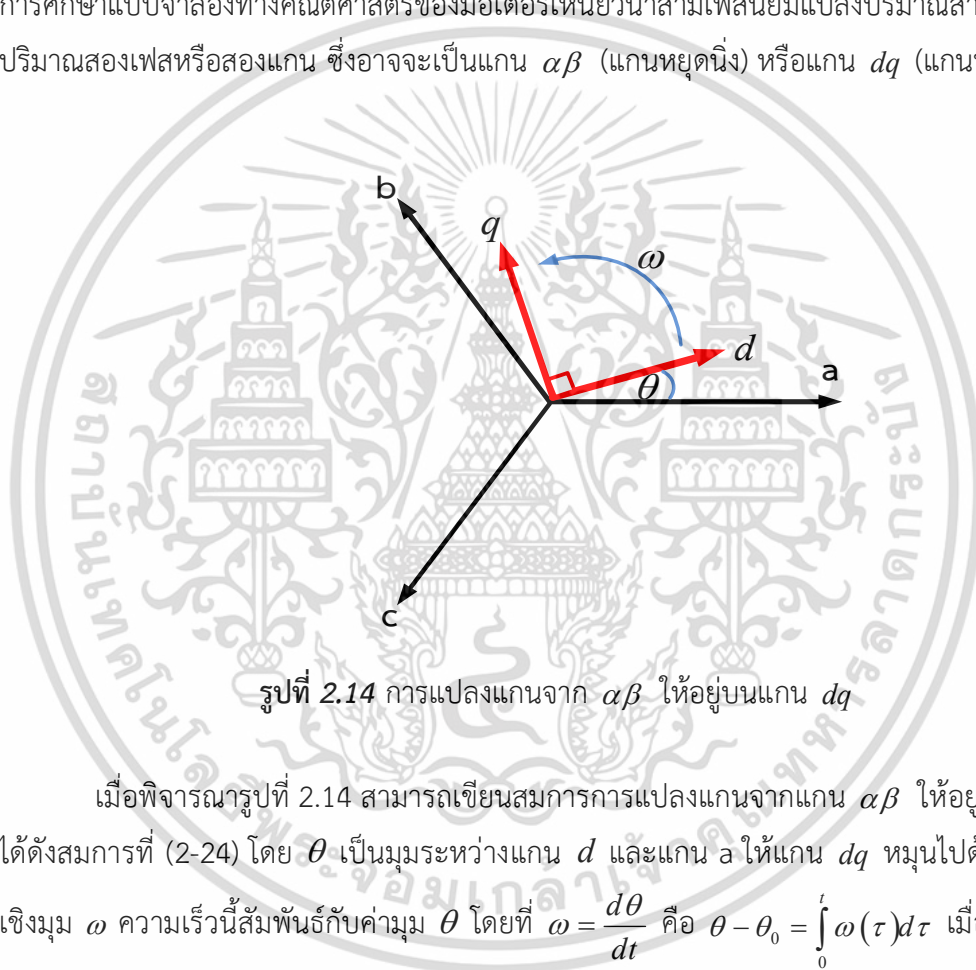
$\frac{2}{3}$  ซึ่งเป็นรูปแบบการแปลงแกนแบบค่ายอด (peak convention) และสามารถแปลงกลับไปอยู่ในระบบ 3 เฟสเช่นเดิมดังแสดงในสมการ (2-23)

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การแปลงแบบพาร์ค (Park's Transformation) [13]

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง การแปลงแกนจากแกน abc ให้อยู่บนแกน dq กล่าวคือระบบจะถูกแปลงจากปริมาณสามเฟสไป เป็นปริมาณสองเฟสที่อยู่บนแกนหมุน (rotating frame) โดยใช้รูปแบบการแปลงแกนแบบพาร์คใน การแปลงแกนแบบพาร์คนั้นได้นำองค์ความรู้ของการแปลงแกนแบบคลาร์กมาพัฒนาต่อเพื่อ แปลงจากปริมาณสองเฟสที่อยู่บนแกนหยุดนิ่ง (stationary frame) ไปเป็นปริมาณสองเฟสที่อยู่บนแกนหมุนโดยแสดงรูปแบบการแปลงแกนแบบพาร์คดังรูปที่ 2.14 ซึ่งการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสนิยมแปลงปริมาณสามเฟสไปเป็นปริมาณสองเฟสหรือสองแกน ซึ่งอาจจะเป็นแกน  $\alpha\beta$  (แกนหยุดนิ่ง) หรือแกน  $dq$  (แกนหมุน) ก็ได้



รูปที่ 2.14 การแปลงแกนจาก  $\alpha\beta$  ให้อยู่บนแกน  $dq$

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.14 สามารถเขียนสมการการแปลงแกนจากแกน  $\alpha\beta$  ให้อยู่บนแกน  $dq$  ได้ดังสมการที่ (2-24) โดย  $\theta$  เป็นมุมระหว่างแกน  $d$  และแกน  $a$  ให้แกน  $dq$  หมุนไปด้วยความเร็วเชิงมุม  $\omega$  ความเร็วนี้สัมพันธ์กับค่ามุม  $\theta$  โดยที่  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  คือ  $\theta - \theta_0 = \int_0^t \omega(\tau) d\tau$  เมื่อ  $\theta_0$  คือ มุมที่เวลา  $t=0$

$$[dq] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} [\alpha\beta] \quad (2-24)$$

แทนสมการที่(2-22)ลงในสมการที่(2-24)จะได้เป็น

$$[dq] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \frac{3}{2} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$[dq] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\frac{1}{2} \cos \theta + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta & -\frac{1}{2} \cos \theta - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \\ -\sin \theta & \frac{1}{2} \sin \theta + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta & \frac{1}{2} \sin \theta - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

จากสมการที่ (2-26) สามารถเขียนเป็นเมทริกซ์สำหรับรูปแบบการแปลงแบบปาร์คได้ดังสมการที่ (2-27)

$$[dq] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

สามารถแปลงแกนจากแกน  $dq$  ไปเป็นปริมาณสามเฟส  $abc$  สามารถทำได้ ดังสมการที่ (2-28)

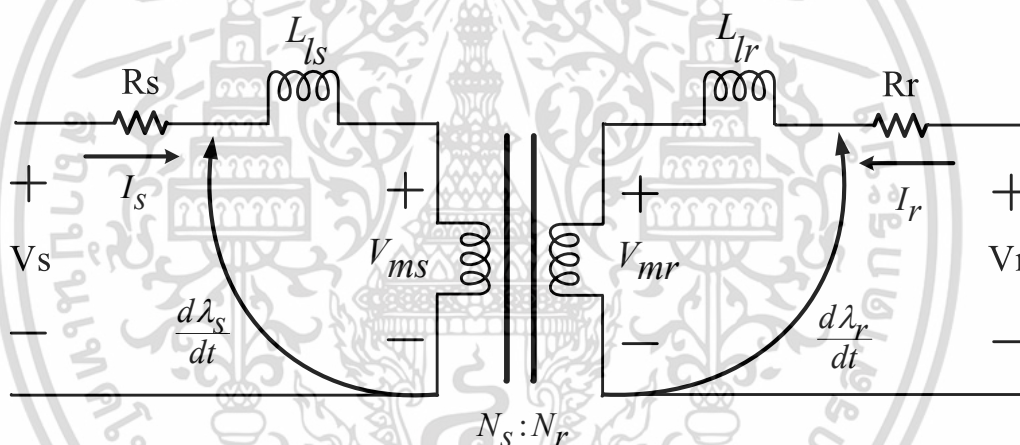
$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} [dq] \quad (2-28)$$

## 2.5 การควบคุมแบบเวกเตอร์ [13]

การควบคุมแบบเวกเตอร์ที่ได้เลียนแบบแนวความคิดและวิธีของการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงกล่าวคือให้มองภาพสนามแม่เหล็กและวิธีการควบคุมแยกออกเป็นสองส่วนคือ

1. ส่วนที่เป็นองค์ประกอบของแกน  $d$  หรือที่เรียกว่า  $i_d$  ทำหน้าที่ควบคุมความเข้มของสนามแม่เหล็กบนแกน  $d$  โดยปกติจะถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ ยกเว้นมอเตอร์หมุนที่ความเร็วเกิน พิกัด
2. ส่วนที่เป็นองค์ประกอบของแกน  $q$  หรือที่เรียกว่า  $i_q$  ทำหน้าที่เหมือนกับ  $i_d$  ของการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง โดยที่  $i_q$  จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราการเร่งและแรงบิดที่เกิดจากโหลด ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วและเมื่อเพิ่มหรือลดโหลดทางกลก็จะไปปรับที่กระแส  $i_q$  โดยตรง

### 2.5.1 วงจรสมมูลทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าลักษณะของขดลวดจะแบ่งเป็น 2 ฟัง และเมื่อพิจารณาเหมือนหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถเขียนสมการแรงดันขดลวดสเตเตอร์และสมการแรงดันขดลวดโรเตอร์ดังสมการที่ (2-29) และ (2-30)

$$V_s = R_s I_s + \frac{d\lambda_s}{dt} \quad (2-29)$$

$$V_r = R_r I_r + \frac{d\lambda_r}{dt} \quad (2-30)$$

จากความสัมพันธ์ของจำนวนรอบขดลวดสเตเตอร์(Ns)และจำนวนขดลวดโรเตอร์ (Nr)ที่มีอัตราส่วนรอบเป็น  $a=N_s/N_r$  สามารถเขียนเป็นสมการแรงดัน กระแส ฟลักซ์ และความต้านทานโรเตอร์ใหม่เมื่อย้ายข้างจากด้านโรเตอร์มาอยู่ด้านสเตเตอร์ เมื่อ  $\theta_r$  คือมุมของโรเตอร์ จะได้

$$V_r = aV_r' e^{j\theta_r} \quad (2-31)$$

$$I_r = \frac{I_r'}{a} e^{j\theta_r} \quad (2-32)$$

$$\lambda_r = a\lambda_r' e^{j\theta_r} \quad (2-33)$$

$$R_r = a^2 R_r' \quad (2-34)$$

เมื่อทำการแปลงสมการที่ (2-30) จากทางด้านโรเตอร์ไปด้านสเตเตอร์โดยนำสมการที่ (2-31)-(2-34) ไปแทนแล้วจะได้

$$\frac{V_r}{a} e^{-j\theta_r} = \frac{R_r I_r}{a} e^{-j\theta_r} + \frac{d}{dt} \left( \frac{\lambda_r e^{-j\theta_r}}{a} \right) \quad (2-35)$$

$$= \frac{R_r I_r}{a} e^{-j\theta_r} + \frac{1}{a} \left( \lambda_r e^{-j\theta_r} \frac{d(-j\theta_r)}{dt} + \frac{d\lambda_r}{dt} e^{-j\theta_r} \right) \quad (2-36)$$

เมื่อ  $\frac{d(\theta_r)}{dt} = \omega_r$  คือความเร็วโรเตอร์แล้วจะได้

$$V_r = \left( \frac{e^{-j\theta_r}}{a} \right) = R_r I_r \left( \frac{e^{-j\theta_r}}{a} \right) + \left( -j\omega_r \lambda_r + \frac{d\lambda_r}{dt} \right) \left( \frac{e^{-j\theta_r}}{a} \right) \quad (2-37)$$

$$V_r = R_r I_r + \left( \frac{d\lambda_r}{dt} - j\lambda_r \omega_r \right) \quad (2-38)$$

เมื่อกำหนดให้  $P = \frac{d}{dt}$  กำหนดสมการแรงดันสเตเตอร์และแรงดันโรเตอร์ทางด้านขดลวดสเตเตอร์ได้ดังสมการที่ (2-39)และ(2-40)เนื่องจากเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกจะได้  $V_r = 0$

$$V_s = R_s I_s + \frac{d\lambda_s}{dt} \quad (2-39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_r = 0 = R_r I_r + \left( \frac{d - j\omega_r}{dt} \right) \lambda_r \quad (2-40)$$

เขียนฟลักซ์สเตเตอร์ และฟลักซ์โรเตอร์ให้อยู่ในรูปของกระแสและความเหนี่ยวนำจะได้

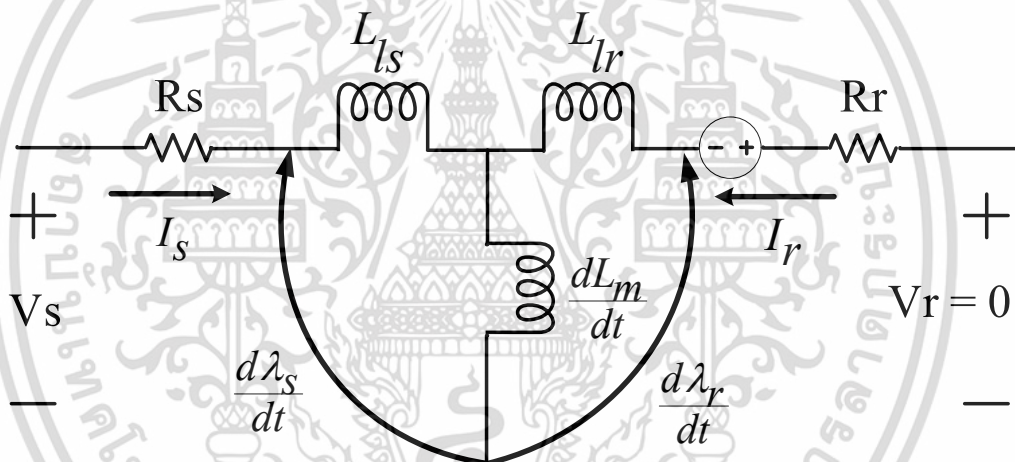
$$\lambda_s = I_s L_s + I_r L_m \quad (2-41)$$

$$\lambda_r = I_s L_m + I_r L_r \quad (2-42)$$

เมื่อ  $L_s$ : ค่าความเหนี่ยวนำสเตเตอร์  $L_s + L_m$

$L_r$ : ค่าความเหนี่ยวนำโรเตอร์  $L_r + L_m$

สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลใหม่ได้ที่อ้างอิงไปทางด้านขดลวดสเตเตอร์ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลทางด้านขดลวดสเตเตอร์

### 2.5.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงแกนหมุน

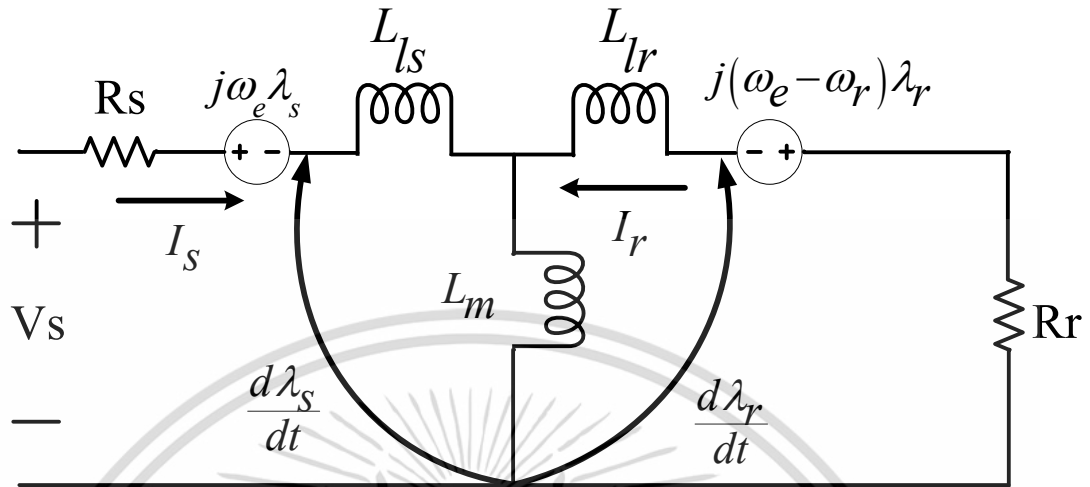
แบบจำลองมอเตอร์ในกรอบอ้างอิงแกนหมุน ต้องอาศัยมุม  $\theta_e$  และจากสมการแรงดันสเตเตอร์และโรเตอร์ (2-37) และ (2-38) นำมาเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_s = R_s I_s + \left( \frac{dj\omega_e}{dt} \right) \lambda_s \quad (2-43)$$

$$0 = R_r I_r + j(\omega_e - \omega_r) \lambda_r + \frac{d\lambda_r}{dt} \quad (2-44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสมการมาเขียนเป็นวงจรสมมูลจะได้ดังนี้



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลในกรอบอ้างอิงแกนหมุน

กำหนดฟลักซ์สเตเตอร์ และโรเตอร์ให้อยู่ในรูปแบบกระแสต่อไปนี้

$$\lambda_s = L_s I_s + L_m I_r \quad (2-45)$$

$$\lambda_r = L_m I_s + L_r I_r \quad (2-46)$$

นำสมการที่ (2-45) และ (2-46) ไปแทนในสมการที่ (2-43) และ (2-44) จะได้

$$V_s = R_s I_s + \left( \frac{dj\omega_e}{dt} \right) (L_s I_s + L_m I_r) \quad (2-47)$$

$$0 = R_r I_r + j(\omega_e - \omega_r) (L_m I_s + L_r I_r) + \frac{d}{dt} (L_m I_s + L_r I_r) \quad (2-48)$$

เมื่อนำสมการที่ (2-47) และ (2-48) มาจัดรูปแบบเวกเตอร์ทางไฟฟ้าให้อยู่บนแกน  $dq$  จะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_{ds} = (R_s + pL_s) I_{ds} - \omega_e L_s I_{qs} + pL_m I_{dr} - \omega_e L_m I_{qr} \quad (2-49)$$

$$V_{qs} = \omega_e L_s I_{ds} + (R_s + pL_s) I_{qs} + \omega_e L_m I_{dr} + pL_m I_{qr} \quad (2-50)$$

$$V_{dr} = pL_m I_{ds} - (\omega_e - \omega_r) L_m I_{qs} + (R_r + pL_r) I_{dr} - (\omega_e - \omega_r) L_r I_{qr} \quad (2-51)$$

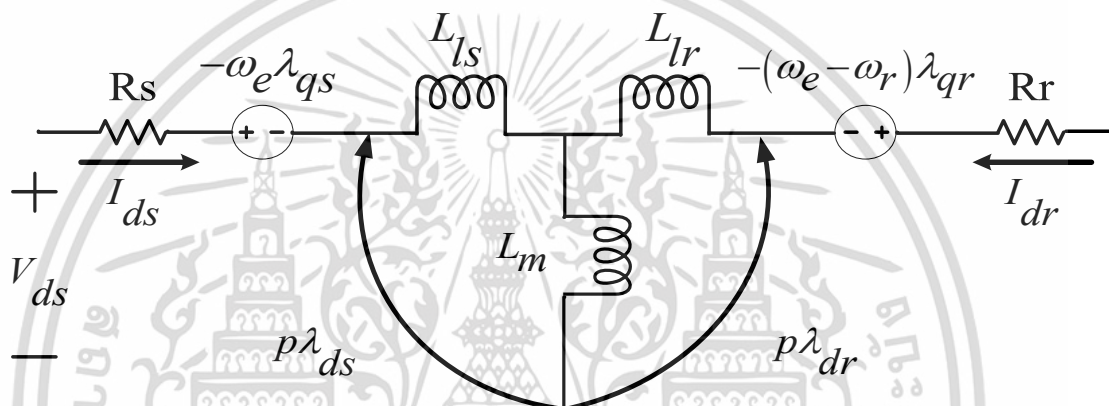
$$V_{qr} = (\omega_e - \omega_r) L_m I_{ds} + pL_m I_{qs} + (\omega_e - \omega_r) L_r I_{dr} + (R_r + pL_r) I_{qr} \quad (2-52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

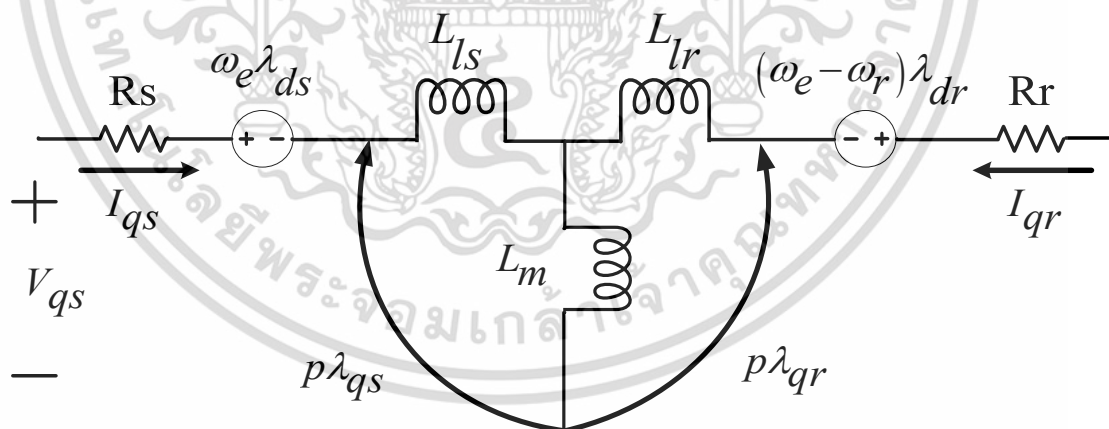
จัดอยู่ในรูปแบบเมทริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega L_s & pL_m & -\omega_e L_m \\ \omega_e L_s & R_s + pL_s & \omega_e L_m & pL_m \\ pL_m & -(\omega_e - \omega_r) L_m & R_r + pL_r & -(\omega_e - \omega_r) L_r \\ (\omega_e - \omega_r) L_m & pL_m & (\omega_e - \omega_r) L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (2-53)$$

จากสมการที่ สามารถเขียนวงจรสมมูลกรอบอ้างอิงแกนหมุนได้ดังนี้



(ก) วงจรสมมูลแกน *d*



(ข) วงจรสมมูลแกน *q*

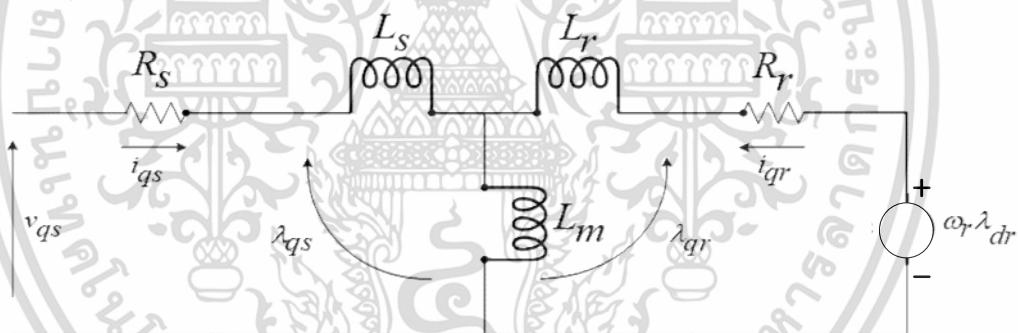
รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลทางพลวัตของมอเตอร์ในกรอบอ้างอิงแกนหมุน

### 2.5.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงแกนหยุดนิ่ง

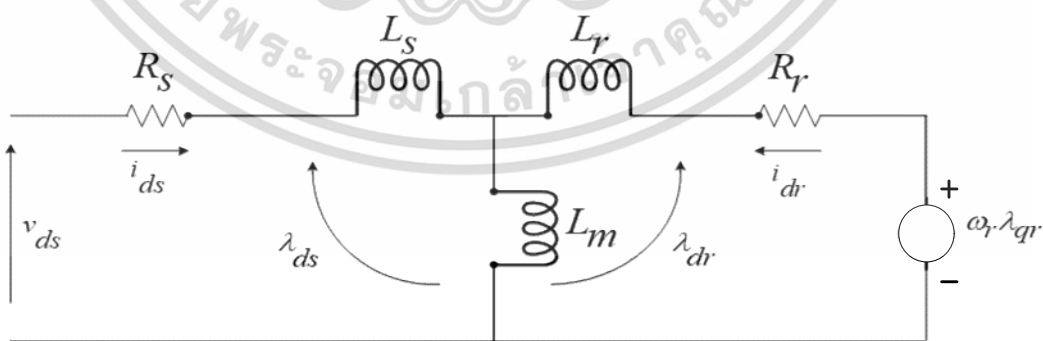
สำหรับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งได้จากสมการที่ (2-53) โดยแทนค่า  $\omega_e$  ให้เป็น 0 จะได้ดังสมการที่ (2-54)

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & \omega_r L_m & R_r + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & pL_m & -\omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (2-54)$$

การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสำหรับการควบคุมแบบเวกเตอร์จึงต้องแปลงปริมาณสามเฟสให้อยู่บนแกน  $d$  และแกน  $q$  เพราะการควบคุมจะใช้หลักการเดียวกันกับมอเตอร์กระแสตรงแสดงวงจรสมมูลในรูปที่ 2.19 และสมการแรงดันที่ขดลวดสเตเตอร์สมการแรงดันที่ขดลวดโรเตอร์สมการฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์และสมการแรงบิดของมอเตอร์ที่ถูกแปลงมาอยู่บนแกน  $d$  และแกน  $q$  ได้ดังนี้



(ก) วงจรสมมูลแกน  $q$



(ข) วงจรสมมูลแกน  $d$

รูปที่ 2.19 วงจรสมมูล  $d$ - $q$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} \quad (2-55)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} \quad (2-56)$$

$$0 = R_r i_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} - \omega_r \lambda_{dr} \quad (2-57)$$

$$0 = R_r i_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} - \omega_r \lambda_{qr} \quad (2-58)$$

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (2-59)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (2-60)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{ds} + L_m i_{ds} \quad (2-61)$$

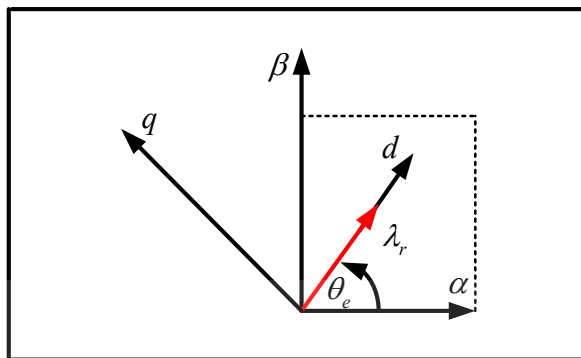
$$\lambda_{qr} = L_r i_{qs} + L_m i_{qs} \quad (2-62)$$

$$T_{em} = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (2-63)$$

$$= \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_{qr} i_{dr} - \lambda_{dr} i_{qr})$$

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

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2-57) และสมการที่ (2-58) จะพบว่าแรงดันที่โรเตอร์ทั้งบนแกน  $d$  และแกน  $q$  จะมีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากโครงสร้างของมอเตอร์กระแสสลับสามเฟสที่นำมาวิเคราะห์เป็นแบบกรงกระรอกซึ่งประกอบด้วยแท่งตัวนำวางเรียงกัน โดยคั่นกลางด้วยฉนวนและที่ปลายทั้งสองข้างจะถูกเชื่อมเข้าด้วยกันกับวงแหวน จึงทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นที่ขดลวดฝั่งโรเตอร์แรงดันที่โรเตอร์จึงมีค่าเป็นศูนย์ โดยทั่วไปวิธีการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จะไม่เหมือนการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรงแต่ในการควบคุมนี้จะใช้หลักการของมอเตอร์กระแสตรงโดย กระแสสนามแม่เหล็ก ( $i_d$ ) ที่ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะกำหนดให้ทำงานเหมือนกันกับกระแสของขดลวดสนามในมอเตอร์กระแสตรง โดยการเลือกแกนหมุนให้หมุนที่ ความเร็วเชิงโรตอร์สจะทำให้แกน  $d$  มีการหมุนอยู่บนแกนของฟลักซ์เชื่อมโยงของขดลวดโรเตอร์และองค์ประกอบของแกน  $q$  ของฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดโรเตอร์ ( $\lambda_{qr}$ ) จะมีค่าเป็นศูนย์แสดงได้ ดังรูปที่ 2.20 ซึ่งเป็นหลักการของการควบคุมแบบฟิลด์ออร์เรียนเต็ด



รูปที่ 2.20 ค่าฟลักซ์ของโรเตอร์เมื่อใช้หลักการควบคุมแบบฟลด์ออร์เรียนเต็ด

รูปที่ 2.20 เมื่อ  $\lambda_{qr}$  เท่ากับศูนย์สามารถเขียนสมการฟลักซ์เชื่อมโยงที่โรเตอร์บนแกน  $q$  ใน สมการที่ (2-62) ได้ใหม่เป็น

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) = L_r i_{qs} + L_m i_{qs} = 0 \quad (2-64)$$

จากสมการที่ (2-64) กระแสโรเตอร์บนแกน  $q$  คำนวณได้ดังนี้

$$i_{qr} = -\frac{L_r}{L_m} i_{qs} \quad (2-65)$$

และเมื่อพิจารณาสมการแรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในสมการที่ (2-64) โดยที่ ค่า  $\lambda_{qr}$  เท่ากับศูนย์จะได้ว่า

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \left( \begin{matrix} \lambda_{qr} i_{ds} - \lambda_{dr} i_{qs} \\ 0 \end{matrix} \right) \quad (2-66)$$

$$T_{em} = -\frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_{dr} i_{qs} \quad (2-67)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า  $i_{qs}$  จากสมการที่ (2-65) ลงในสมการที่ (2-67) สมการแรงบิดทางไฟฟ้าสามารถ เขียนใหม่ได้ ดังสมการที่ (2-68)

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr} i_{qs} \quad (2-68)$$

สมการแรงบิด  $T_{em}$  สามารถเขียน ใหม่ดังสมการที่ (2-69) ดังนี้

$$T_{em} = K_T i_{dr} i_{qs} \quad (2-69)$$

$$\text{เมื่อ } K_T = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \frac{L_m^2}{L_r}$$

จากเงื่อนไขของการควบคุมแบบฟลด์ออร์เรียนเตดได้แสดงให้เห็นว่า ใช้หลักการเดียวกันกับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกการควบคุมแบบฟลด์ออร์เรียนเตด นั้น แกนหมุนจะถูกกำหนดให้หมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนัส ซึ่งจะทำให้การควบคุมฟลักซ์อยู่บนแกน  $d$  เท่านั้น ส่วนฟลักซ์บนแกน  $q$  มีค่าเป็นศูนย์จากเงื่อนไขดังกล่าวจึงทำให้ได้สมการแรงบิด  $T_{em}$  ในสมการที่ (2-67) มีลักษณะของสมการที่เหมือนกันกับ สมการแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรงดังนั้น การควบคุมแบบฟลด์ออร์เรียนเตดจึงสามารถใช้หลักการควบคุมของมอเตอร์กระแสตรงชนิด กระตุ้นแยกได้และจากสมการที่ (2-67) เมื่อการควบคุมฟลักซ์ของมอเตอร์ถูกควบคุมอยู่บนแกน  $d$  เท่านั้น จึงทำให้การควบคุมแรงบิดของมอเตอร์อยู่บนแกน  $q$

## 2.6 การควบคุมแบบฟีดแบ็คอเรียนเต็ททางอ้อม [13]

การควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม จากเงื่อนไขของการควบคุมแบบฟีดแบ็คอเรียนเต็ท เมื่อพิจารณาสมการที่ (2-68) จะเห็นว่าการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์จะถูกควบคุม ด้วยกระแส  $i_{qs}$  เป็นหลักและในส่วนของการควบคุมฟลักซ์จะถูกควบคุมด้วยกระแส  $i_{ds}$  โดยสมการดังกล่าวถือเป็นหัวใจสำคัญของการควบคุมแบบฟีดแบ็คอเรียนเต็ท เนื่องจากการควบคุมการทำงานของกระแส  $i_{qs}$  และ  $i_{ds}$  จะมีค่าแปรตามกระแส  $i_{qs}^*$  และ  $i_{ds}^*$  เร็วมากเกิดจากมีค่าแบนด์วิดท์ของการควบคุมที่สูง ดังนั้นสามารถคำนวณได้โดยตรงจากค่า  $i_{qs}$  และ  $i_{ds}$  ดังสมการที่ (2-68)

$$\omega_{sl} = \frac{L_m}{\lambda_r} \times \frac{i_{qs}^*}{\tau_r i_{ds}^*} \quad (2-70)$$

เมื่อ

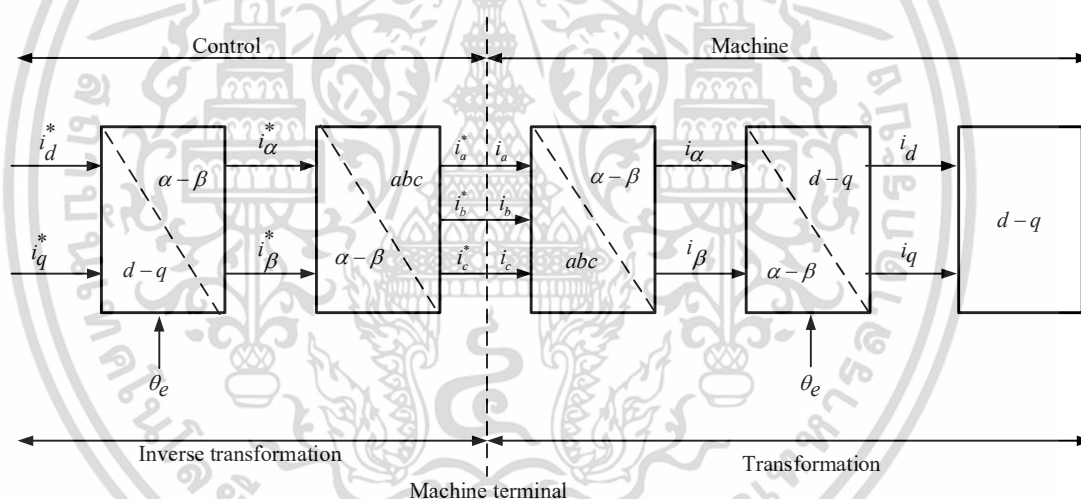
$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$$

การควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมจะใช้มุมในการหมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนัส ( $\theta_e$ ) ซึ่งถือเป็นหลักสำคัญของการควบคุมชนิดนี้ เนื่องจากต้องใช้มุมดังกล่าวสำหรับแปลงแกน  $abc$  ให้อยู่บนแกน  $dq$  ซึ่งจะทำให้การควบคุมฟลักซ์อยู่บนแกน  $d$  และการควบคุมแรงบิดจะอยู่บนแกน  $q$  ในการแปลงกลับจากแกน  $dq$  ให้อยู่บนแกน  $abc$  ของระบบการควบคุมดังกล่าวก็จะใช้มุมของการแปลง กลับหมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนัสเช่นเดิม โดยในการคำนวณมุมของการหมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนัส สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-71) ซึ่งสังเกตได้ว่า การคำนวณค่ามุมที่ความเร็วเชิงโคโรนัสจะใช้ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ซึ่งสามารถวัดได้โดยตรงจากเอ็นโค้ดเดอร์และความเร็วเชิงมุมของสลิป ได้จากการประมาณในสมการที่ (2-70) จากสมการการประมาณค่าสลิปจะเห็นว่ามีการใช้ค่าคงที่ทางเวลาฝั่งขดลวดโรเตอร์ซึ่งต้องใช้ค่าพารามิเตอร์  $R_r$  และ  $L_r$  ในการคำนวณทำให้พารามิเตอร์ดังกล่าวมีความสำคัญอย่างมากสำหรับการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม โดยถ้าค่าพารามิเตอร์ที่ใช้มีความถูกต้องตามความเป็นจริง จะทำให้มุมในการหมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนัสที่ได้จากการคำนวณมีความถูกต้องด้วย ส่งผลให้การควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

$$\theta_e = \int \omega_e dt = \int (\omega_{sl} + \omega_r) dt = \int \left( \omega_r + \frac{i_{qs}^*}{\tau_r i_{ds}^*} \right) dt \quad (2-71)$$

## 2.7 สรุป

จากเนื้อหาในบทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เพื่อให้เข้าใจหลักการการทำงานของมอเตอร์ โดยวิเคราะห์จากวงจรสมมูลของโรเตอร์, สเตเตอร์ และคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าและแรงบิด ในส่วนของหลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ได้เปลี่ยนแบบแนวความคิดและวิธีการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงโดยการควบคุมแยกออกเป็นสองส่วนคือ แกน  $d$  และแกน  $q$  การควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมนั้นจะไข่มุมในการหมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนัส ( $\theta_e$ ) เป็นหลักสำคัญของการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม ดังนั้นจำเป็นต้องรู้เกี่ยวกับการแปลงแกนทั้งการแปลงแบบคลาร์กและการแปลงแบบปาร์ค เพื่อแปลงสมการทางไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ยังเป็นปริมาณสามเฟสไปเป็นปริมาณสองเฟสที่อยู่บนแกน  $d$  และแกน  $q$  เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปควบคุมทั้งนี้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสนั้น จำเป็นต้องมีวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสในการแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับดังที่จะได้กล่าวในบทต่อไป



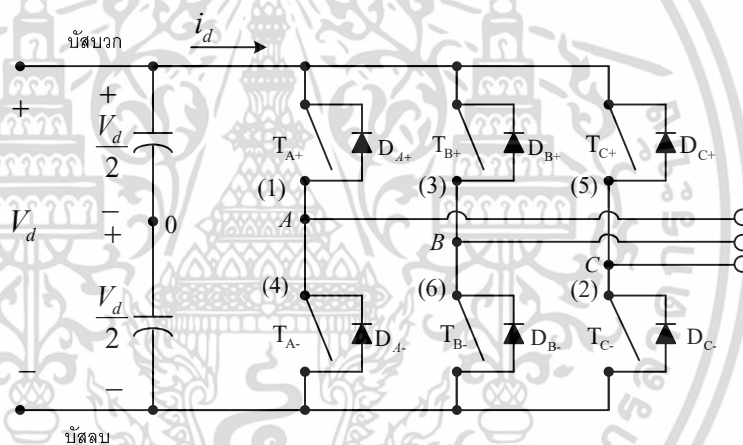
รูปที่ 2.21 ไดอะแกรมการควบคุมแบบเวกเตอร์

### บทที่ 3

## อินเวอร์เตอร์สามเฟส

### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีอินเวอร์เตอร์สามเฟสการแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสนิยมนำแปลงผันกำลังไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์สามเฟสซึ่งเหมาะกับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง นอกจากนั้นยังต้องอาศัยวงจรควบที่ทำให้แต่ละเฟสห่างกัน 120 องศาของความถี่หลักมูล จึงไม่เหมาะที่จะเลือกใช้อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์จำนวนสามตัว ดังนั้นอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกได้ทั้งขนาดและความถี่จะแสดงไดอะแกรมในรูปที่ 3.1 เป็นอินเวอร์เตอร์แบบสามกิ่งสามเฟส



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์สามเฟส

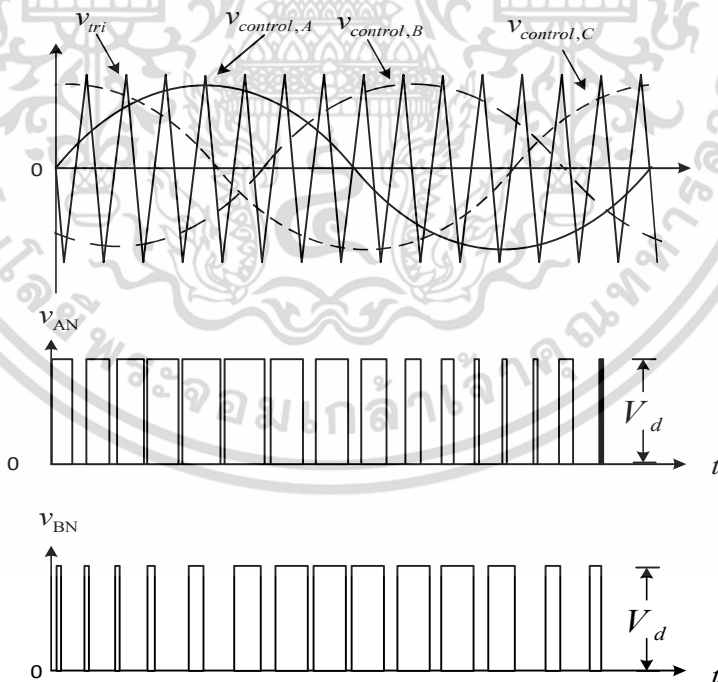
### 3.2 อินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบพีดับเบิลยูเอ็ม [14]

อินเวอร์เตอร์สามเฟสต้องการแรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออกที่ควบคุมได้ทั้งขนาดและความถี่ เพื่อให้จะให้แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกที่สมดุลและมีมุมเฟสต่างกัน 120 องศาของความถี่หลักมูล จึงต้องใช้รูปคลื่นสามเหลี่ยมเปรียบเทียบกับแรงดันควบคุมรูปไซน์สามรูปคลื่นที่เฟสต่างกัน 120 องศา ดังรูปที่ 3.2 (ก) ที่มีค่า  $m_f = 15$  ค่าแรงดันเฟส  $V_{AN}, V_{BN}$  จะวัดเทียบกับบัสลบที่เป็นบัสอ้างอิง ส่วนค่าแรงดันไลน์  $V_{AB}$  ค่าที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกหักล้างไป ดังรูปที่ 3.2 (ข) เป็นสวิตซ์ (switching) แบบดับเบิลยูเอ็ม

ในอินเวอร์เตอร์สามเฟสจะพิจารณาฮาร์มอนิกเน้นเฉพาะค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย (line to line voltage) เริ่มฮาร์มอนิกของแรงดันเฟส ( $V_{AN}$ ) ดังรูปที่ 3.2 (ค) ซึ่งจะมีค่าฮาร์มอนิกเลขคู่เกิดขึ้นที่ค่าไซด์แบนด์ของ  $m_f$  และจำนวนเท่าของ  $m_f$  โดยค่าแรงดันเฟส  $V_{AN}, V_{BN}$  จะมีเฟสต่างกัน 120 องศา ดังนั้นเฟสจะเท่ากันหรือความแตกต่างเป็นศูนย์ ทุกๆ  $3m_f$  ทำให้แรงดันไฟฟ้า จะไม่มีฮาร์มอนิกลำดับที่สามหารลงตัวที่เป็นเลขคู่ นอกจากนี้ในกรณีแรงดันเฟสที่มีโพลผสมดูล ค่าแรงดันระหว่างสายจะไม่มีฮาร์มอนิกเลขคู่

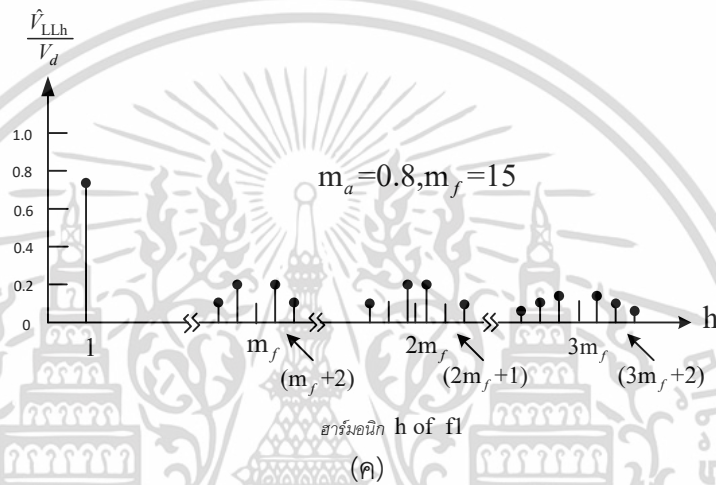
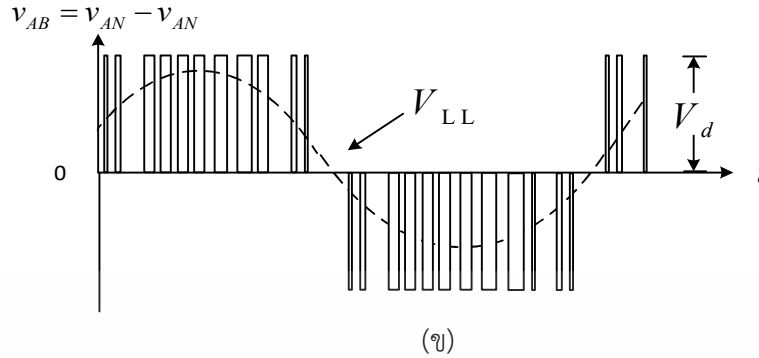
สรุปประเด็นสำคัญของอินเวอร์เตอร์สามเฟสได้ดังนี้

- 1 ค่า  $m_f \leq 21$  หากต้องการกำจัดฮาร์มอนิกเลขคู่จะต้องใช้สวิตซิงแบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ซิงโครไนส์
- 2 ที่ค่า  $m_f \leq 21$  ฮาร์มอนิกย่อยที่เกิดจากการสวิตซิงแบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ไม่ซิงโครไนส์จะมีค่าน้อย ควรหลีกเลี่ยงการสวิตซิงแบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ไม่ซิงโครไนส์ เพราะจะทำให้เกิดฮาร์มอนิกย่อยที่ใกล้ความถี่หลักมูล
- 3 ที่ค่า  $m_a > 1$  หากไม่พิจารณาค่า  $m_f$  จะมีผลเช่นเดียวกันกับกรณีที่ 1



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



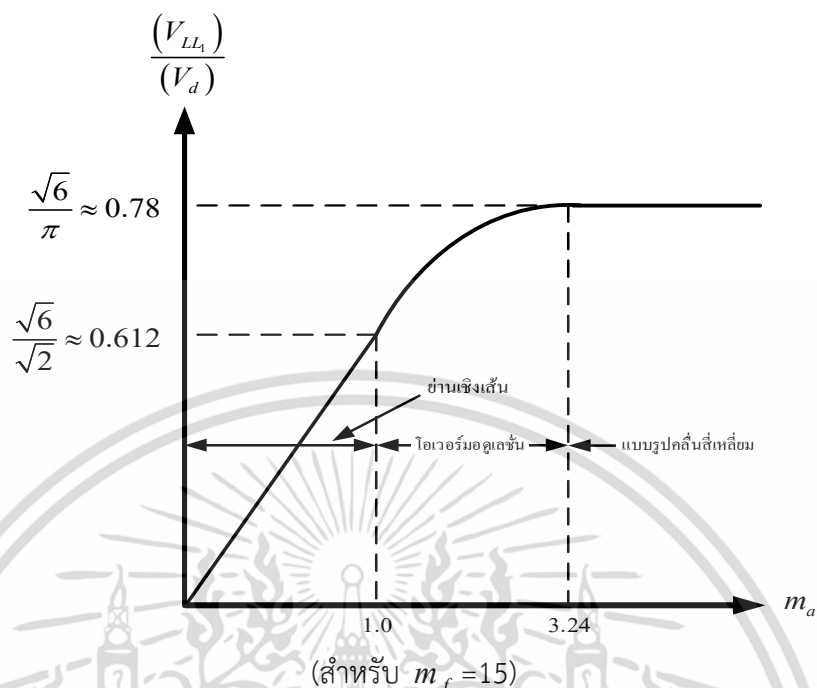
รูปที่ 3.2 คลื่นและฮาร์มอนิกสเปกตรัมของอินเวอร์เตอร์สามเฟส

### 3.2.1 อินเวอร์เตอร์สามเฟสมอดูเลชันเชิงเส้น $m_a \leq 1$

ในย่าน  $m_a \leq 1$  ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลในหนึ่งเฟสหรือหนึ่งกิ่ง จะเท่ากับสมการที่ (3-1) ส่วนค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายของความถี่หลักมูล ในสมการที่ (3-2) จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่า  $m_a$  แสดงในรูปที่ 3.3 สังเกตแกนตั้งฉากจะแตกต่างจากอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว คือ อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายของความถี่หลักมูล หากรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{LL} / V_d$ )

$$(V_{AN})_1 = m_a \cdot \frac{V_d}{2} \text{ เมื่อ } m_a \leq 1 \tag{3-1}$$

$$V_{LL1} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (V_{AN})_1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_d}{2} = 0.612 \cdot m_a \cdot V_d \tag{3-2}$$

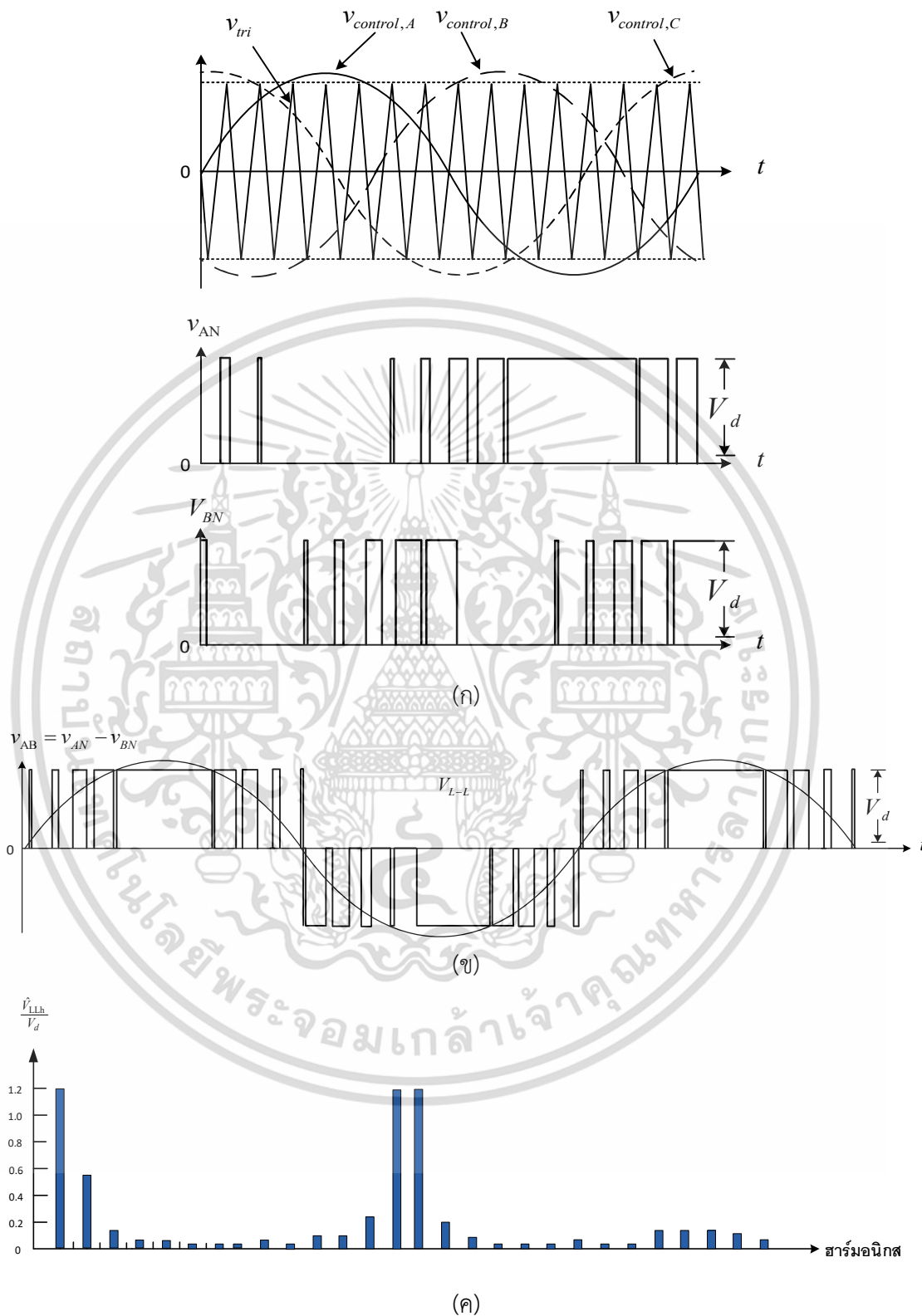


รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{LL} / V_d$  กับ  $m_a$  ในอินเวอร์เตอร์สามเฟส

การทำงานในย่านมอดูเลชันในรูปที่ 3.3 หากมีแหล่งจ่ายแรงดันเชื่อมโยงมีค่า 311 V เมื่อปรับ  $m_a = 0.5$  จะได้แรงดันระหว่างสายของระบบไฟฟ้าเฟสเดียว คือ  $0.612 \times 0.5 \times 311 = 95.17V$  จะเป็นแรงดันที่ความถี่หลักมูล เมื่อปรับค่า  $m_a = 1$  จะได้แรงดันที่ความถี่หลักมูล เท่ากับ 190.33 V กล่าวคือแรงดันจะเพิ่มเป็น 2 เท่า

### 3.2.2 อินเวอร์เตอร์สามเฟสโอเวอร์มอดูเลชัน $m_a > 1$

อินเวอร์เตอร์สามเฟส ในย่านที่ค่ามอดูเลชันเป็น  $m_a > 1$  อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายที่ความถี่หลักมูลหารกับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{LL} / V_d$ ) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.612 ถึง 0.78 ในรูปที่ 3.3 สำหรับการทำงานในโหมดโอเวอร์มอดูเลชันมีข้อดีคือขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล จะมีค่าสูงกว่าในกรณีย่านเชิงเส้น ( $m_a \leq 1$ ) แต่การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าจะไม่เป็นเชิงเส้นจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง แสดงในรูปที่ 3.3 ข้อเสียของโอเวอร์มอดูเลชันคือ ทำให้เกิดฮาร์มอนิกอันดับต่ำ ๆ เช่น 3,5,7,9 เป็นต้น ที่ใกล้เคียงฮาร์มอนิกอันดับที่หนึ่งเมื่อนำไปขับมอเตอร์จะเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและทำให้มอเตอร์หมุนไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 3.4 (ค) และค่าแรงดันเฟส  $V_{AN}, V_{BN}$  จะวัดเทียบกับบัสลบที่เป็นบัสอ้างอิง ส่วนค่าแรงดันไลน์  $V_{AB}$  ค่าที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกหักล้างไปดังรูปที่ 3.4 (ข)



รูปที่ 3.4 รูปฮาร์มอนิกสเปกตรัมของอินเวอร์เตอร์สามเฟสโวลเทจสวิตชิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 อินเวอร์เตอร์สามเฟสรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

อินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ทำงานอยู่ในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยม จะเหมาะกับการใช้งานแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย เพื่อใช้งานในการปรับค่าระดับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก ดังรูปที่ 3.5 (ข) รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีช่วงเวลานำกระแสที่ 180 องศาในกรณีเฟสเดียวจะสามารถหาค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่มีความถี่หลักมูลที่ทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยมหาได้จากสมการที่ (3-3)

$$V_{LL_1} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (\hat{V}_{AN})_1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{V_d}{2} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot V_d = 0.78V_d \quad (3-3)$$

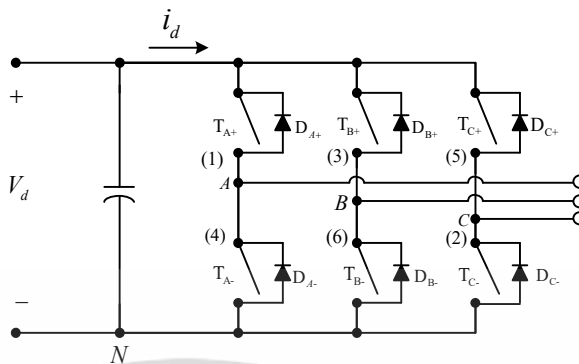
รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายที่ทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะไม่ขึ้นกับโหนดฮาร์มอนิกที่ประกอบด้วย

$$V_{LL_h} = \frac{0.78}{h} \cdot V_d \quad (3-4)$$

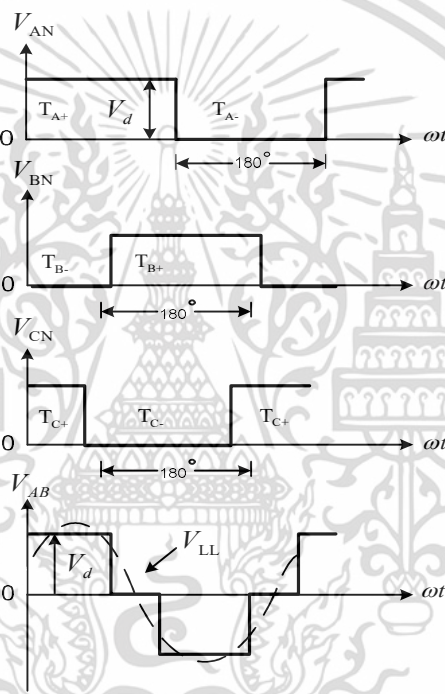
เมื่อ

$$h = 6n \pm 1, n = 1, 2, 3, \dots \quad (3-5)$$

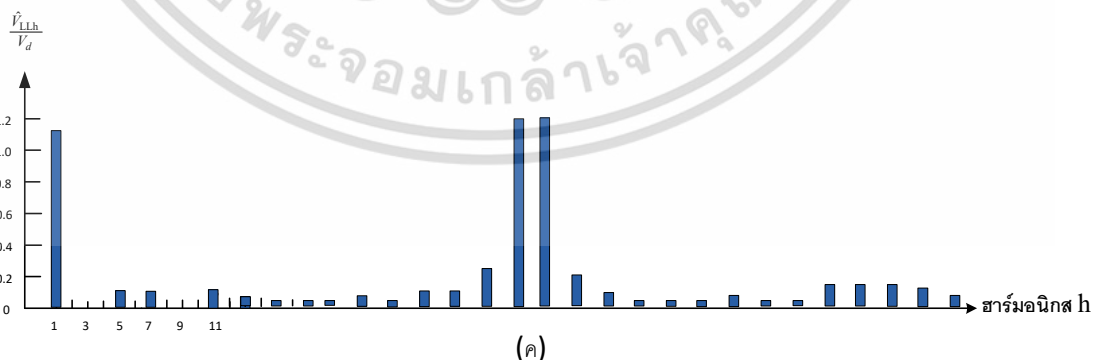
ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในอินเวอร์เตอร์สามเฟสกรณีแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกโหนดสมดุล จะเกิดที่ลำดับ  $h = 5, 7, 11, 13, \dots$  ดังรูปที่ 3.5 (ค) ดังนั้นฮาร์มอนิกที่มีขนาดมากที่สุดและอยู่ใกล้ความถี่หลักมูลมากที่สุดคือฮาร์มอนิกลำดับที่ 5



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.5 รูปฮาร์มอนิกสเปกตรัมของอินเวอร์เตอร์สามเฟสรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4 ประโยชน์ของการสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์

การใช้ประโยชน์ของสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์สามเฟส กระแสเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีกระแส  $I_{0,max}$  ที่ไหลสูงสุดซึ่งสวิตช์แต่ละตัวจะมีพิกัดสูงสุดดังนี้

$$V_T = V_{d,max} \quad (3-6)$$

$$I_T = \sqrt{2}I_{0,max} \quad (3-7)$$

โดยค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ความถี่หลักมูลเท่ากับ

$$(VA)_{3-phase} = \sqrt{3}V_{LL1}I_{0,max} \quad (3-8)$$

ในอินเวอร์เตอร์สามเฟสจะมีสวิตช์ไดโอดอย่างละหกตัว อัตราการใช้ประโยชน์ของสวิตช์จะหาได้จากค่ารากของกำลังเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ได้ต่อพิกัดของสวิตช์ ซึ่งจะอยู่ในรูปผลคูณของแรงดันไฟฟ้าพิกัดและกระแสพิกัด

$$SUR = \frac{(VA)_{3-phase}}{qV_T I_T} = \frac{\sqrt{3}V_{LL1}I_{0,max}}{6V_T I_T} \quad (3-9)$$

$$SUR = \frac{\sqrt{3}V_{LL1}I_{0,max}}{6V_T I_T \sqrt{2}I_{0,max}} = \frac{1}{2\sqrt{6}} \frac{V_{LL1}}{V_{d,max}} \quad (3-10)$$

สำหรับการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ทำงานในย่านมอดูเลชันเชิงเส้น  $m_a \leq 1$

$$MSUR = \frac{1}{2\sqrt{6}} \frac{V_{LL1}}{V_{d,max}} = \frac{1}{2\sqrt{6}} \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \cdot m_a = \frac{1}{8} \cdot m_a = 0.125m_a \quad (3-11)$$

ดังนั้น ค่าอัตราการใช้ประโยชน์ของสวิตช์สูงสุดของอินเวอร์เตอร์สามเฟส ของการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม จะเท่ากับ 0.125 ที่  $m_a = 1$  แต่จะมีค่าน้อยกว่าค่าอัตราการใช้ประโยชน์ของสวิตช์สูงสุดแบบคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.16

### 3.3 เทคนิคการมอดูเลชันขั้นสูงสำหรับอินเวอร์เตอร์ไฟฟ้าสามเฟส [15]

โดยทั่วไปอินเวอร์เตอร์สามเฟสจะใช้เทคนิคการมอดูเลชันด้วยรูปคลื่นไซน์ SPWM ตามที่ได้ ซึ่งมีข้อดีคือง่ายต่อการสร้างสัญญาณควบคุมและการใช้ความถี่สวิตช์ซึ่งเกิดได้ห่าง จากความถี่หลักมูล มาก ซึ่งจะทำให้สะดวกและออกแบบวงจรรองความถี่ทางด้านออกได้ง่ายและขนาดเล็ก อย่างไรก็ตาม สำหรับกรณีของ SPWM จะมีข้อเสียคือแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่ความถี่หลักมูลจะมีค่า ต่ำ เช่นในวงจร ที่มีแหล่งเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง (dc link) ขนาด 100 โวลต์ อินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ใช้เทคนิค SPWM ทำงานในย่านเชิงเส้น จะได้แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย ที่ความถี่หลักมูลสูงสุดที่ 61.2 โวลต์ เป็นต้น

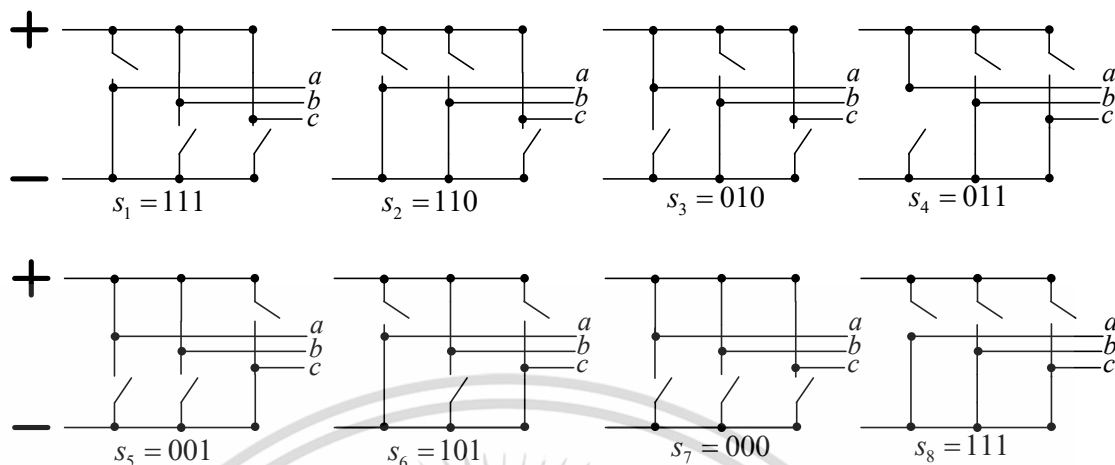
วิธีการเพิ่มแรงดันระหว่างสาย ที่ความถี่หลักมูลในระบบสามเฟสสามารถกระทำได้โดยการมอดูเลชันสัญญาณควบคุมของเฟสโดยไม่จำเป็นต้องเป็นรูปคลื่นไซน์ แต่เมื่อหาผลต่างของแรงดันระหว่างสาย จะต้องมอดูเลชันเป็นรูปคลื่นไซน์ ซึ่งสามารถกระทำได้โดยต้องคำนึงถึงมุมเฟสโดยที่แต่ละเฟสจะต่างกัน 120 องศา เทคนิคการมอดูเลชันขั้นสูงประกอบด้วย

1. Harmonic injection pulse width modulation (HIPWM)
2. Discontinuous pulse width modulation (DPWM)
3. Delta modulation (DM)
4. Space vector pulse width modulation (SVPWM)

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึง เทคนิค Space vector pulse width modulation (SVPWM) เพียงเท่านั้น ซึ่งถูกใช้อย่างแพร่หลาย

#### 3.3.1 เทคนิค Space vector pulse width modulation (SVPWM)

วัตถุประสงค์คือต้องการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าด้านออกระหว่างสายที่ความถี่หลักมูล 15 % เมื่อเทียบกับเทคนิค SPWM โดยที่เทคนิค SVPWM จะแตกต่างกับเทคนิคที่ได้กล่าวมาแล้วคือสัญญาณอ้างอิงที่เกิดจากการทำงานของสวิตช์เป็นแปดสถานะ โดยกำหนด ได้จากตารางที่ 3.1 และมีสถานะของสวิตช์ในวงจรดังรูปที่ 3.6



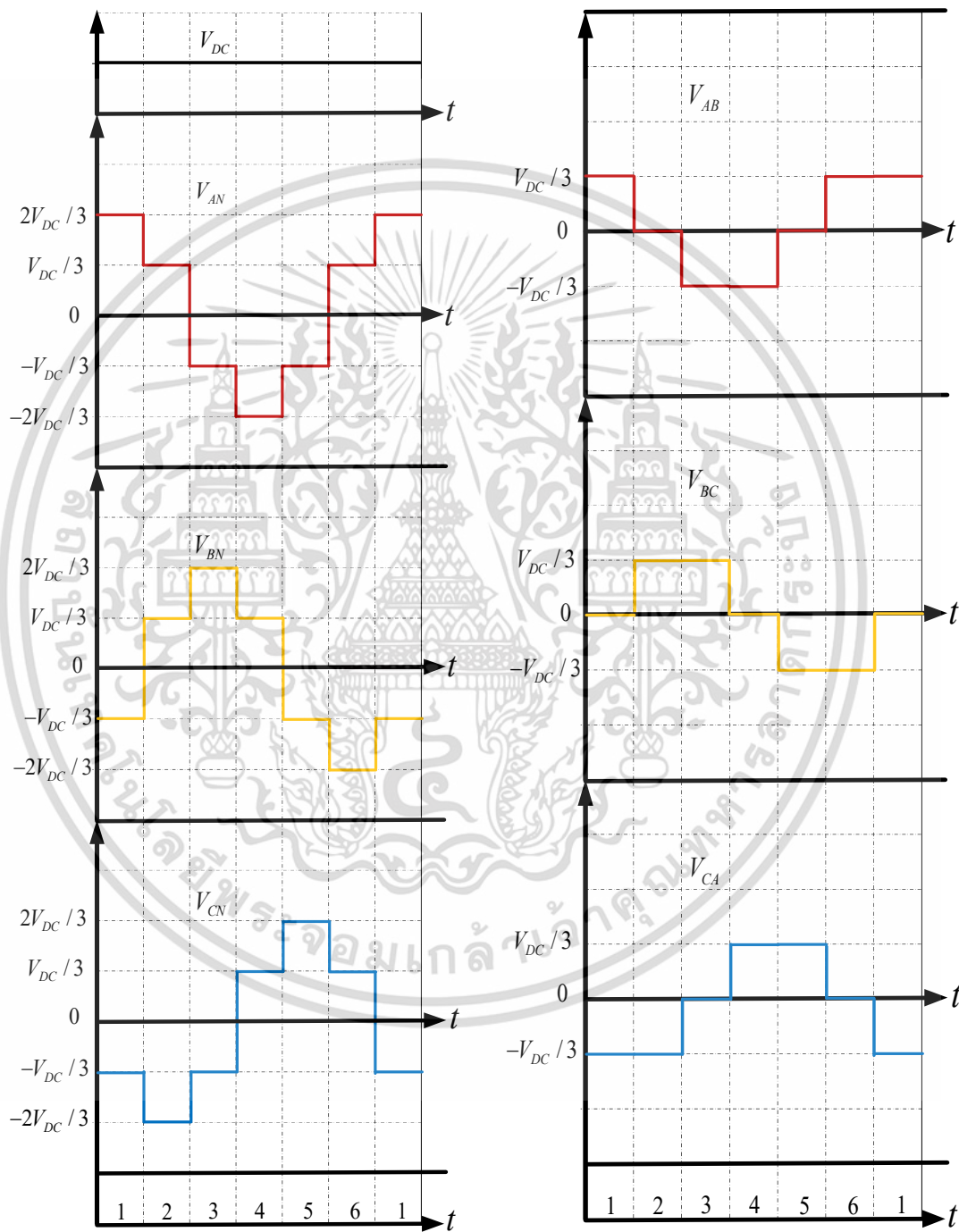
รูปที่ 3.6 สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ที่สถานะนำและไม่นำกระแส

วงจรฟูลิปรีดแบบอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟส แบบสองขั้วกล่าวคือสวิตช์ S1-S6 คือสวิตช์กำลัง เมื่อ S1, S3, S5 กำหนดให้เป็น “บวก” เป็นสวิตช์เริ่มกึ่งบน และ S2, S4, S6 เป็นสวิตช์กำลังกึ่งล่างมีสัญญาณลักษณะ เป็น “ลบ” เวกเตอร์แรงดันที่  $V_1=[100], \dots, V_8=[111]$  ตามลำดับโดยที่ความยาวของเวกเตอร์แรงดันที่  $V_1 \dots V_6$  เท่ากับ 1 และความยาวของเวกเตอร์แรงดันที่  $V_7$  และ  $V_8$  เท่ากับ 0 และจาก 8 เวกเตอร์สเปซเวกเตอร์แรงดันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.1 สถานะของแรงดันของอินเวอร์เตอร์

อันดับสถานะ	$V_s$	สถานะสวิตช์	$V_{AN}$	$V_{BN}$	$V_{CN}$	$V_{AB}$	$V_{BC}$	$V_{CA}$
1	$V_1$	[1 0 0]	$2V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$	$V_{DC}$	0	$-V_{DC}$
2	$V_2$	[1 1 0]	$V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	$-2V_{DC}/3$	0	$V_{DC}$	$-V_{DC}$
3	$V_3$	[0 1 0]	$-V_{DC}/3$	$2V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$	$-V_{DC}$	$V_{DC}$	0
4	$V_4$	[0 1 1]	$-2V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	$-V_{DC}$	0	$V_{DC}$
5	$V_5$	[0 0 1]	$-V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$	$2V_{DC}/3$	0	$-V_{DC}$	$V_{DC}$
6	$V_6$	[1 0 1]	$V_{DC}/3$	$-2V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	$V_{DC}$	$-V_{DC}$	0
7	$V_7$	[0 0 0]	0	0	0	0	0	0
8	$V_8$	[1 1 1]	0	0	0	0	0	0

จากตารางที่ 3.1 ถ้าต้องการแรงดันสามเฟสรูปกึ่งสี่เหลี่ยม ที่มีเฟสต่างกัน 120 องศา สามารถเขียนไดอะแกรมความสัมพันธ์ของแรงดันเฟสและแรงดันไลน์ให้มีอันดับสถานะสวิตช์เป็น 1-2-3-4-5-6-1 ได้ดังนี้

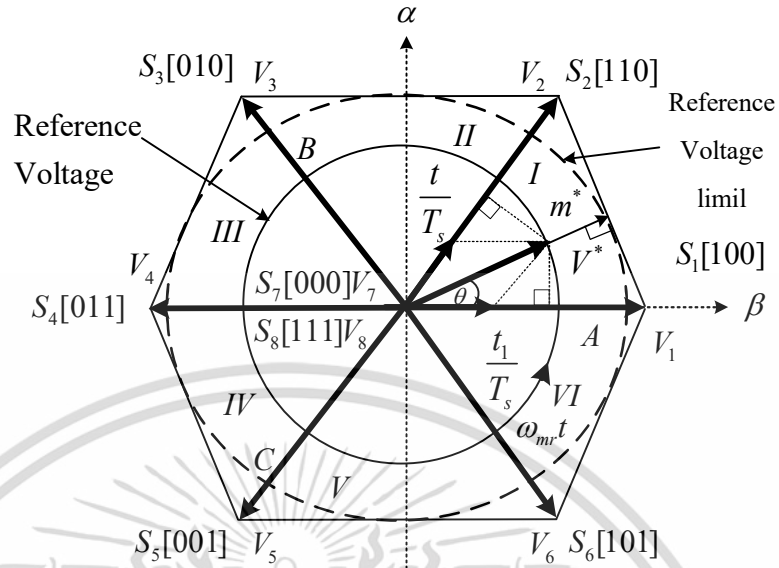


(ก) การสวิตช์แบบกึ่งสี่เหลี่ยมที่แรงดันเฟส

(ข) การสวิตช์แบบกึ่งสี่เหลี่ยมที่แรงดันไลน์

รูปที่ 3.7 การสวิตช์แบบกึ่งสี่เหลี่ยมสถานะของแรงดันของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 สเปซเวกเตอร์แรงดัน

แรงดันสเปซเวกเตอร์กำหนดเป็น

$$\begin{aligned} V_1 &= -V_4, V_2 = -V_5, V_3 = -V_6 \\ V_7 &= V_8 = 0 \\ V_1 + V_3 + V_5 &= 0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

ในช่วงเวลาการแซมปลิง (sampling) เวกเตอร์แรงดันเอาต์พุตจะได้เป็น

$$V_s = \frac{t_0}{T_s} V_7 + \frac{t_1}{T_s} V_1 + \dots + \frac{t_7}{T_s} V_8 \quad (3.13)$$

เมื่อ  $t_0, t_1, \dots, t_7$  คือช่วงเวลาที่สวิตช์ทำงาน ของเวกเตอร์แรงดัน  $V_1, \dots, V_8$   
 $T_s$  คือ เวลาการแซมปลิง

ยกตัวอย่างเมื่อแรงดันอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 สามารถเขียนเวกเตอร์แรงดันเอาต์พุตได้ดังนี้

$$V_s = \frac{t_1}{T_s} V_1 + \frac{t_2}{T_s} V_2 + \frac{t_7}{T_s} V_7 + \frac{t_8}{T_s} V_8 \quad (3.14)$$

จากรูปที่ 3.8 เมื่อความยาวของ  $V^*$  คือ  $m^* E$  ดังนั้น

$$\frac{m^*}{\sin \frac{2\pi}{3}} = \frac{t_1}{T_s} \frac{1}{\sin \left( \frac{\pi}{3} - \omega_{mr} t \right)} = \frac{t_2}{T_s} \frac{1}{\sin \omega_{mr} t} \quad (3.15)$$

นั่นคือ

$$\frac{t_1}{T_s} = \frac{2}{\sqrt{3}} m^* \sin \left( \frac{\pi}{3} - \omega_{mr} t \right) = \frac{2}{\sqrt{3}} m^* \cos \left( \omega_{mr} t + \frac{\pi}{6} \right) \quad (3.16)$$

$$\frac{t_2}{T_s} = \frac{2}{\sqrt{3}} m^* \sin \omega_{mr} t = \frac{2}{\sqrt{3}} m^* \cos \left( \omega_{mr} t + \frac{3\pi}{2} \right) \quad (3.17)$$

จะได้

$$t_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} m^* T_s \cos \left( \omega_{mr} t + \frac{\pi}{6} \right) \quad (3.18)$$

$$t_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} m^* T_s \cos \left( \omega_{mr} t + \frac{3\pi}{2} \right) \quad (3.19)$$

$$t_0 = T_s - (t_1 - t_2) \quad (3.20)$$

โดยที่  $m^* = \frac{V^*}{V_{1sw}}$

$V^*$  คือ ขนาดแรงดันเฟส

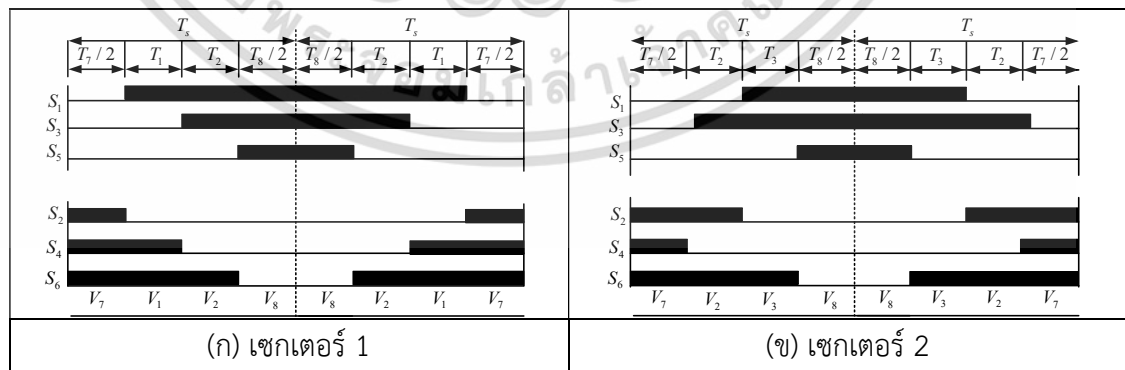
$V_{1sw}$  คือ แรงดันมูลฐานสูงสุด ( $2V_{DC} / \pi$ ) ของแรงดันเฟสสี่เหลี่ยม  
ดังนั้นคำนวณหาเวลาใด ๆ ในเซกเตอร์ต่างๆ ทั้ง 6 เซกเตอร์ได้ดังนี้

ตารางที่ 3.2 การคำนวณเวลาในแต่ละเซกเตอร์

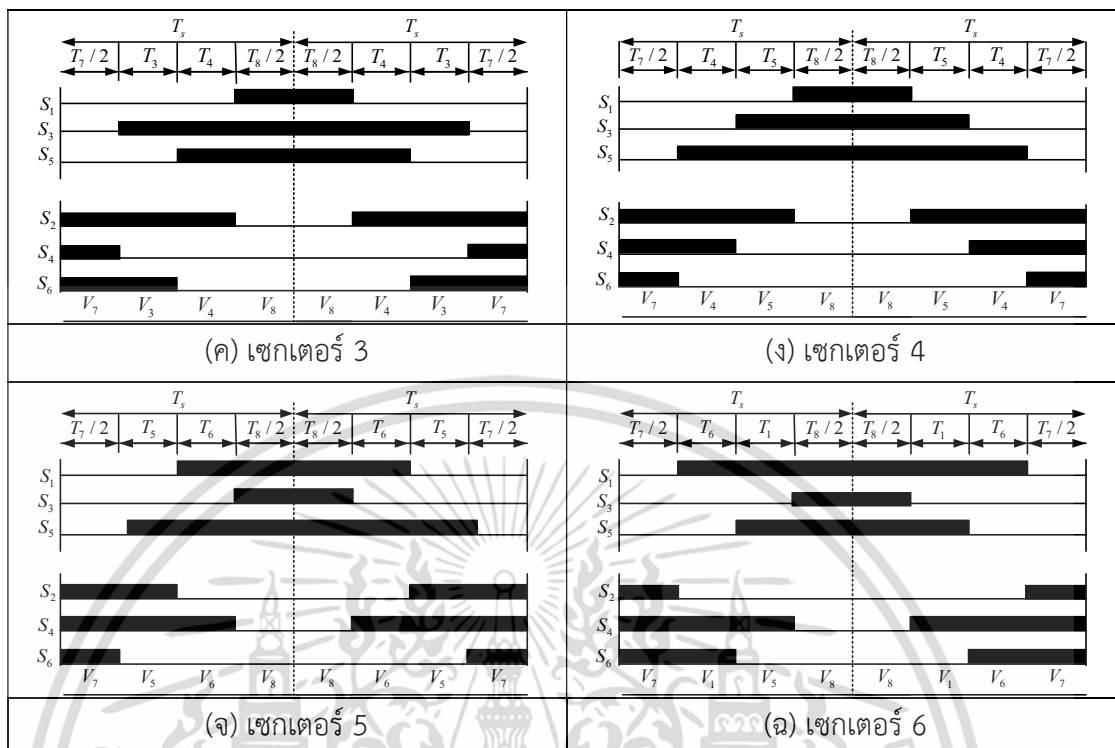
<i>SECTOR I</i> ( $0 \leq \omega_{mr}t \leq \pi/3$ )	<i>SECTOR II</i> ( $\pi/3 \leq \omega_{mr}t \leq 2\pi/3$ )
$t_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} m * T_s \cos\left(\omega_{mr}t + \frac{\pi}{6}\right)$	$t_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} m * T_s \cos\left(\omega_{mr}t + \frac{11\pi}{6}\right)$
$t_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} m * T_s \cos\left(\omega_{mr}t + \frac{3\pi}{2}\right)$	$t_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} m * T_s \cos\left(\omega_{mr}t + \frac{7\pi}{6}\right)$
$t_0 = T_s - (t_1 - t_2)$	$t_0 = T_s - (t_2 - t_3)$
<i>SECTOR III</i> ( $2\pi/3 \leq \omega_{mr}t \leq \pi$ )	<i>SECTOR IV</i> ( $\pi \leq \omega_{mr}t \leq 4\pi/3$ )
$t_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} m * T_s \cos\left(\omega_{mr}t + \frac{3\pi}{2}\right)$	$t_4 = \frac{2}{\sqrt{3}} m * T_s \cos\left(\omega_{mr}t + \frac{7\pi}{6}\right)$
$t_4 = \frac{2}{\sqrt{3}} m * T_s \cos\left(\omega_{mr}t + \frac{5\pi}{6}\right)$	$t_5 = \frac{2}{\sqrt{3}} m * T_s \cos\left(\omega_{mr}t + \frac{\pi}{6}\right)$
$t_0 = T_s - (t_3 - t_4)$	$t_0 = T_s - (t_4 - t_5)$
<i>SECTOR V</i> ( $4\pi/3 \leq \omega_{mr}t \leq 5\pi/3$ )	<i>SECTOR VI</i> ( $\pi \leq \omega_{mr}t \leq 4\pi/3$ )
$t_5 = \frac{2}{\sqrt{3}} m * T_s \cos\left(\omega_{mr}t + \frac{5\pi}{6}\right)$	$t_6 = \frac{2}{\sqrt{3}} m * T_s \cos\left(\omega_{mr}t + \frac{\pi}{2}\right)$
$t_6 = \frac{2}{\sqrt{3}} m * T_s \cos\left(\omega_{mr}t + \frac{\pi}{6}\right)$	$t_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} m * T_s \cos\left(\omega_{mr}t + \frac{11\pi}{6}\right)$
$t_0 = T_s - (t_5 - t_6)$	$t_0 = T_s - (t_6 - t_1)$

จากแผนผังการสวิตช์ดังรูปที่ 3.8 แทนค่าลงในสมการที่ (3-12) จะได้แรงดันเฟส

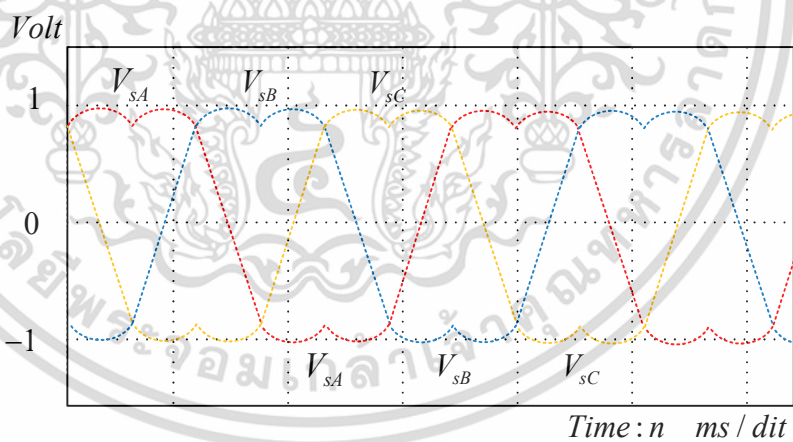
$$V_{sA}, V_{sB}, V_{sC}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 รูปแบบการสวิตช์จากการคำนวณในแต่ละเซกเตอร์

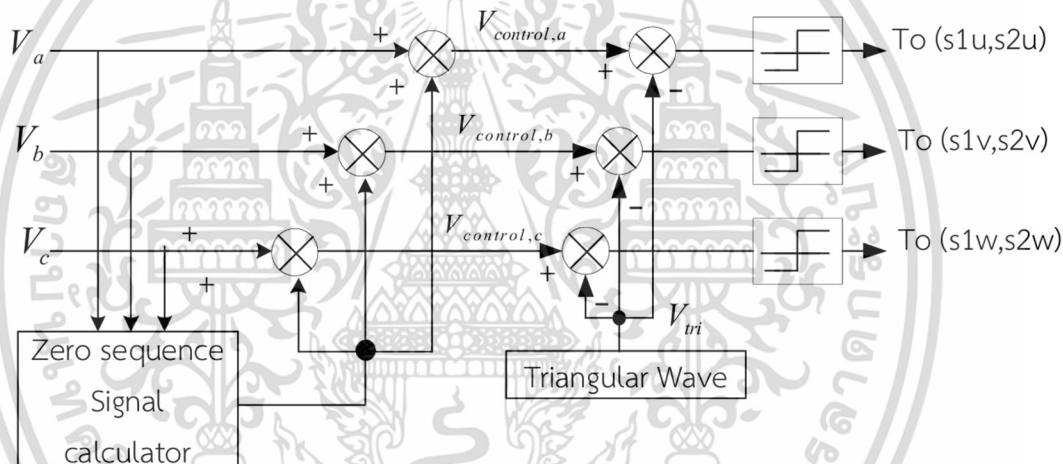


รูปที่ 3.10 สเปซเวกเตอร์แรงดัน  $V_{sA}, V_{sB}, V_{sC}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 สัญญาณคลื่นพาหะ (Carrier Based Space Vector PWM; CSVPWM)

สเปซเวกเตอร์พัลส์วิดท์มอดูเลชัน SVPWM สามารถสร้างขึ้นได้สองวิธีคือ การคำนวณเป็นเซ็กเตอร์ (Time-Based SVPWM) ซึ่งได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมา และวิธีการคำนวณคลื่นพาหะ (Carrier Based Space Vector PWM ; CSVPWM) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงแบบที่สองเนื่องจากมีความรวดเร็วกว่าในการสร้างสัญญาณ SVPWM ด้วยการใช้วิธีการคำนวณฟังก์ชันการมอดูเลต (Modulation function) หรือแรงดันอ้างอิง (Reference voltage) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะสามเหลี่ยมที่มีความถี่สูง และความถี่ของการสวิตซ์ ( $f_s$ ) จะเท่ากับความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยมเช่นเดียวกันกับ THIPWM แต่มีความแตกต่างกันเล็กน้อยที่การคำนวณหาค่าสัญญาณลำดับศูนย์ (zero sequence signal) วิธี CSVPWM แสดงเป็นสัญญาณอ้างอิงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่มีแอมพลิจูดเท่ากันและแต่ละเฟสมีมุมเฟสต่างกัน 120 องศาและการหาสัญญาณลำดับศูนย์ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ดังนี้



รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบ CSVPWM

- $V_{control(a,b,c)}$  สัญญาณแรงดันอ้างอิงที่ต้องการนำมาสร้างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ด้านออก
- $V_{tri}$  สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่เป็นตัวกำหนดความถี่สวิตซ์ซิ่ง
- $m_a$  อัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}}$$

เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{V}_{control}$$

$$\hat{V}_{tri}$$

คือค่ายอดของสัญญาณควบคุมรูปไซน์

คือค่ายอดของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

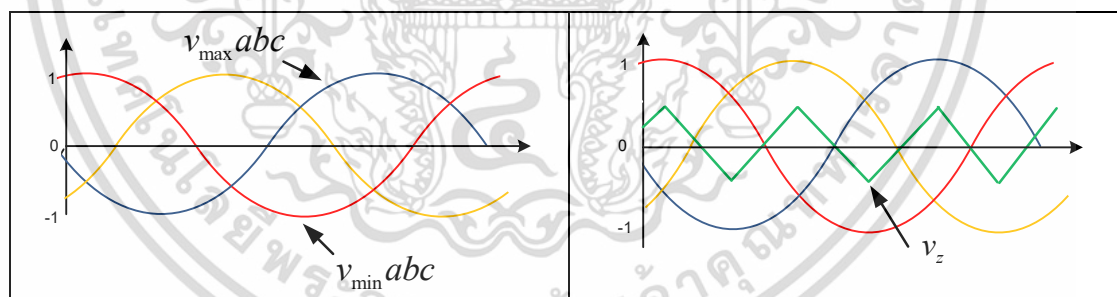
ค่า  $m_a$  มีค่าอยู่ในช่วง  $0 \leq m_a \leq 1$  จะเป็นช่วงการมอดูเลตเชิงเส้นองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกจะแปรผันเชิงเส้นกับค่า  $m_a$  ในกรณี  $m_a \geq 1$  จะเกิดโอเวอร์มอดูเลตชั้นผลของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีฮาร์มอนิกส์สูงกว่าแบบการมอดูเลตเชิงเส้น แรงดันควบคุมหรือแรงดันอ้างอิงสัญญาณลำดับศูนย์เป็นดังนี้

$$\frac{V_{control,a}}{\hat{V}_{tri}} = \frac{V_a - V_z}{V_{dc} / 2} \quad (3-21)$$

$$\frac{V_{control,b}}{\hat{V}_{tri}} = \frac{V_b - V_z}{V_{dc} / 2} \quad (3-22)$$

$$\frac{V_{control,c}}{\hat{V}_{tri}} = \frac{V_c - V_z}{V_{dc} / 2} \quad (3-23)$$

$$v_z = -\frac{[v_{max}(abc)] + [v_{min}(abc)]}{2} \quad (3-24)$$



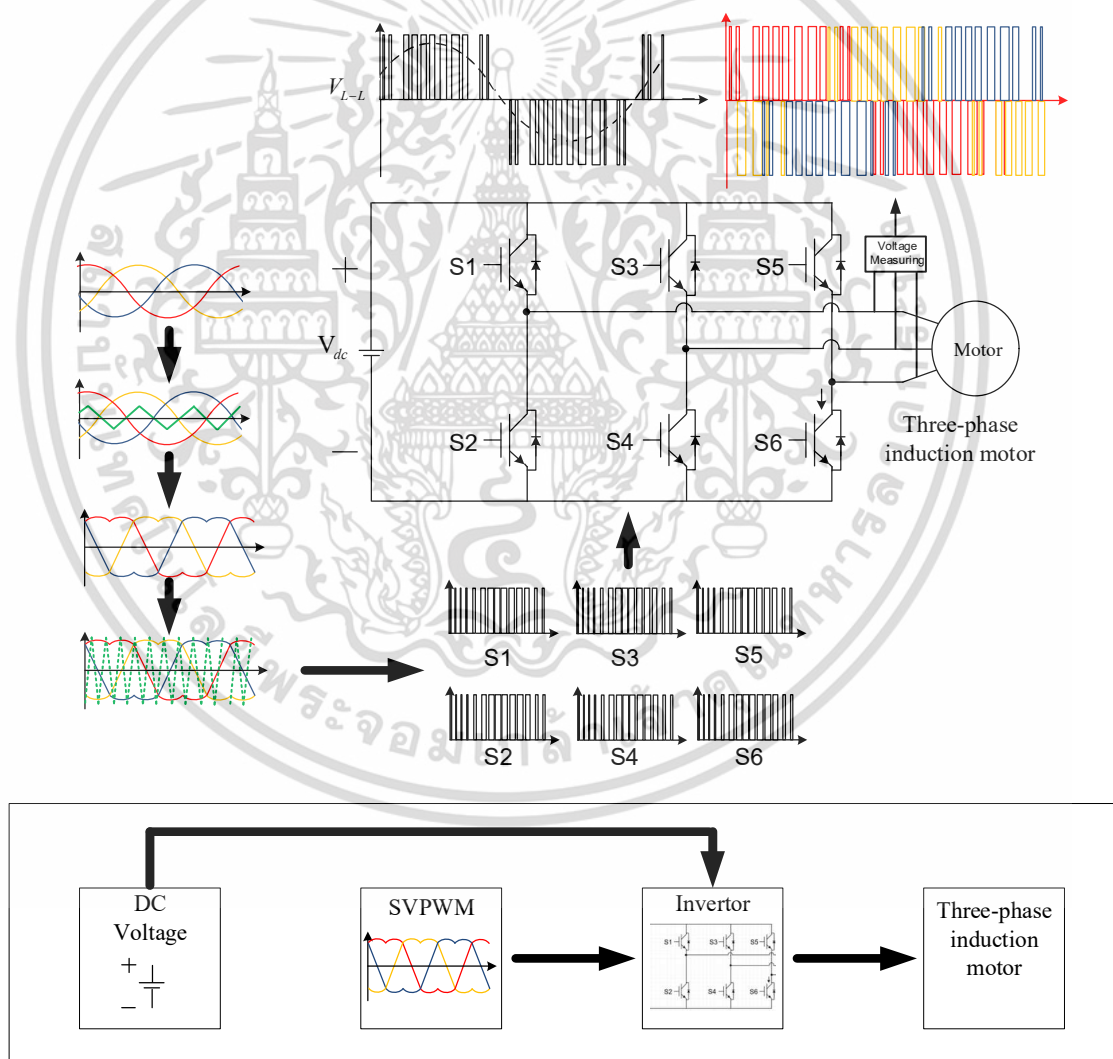
รูปที่ 3.12 แสดงรูปคลื่นของปริมาณต่างๆในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะ

รูปที่ 3.12 แสดงรูปคลื่นของปริมาณต่างๆในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะ แสดงให้เห็นว่าการบวกแรงดันลำดับต่ำสุด-สูงสุดตามสมการที่ (3-24) นำ  $(V_z)$  ไปลบกับสัญญาณไซน์สามเฟสจะได้เป็นสัญญาณสเปซเวกเตอร์ในรูปที่ 3.10 ในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะจากนั้นนำ จะให้รูปแบบสัญญาณเหมือนกับวิธีของสเปซเวกเตอร์แบบการคำนวณเวลาในแต่ละเซกเตอร์ แต่วิธีการมอดูเลตแบบนี้จะใช้การคำนวณน้อยและไม่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับวิธีการมอดูเลตแบบการคำนวณเป็นเซกเตอร์ (Time-Based SVPWM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 สรุป

จากเนื้อหาในบทที่ 3 ทฤษฎีอินเวอร์เตอร์สามเฟสโครงสร้างการทำงานของสวิตช์ในการแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส แบบอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบพีดับเบิลยูเอ็มและเทคนิคการมอดูเลชันขั้นสูงสำหรับอินเวอร์เตอร์ไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมความเร็วสวิตช์ โดยในการควบคุมการทำงานของสวิตช์จะเกิดจากการมอดูเลชันของสัญญาณคล้ายรูปสามเหลี่ยมหรือซอทูซ (sawtooth) กับสัญญาณไซน์ ซึ่งสัญญาณไซน์ในงานวิจัยนี้จะได้จากตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมโดยจะกล่าวถึงที่มาและพื้นฐานโครงสร้างเบื้องต้นในการสร้างและออกแบบในบทต่อไป



รูปที่ 3.13 บล็อกไดอะแกรมเทคนิคสเปซเวกเตอร์สำหรับอินเวอร์เตอร์ไฟฟ้าสามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# ทฤษฎีพื้นฐานและความเป็นมาโครงข่ายประสาทเทียม

### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและความเป็นมาโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) หรือที่เรียกกันว่า “นิวรอลเน็ตเวิร์ค” โดยจะกล่าวถึงโครงข่ายเชิงชีววิทยา (Biological Neural Network) และโครงข่ายประสาทเทียม รวมทั้งข้อดีที่ได้จากการเรียนรู้และจดจำของโครงข่ายประสาทซึ่งเป็นวิธีการเลียนแบบโครงสร้างภายในที่คล้ายคลึงกับเซลล์สมองของมนุษย์ถึงแม้จะไม่เทียบเท่าก็ตาม

โดยความแตกต่างระหว่างคอมพิวเตอร์กับโครงข่ายประสาทเทียมอย่างหนึ่งนั่นคือคอมพิวเตอร์ เมื่อต้องการให้ทำงานหนึ่งอย่างจะต้องทำงานผ่านระบบปฏิบัติการหรือชุดคำสั่งโปรแกรม กลับกันโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อต้องการให้ทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งสามารถทำได้โดยการสอน (Training) ตัวของโครงข่ายโดยจะนำเอาชุดข้อมูลหรือบทเรียนที่ได้เข้าไปเก็บในตัวโครงข่ายประสาทเทียม จากนั้นเมื่อใช้งานจะถูกเรียกชุดข้อมูลที่ได้ทำการสอนขึ้นมาประมวลผลเพื่อตอบสนองต่อชิ้นงานที่ต้องการ โดยคุณสมบัติและประโยชน์ของโครงข่ายประสาทเทียมมีดังนี้

1 การเชื่อมต่อแบบขนานเป็นจำนวนมาก (massive parallel) โครงข่ายประสาทเทียมประกอบไปด้วยหน่วย ประมวลผลย่อย ๆ จำนวนมากมายเชื่อมต่อกันแบบขนานหลายรูปแบบ

2 ข้อมูลและการคำนวณแบบกระจาย (distributed data and computation) หน่วยประมวลผลย่อยแต่ละ หน่วยมีโครงสร้างที่ง่าย ๆ มีความสามารถไม่มากนักประสิทธิภาพการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมได้ จากการทำงานร่วมกันแบบกระจายของหน่วยประมวลผลย่อย ๆ เหล่านี้เป็นจำนวนมาก

3 ความสามารถในการเรียนรู้ (learning) คุณสมบัติที่เด่นที่สุดของโครงข่ายประสาทเทียมคือความสามารถในการเรียนรู้ กระบวนการดังกล่าวทำให้การแก้ปัญหาหลายๆ อย่างเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ แตกต่างไปจากการแก้ปัญหาด้วยวิธีแบบดั้งเดิมอย่างสิ้นเชิง

4 ความสามารถในการทำให้เป็นทั่วไป (generalization) เป็นผลพลอยได้จากความสามารถในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม การเรียนรู้ด้วยข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต ตัวอย่างบางส่วนนำไปสู่ความสามารถในการตอบสนองต่อข้อมูลอินพุตทั้งหมดได้ แน่ใจว่าความสามารถในการทำให้เป็นทั่วไปย่อมขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลสำหรับฝึกสอนด้วย

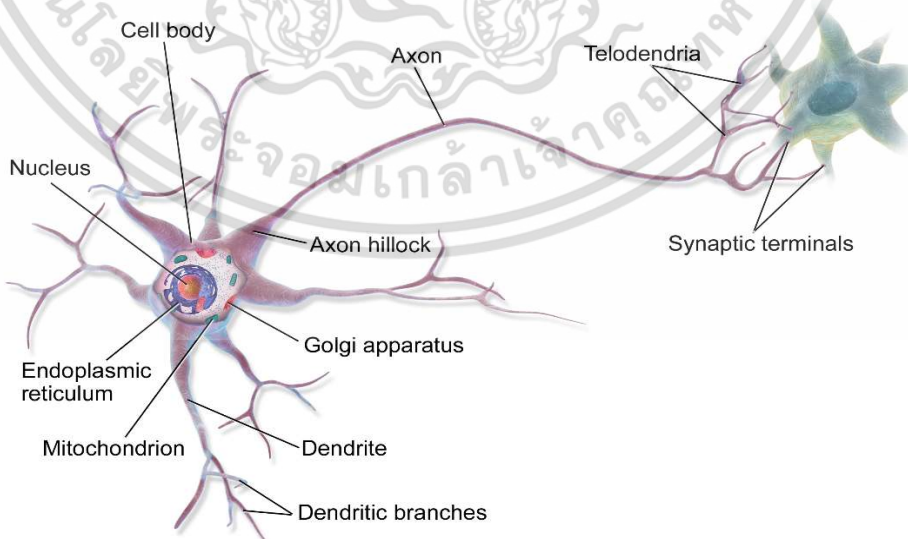
4 การปรับตัว (adaptation) การเรียนรู้ของโครงข่ายนำไปสู่ความสามารถในการปรับตัวได้ คุณสมบัตินี้ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีการทำงานที่น่าสนใจ ในการนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาที่สภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง (dynamic) ได้เป็นอย่างดี

5 การประมวลผลข้อมูลเชิงเนื้อหา (Content-based processing) รูปแบบข้อมูลของโครงข่ายประสาทเทียมอยู่ในรูปเชิงเนื้อหา ไม่ใช่เชิงตัวเลขเหมือนระบบดั้งเดิมทั่วไป การประมวลผลข้อมูลเชิงเนื้อหาดังกล่าวจึงทำให้โครงข่ายประสาทเทียม มีการทำงานใกล้เคียงกับสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติ

6 การทนต่อความพร่อง (fault tolerance) การเชื่อมต่อกับหน่วยประมวลผลย่อย ๆ จำนวนมากทำให้เกิดการทนต่อความพร่อง เมื่อส่วนใดส่วนหนึ่งของโครงข่ายเสียหายระบบโดยรวมจะยังคงทำงานได้ต่อไป

#### 4.2 โครงสร้างลักษณะเซลล์ประสาทเชิงชีววิทยา [18]

ระบบประสาทเป็นระบบที่ใหญ่และซับซ้อน สมองเป็นศูนย์กลางของระบบประสาทโดยจะเชื่อมต่อกับประสาทสัมผัส เพื่อรับข้อมูลจากภายนอกเข้าสู่ระบบประสาท แล้วทำการประมวลผลเป็นคำสั่งไปยังอวัยวะต่างๆ โดยปกติ สมองประกอบไปด้วยโครงข่ายประมาณ 10 ยกกำลัง 11 ของนิวรอน และมีการเชื่อมต่อกันภายในภายในโครงข่ายย่อยเรียกว่า นิวคลีไอ (nuclei) โครงข่ายย่อยจะทำการแยกและปรับข้อมูลจากประสาทสัมผัสก่อนส่งไปยังโครงข่ายย่อยอื่นๆ และสุดท้ายกลายเป็นรูปแบบของสัญญาณที่ผ่านการประมวลผลเป็นคำสั่งไปยังอวัยวะต่างๆ ระบบประสาทสัมผัสและโครงข่ายย่อยในสมองทำหน้าที่หลักในการแยกย่อยข้อมูลที่ซับซ้อน ให้กลายเป็นองค์ประกอบพื้นฐานในรูปลักษณะของความรู้สึกการแยกย่อยนี้จะแตกต่างกันไปสำหรับแต่ละความรู้สึก ยกตัวอย่าง



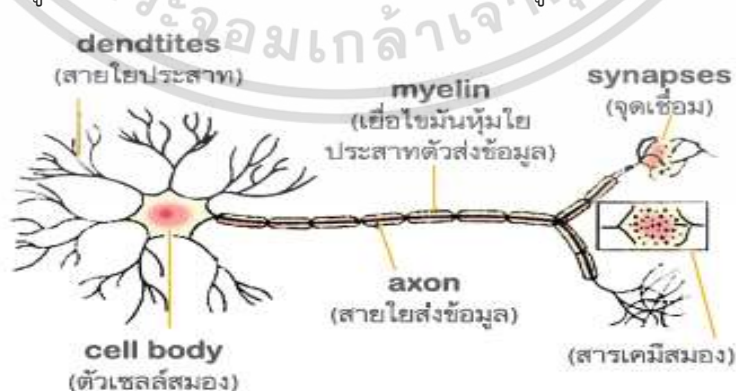
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างของเซลล์สมอง ([https:// wikimedia.org](https://wikimedia.org))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบเซลล์ขนาดเล็กและเซลล์ขนาดใหญ่

พาร์โวเซลล์ (parvo-เล็ก)		แมกโนเซลล์ (magnon-ใหญ่)
ความแตกต่างทางสรีระ	ขนาดตัวเล็ก มีกิ่งก้านหนาแน่น กิ่งก้านสั้น	ขนาดใหญ่ มีกิ่งก้านเบาบาง กิ่งก้านยาว
ความแตกต่างทางกายภาพ	อัตราความนำต่ำ ผลตอบสนองคงตัว แผงรับเล็ก ไวต่อความแตกต่างแบบต่ำ ไวต่อสี	อัตราความนำสูง ผลตอบสนองชั่วขณะ แผงรับใหญ่ ไวต่อความแตกต่างแบบสูง บอดสี
ผลพฤติกรรมที่น่าจะเป็น	วิเคราะห์รายละเอียดของรูปแบบ วิเคราะห์เชิงพื้นที่ มองเห็นแบบสี	ตรวจจับการเคลื่อนไหว วิเคราะห์เชิงเวลา ตรวจรับความลึก

เช่นตา (อวัยวะรับสัมผัส) และสมองทำการแยกข้อมูลภาพเป็นสี ความเข้ม, ทิศทาง, การเคลื่อนที่, อัตราส่วน, ความเป็นสเตอริโอ เป็นต้น องค์ประกอบย่อย ๆ เหล่านี้จะไม่ถูกนำกลับไปรวมกัน และสร้างเป็นข้อมูลภาพดั้งเดิมอีก แต่จะถูกส่งไปยังโครงข่ายย่อยเพื่อทำการประเมินและประกอบกันเป็นบางส่วนของระบบประสาทของมนุษย์เป็นแบบสำคัญให้กับโครงข่ายประสาทเทียม (ในองค์ประกอบ การประมวลผล) ทั้งสองระบบจึงมีโครงสร้างที่อุปมาเหมือนกันได้ มนุษย์ในการที่จะทำการหาแบบจำลองของโครงข่ายประสาทได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยพิจารณาสมองและส่วน อื่น ๆ ของระบบประสาทประกอบไปด้วยนิวรอนชนิดต่างๆ ที่มีความหลากหลายไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้า จำนวนขนาดและรูปแบบการเชื่อมต่อของนิวรอน ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.2 นิวรอนในสมองมนุษย์ ([https:// wikimedia.org](https://wikimedia.org))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

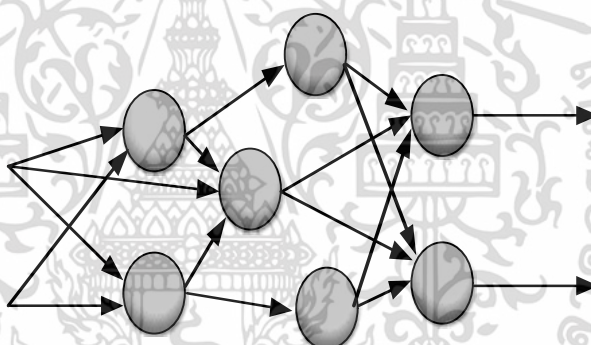
นิวรอนในสมองมนุษย์ประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลัก 3 อย่างคือเดนไดรต์ (dendrite) ร่างเซลล์ (cell body หรือ Soma) และแกนประสาท (axon) แสดงในรูปที่ 4.2 เดินไดรต์รับสัญญาณจากนิวรอนอื่นในสมองแอกซอนของนิวรอนอื่นจะเชื่อมต่อกับเด็นไดรต์และหน้าสัมผัสของตัวเซลล์ด้วยจุดประสาทประสาท (synapse) จำนวนการเชื่อมต่อของจุดประสานประสาทจะขึ้นอยู่กับชนิดของนิวรอน ซึ่งอาจจะมีตั้งแต่สองสามร้อยไปจนถึงหลักหมื่น เนื่องจากเยื่อหุ้มเซลล์ (membrane) ในสมองมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า ขนาดของสัญญาณที่มาถึงเป็นไดรต์จะสลายอย่างรวดเร็ว โดยจะขึ้นอยู่กับเวลาและระยะทาง ดังนั้นการที่นิวรอนหนึ่งๆ จะถูกกระตุ้นจนถึงขั้นทำงานได้นั้นจะต้องประกอบไปด้วยสัญญาณจากหลายๆ นิวรอนในเวลาและตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน ร่างเซลล์หรือโซมา (soma) ทำหน้าที่รวมสัญญาณที่เข้ามาในเซลล์จากเด็นไดรต์ เมื่อผลรวมของระดับสัญญาณสูงถึงระดับจุดเปลี่ยนที่จะกระตุ้นนิวรอน ตัวนิวรอนจะให้กำเนิดศักย์กระทำ (action potential) นั่นคือนิวรอนทำงานพร้อมกับส่งค่าศักย์ดังกล่าวผ่านแกนประสาทไปยังนิวรอนอื่นๆ หรือเซลล์อื่นๆ ที่อยู่นอกระบบประสาท เช่น เซลล์กล้ามเนื้อ เป็นต้น อย่างไรก็ตามถ้าผลรวมของสัญญาณไม่ถึงระดับจุดเปลี่ยน สัญญาณที่มีอยู่จะสลายไปอย่างรวดเร็วและไม่ทำให้เกิดการกระตุ้นใดๆ ของนิวรอน ดังนั้นนิวรอนจะมีอยู่เพียงสองสถานะคือทำงานและไม่ทำงาน ความเข้มแข็งของสัญญาณอินพุตที่เข้ามาสู่นิวรอนจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาด แต่จะขึ้นอยู่กับความถี่ กล่าวคืออินพุตที่เข้มแข็งกว่าจะสร้างศักย์กระทำในความถี่ที่สูงกว่าอินพุตที่อ่อนแอกว่า ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมไม่มีความใกล้เคียงกับโครงสร้างสมองของมนุษย์เลย แต่ว่าก็มีความคล้ายคลึงบ้างในบางมุมมองกล่าวคือ

- โครงข่ายทั้งสองแบบประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผลง่ายๆ (นิวรอน) เชื่อมต่อกันภายในเป็นจำนวนมาก
- การเชื่อมต่อกันเป็นตัวบอกหน้าที่การทำงานของส่วนนั้นๆ ถึงแม้ว่าความเร็วของนิวรอนในสมองมนุษย์จะช้ากว่าคอมพิวเตอร์ยุคปัจจุบันเป็นอย่างมาก แต่มนุษย์เราสามารถทำงานที่ซับซ้อนหลายๆ อย่างได้ในเวลาอันรวดเร็ว เนื่องมาจากการทำงานแบบขนานของนิวรอนที่มีการเชื่อมต่อกันภายในนั่นเอง การออกแบบใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมจะมีประสิทธิภาพมากในระบบที่มีการประมวลผลแบบขนาน

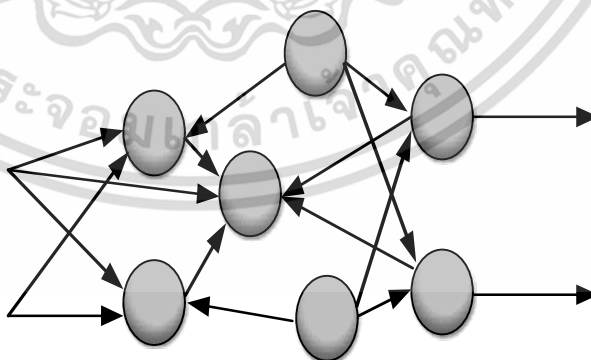
### 4.3 โครงข่ายประสาทเทียม [18]

โครงข่ายประสาทเทียมนั้นได้จำลองการทำงานเพียงบางส่วนของเซลล์ประสาทในสมองมนุษย์ ซึ่งได้มีการแบ่งชนิดของโครงข่ายประสาทเทียม สามารถทำได้หลายวิธี เช่นวิธีการฝึกสอน วิธีการเรียนรู้การประยุกต์ใช้งาน ชนิดของอินพุต ฯลฯ ดังนั้นจึงไม่มีวิธีที่แน่นอนในการจัดกลุ่มชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมแสดงในรูปที่ 4.3 แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

- โครงข่ายไปข้างหน้า (feed-forward network) โครงข่ายไปข้างหน้าที่เป็นที่รู้จักและนิยมใช้กันมากที่สุดคือโครงข่ายเพอร์เซ็ปตรอนแบบหลายชั้น (multi-layer perceptron) ซึ่งมีการเชื่อมต่อระหว่างชั้นเป็นแบบทิศทางเดียว คือมีทิศทางจากอินพุตไปยังเอาต์พุต
- โครงข่ายป้อนกลับ (recurrent network) โครงข่ายป้อนกลับเป็นโครงข่ายที่มีการเชื่อมต่อภายในระหว่างนิวรอนในรูปแบบป้อนกลับหรือวงรอบ ตัวอย่างการแบ่งชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมอีกอย่างหนึ่งคือแบ่งเป็นการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนและแบบไม่มีผู้ฝึกสอน



(ก)โครงข่ายไปข้างหน้า (feed-forward network)



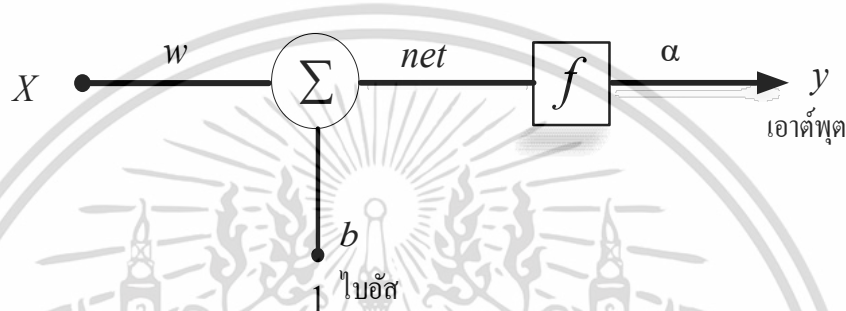
(ข)โครงข่ายป้อนกลับ (recurrent network)

รูปที่ 4.3 การแบ่งชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมตามโครงสร้างสถาปัตยกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.1 แบบจำลองของนิวรอน

โครงสร้างพื้นฐานของนิวรอนที่สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.4 อินพุต  $x$  จะถูกคูณด้วยค่าน้ำหนักของประสาท (weight)  $w$  โดยมี ไบอัส  $b$  (bias หรือ ออฟเซต-offset) เป็นเสมือนอินพุตหนึ่งที่มีค่าน้ำหนักประสาทคงที่กับ 1 อินพุตทั้งสองรวม (sum) ได้เอาต์พุตเป็น  $n$  มักเรียกว่า (net input) ซึ่งจะเป็นอินพุตของฟังก์ชันถ่ายโอน  $f$  (transfer function หรือ activation function) และได้เอาต์พุตคือ  $y$



รูปที่ 4.4 แบบจำลองนิวรอนของโครงข่ายประสาทเทียม

$$\text{โดยเอาต์พุตของนิวรอนจะเขียนได้ดังนี้ } y = f(wp) + b \quad (4-1)$$

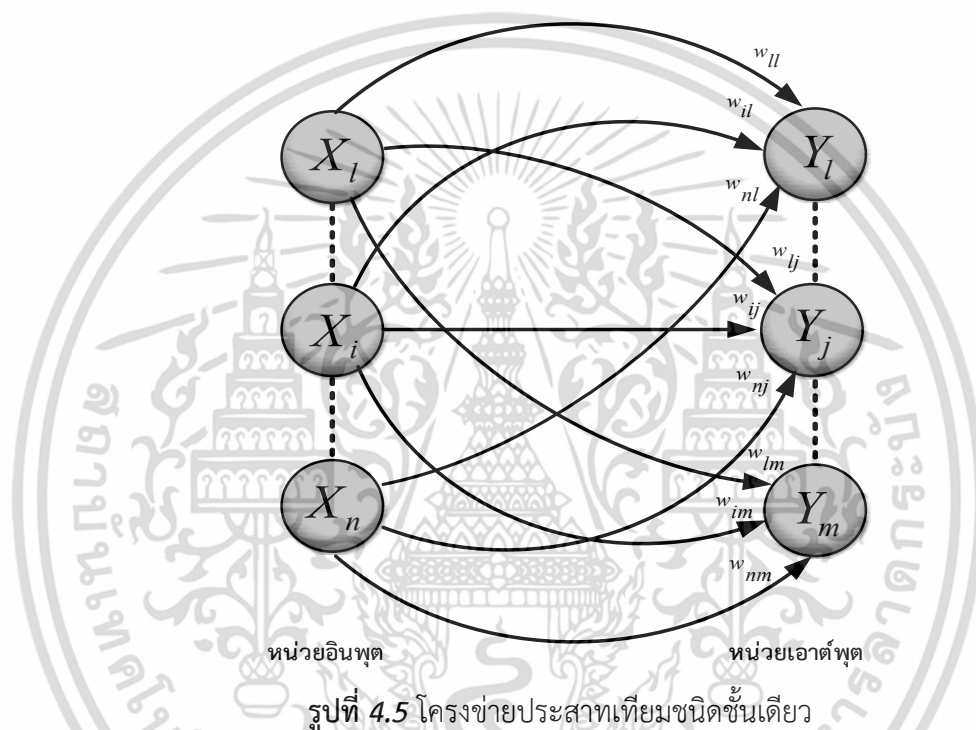
เอาต์พุตของนิวรอนจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันถ่ายโอน  $w$  และ  $b$  จะสามารถปรับค่าได้เสมือนกับค่าพารามิเตอร์ของนิวรอนโดยปกติฟังก์ชันถ่ายโอนมีอยู่หลายรูปแบบสามารถเลือกนำมาใช้ให้เหมาะสมกับค่าพารามิเตอร์ของนิวรอนและจะถูกปรับค่าจากการเรียนรู้ของนิวรอน

### 4.4 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม [19]

การจัดการของโครงข่ายประสาทเทียมภายในชั้น รูปแบบการเชื่อมต่อภายในและระหว่างชั้น เราเรียกว่า “สถาปัตยกรรมโครงข่าย” โดยทั่วไปโครงข่ายประสาทเทียมทั้งหลายประกอบด้วยชั้นอินพุต ซึ่งภายในแต่ละหน่วย (Unit) จะได้รับการถ่ายโอนเท่ากับสัญญาณอินพุตภายนอก โครงข่ายประสาทเทียมมักจะถูกจัดแบ่งเป็นโครงข่ายชั้นเดียวหรือหลายชั้น การกำหนดจำนวนของชั้น ส่วนที่เป็นหน่วยอินพุตจะไม่ถูกนับว่าเป็นหนึ่งชั้น ทั้งนี้เพราะว่าในส่วนนี้จะไม่มีการคำนวณ สำหรับจำนวนของชั้นในโครงข่ายสามารถแบ่งได้เป็นจำนวนของชั้นน้ำหนักที่เชื่อมต่อระหว่าง โครงข่ายประสาทเทียม โดยสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถจัดแบ่งได้ตาม ลักษณะโครงสร้างของโครงข่าย หรือจัดแบ่งตามกระบวนการเรียนรู้ ซึ่งในหัวข้อนี้สามารถจำแนกตามลักษณะโครงสร้างที่ประกอบกันเป็นโครงข่ายประสาทเทียมได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

#### 4.4.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดชั้นเดียว (Single Layer)

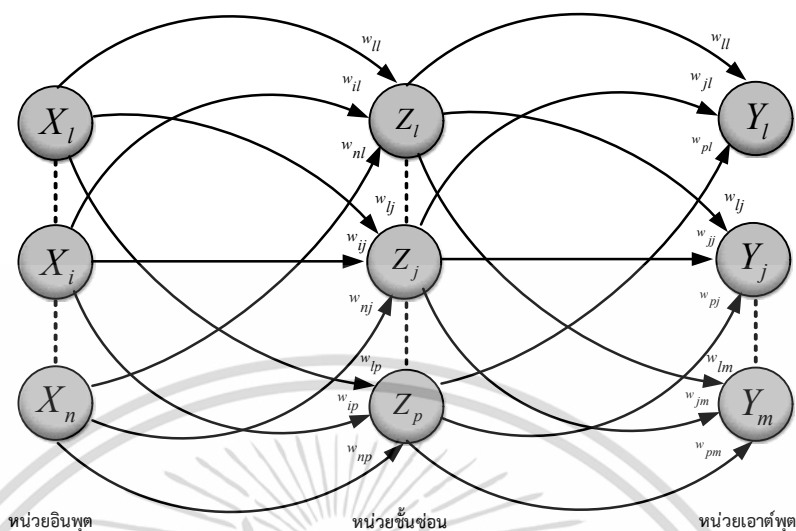
สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้จะมีค่าน้ำหนักเชื่อมต่อหนึ่งชั้น ประกอบด้วยหน่วยอินพุต ( $X_1, \dots, X_i, \dots, X_m$ ) เชื่อมต่ออยู่กับเอาต์พุต ( $Y_1, \dots, Y_j, \dots, Y_m$ ) โดยมีน้ำหนักหนึ่งชั้น เป็นส่วนที่ปรับระดับสัญญาณอินพุต ค่าน้ำหนักที่ได้จะเป็นอิสระต่อกันไม่ส่งผลกระทบต่อค่าปรับค่าน้ำหนักตัวอื่นแสดงในรูปที่ 4.5 มักใช้กับการประมวลผลที่ไม่มีความซับซ้อนมากนัก



รูปที่ 4.5 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดชั้นเดียว

#### 4.4.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดหลายชั้น (Multi-layer)

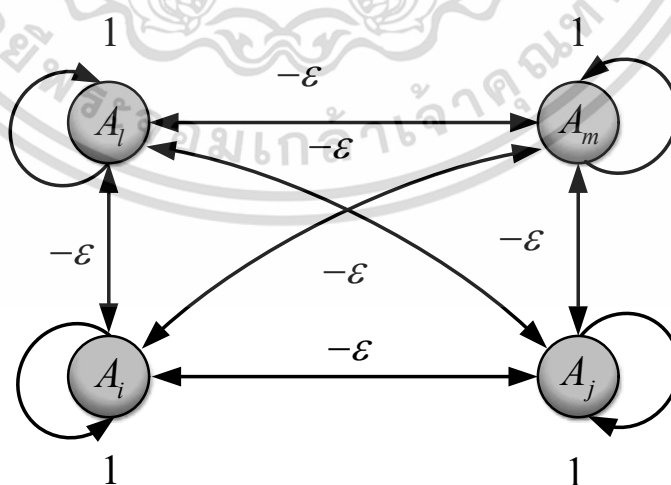
สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้เป็นโครงข่ายที่มีโหนดหลายชั้น เชื่อมต่อกันอยู่ระหว่างหน่วยอินพุตกับหน่วยเอาต์พุต แสดงในรูปที่ 4.6 โดยมีชั้นซ่อนเป็นตัวเชื่อมระหว่างสองหน่วย โครงข่ายชนิดหลายชั้นสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาที่ซับซ้อนได้ดีกว่าโครงข่าย ชนิดชั้นเดียวแต่การฝึกสอนอาจจะยุ่งยากกว่า ถึงอย่างไรก็ตามในการฝึกสอนอาจได้รับผลสำเร็จมากกว่า เป็นเพราะว่าในบางครั้งการแก้ปัญหาของโครงข่ายชนิดชั้นเดียว ไม่สามารถรับการฝึกสอนได้อย่างถูกต้องทุกปัญหา



รูปที่ 4.6 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดหลายชั้น

#### 4.4.3 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแข่งขัน (Competitive Layer)

ลักษณะชั้นแข่งขันในส่วนนี้จะมีจำนวนของโครงข่ายประสาทเทียมมาก การเชื่อมต่อภายในระหว่างโครงข่ายประสาทเทียมด้วยกันในชั้นแข่งขันนี้มีสถาปัตยกรรม แสดงในรูปที่ 4.7 โครงข่ายย่อยที่ประกอบกันเป็นโครงข่ายใหญ่จะเชื่อมต่อกันภายในด้วยน้ำหนัก  $(-\epsilon)$  แต่แต่ละโครงข่ายย่อยจะมีสถาปัตยกรรมภายในของตัวเอง เมื่อโครงข่ายย่อยประมวลผลภายในแล้วก็จะส่งสัญญาณเอาต์พุตไปยังสัญญาณอินพุตของโครงข่ายอื่นโดยอ่านค่าน้ำหนัก  $(-\epsilon)$  จนกระทั่งเหลือเพียงโครงข่ายย่อยโครงข่ายเดียวที่ให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตไม่เท่ากับศูนย์



รูปที่ 4.7 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแข่งขัน

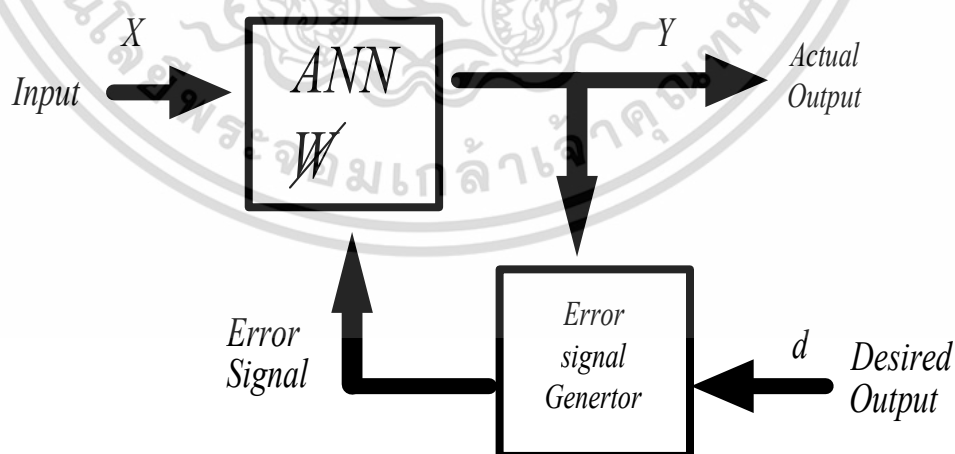
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม [19]

การกำหนดน้ำหนักของโครงข่ายประสาทเทียม มีวิธีการกำหนดค่าเริ่มต้นของน้ำหนัก (ในช่วงการฝึกสอน) เป็นการหาค่าน้ำหนักที่เหมาะสมให้แก่โครงข่าย ที่สามารถฝึกสอนให้โครงข่ายประสาทเทียมเกิดการเรียนรู้ได้โดยการป้อนอินพุตและเอาต์พุตตัวอย่างที่ถูกต้องให้กับโครงข่ายประสาทเทียม แต่ละเซลล์และโครงข่ายประสาทเทียมจะมีกระบวนการปรับค่าน้ำหนักในระบบให้สอดคล้องกับกลุ่มตัวอย่างของชุดข้อมูลอินพุตที่จุดเชื่อมโยงค่าน้ำหนักจะถูกปรับแต่งเป็นไปตามฟังก์ชันการทำงานของระบบ ตามลักษณะพิเศษของกลุ่มตัวอย่างที่ป้อนให้ ขั้นตอนนี้อาจเป็นมากที่จะแบ่งแยกคุณลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียม กระบวนการฝึกสอนจำแนก ออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ การฝึกสอนแบบซูปเปอร์ไวส์ (Supervised Training), การฝึกสอนแบบอานซูปเปอร์ไวส์ (Unsupervised Training) และการฝึกสอนแบบเสริม (Reinforcement Learning)

### 4.5.1 การฝึกสอนแบบซูปเปอร์ไวส์ (Supervised Training)

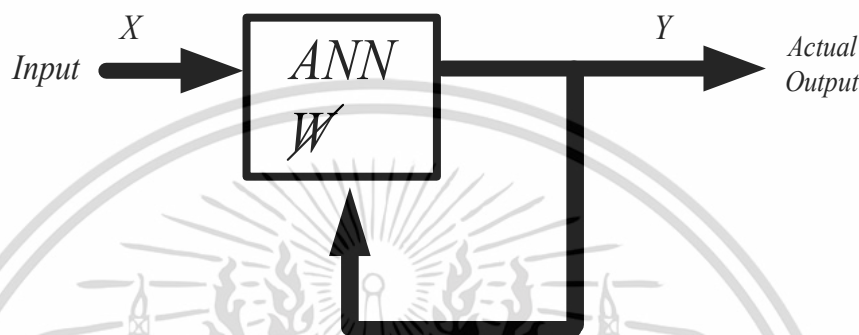
เป็นการฝึกสอนแบบจับคู่กันระหว่างอินพุตและเอาต์พุตเป้าหมายที่ต้องการเราเรียกว่า “Input - Output pairs” ที่มีความสัมพันธ์กันโดยระบบการฝึกสอนแบบนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 ถ้าให้  $(x_1, d_1), (x_2, d_2), \dots, (x_k, d_k)$  เป็นจำนวนคู่ที่ทำการฝึกสอนในเมื่อแต่ละอินพุต  $x_k$  เข้ามาฝึกสอนในโครงข่ายประสาทเทียม เอาต์พุตจริง  $y_k$  ที่คำนวณออกมาจะถูกเอาไปเปรียบเทียบกับเป้าหมาย เพื่อหาค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น จากนั้นจึงนำค่าที่ผิดพลาดป้อนกลับไปยังโครงข่าย เพื่อปรับค่าน้ำหนักทำให้ค่าเอาต์พุตจริง  $y_k$  มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าเอาต์พุตเป้าหมาย  $d_k$



รูปที่ 4.8 บล็อกไดอะแกรมการฝึกสอนแบบซูปเปอร์ไวส์

#### 4.5.2 การฝึกสอนแบบอันซูปเปอร์ไวส์ (Unsupervised Training)

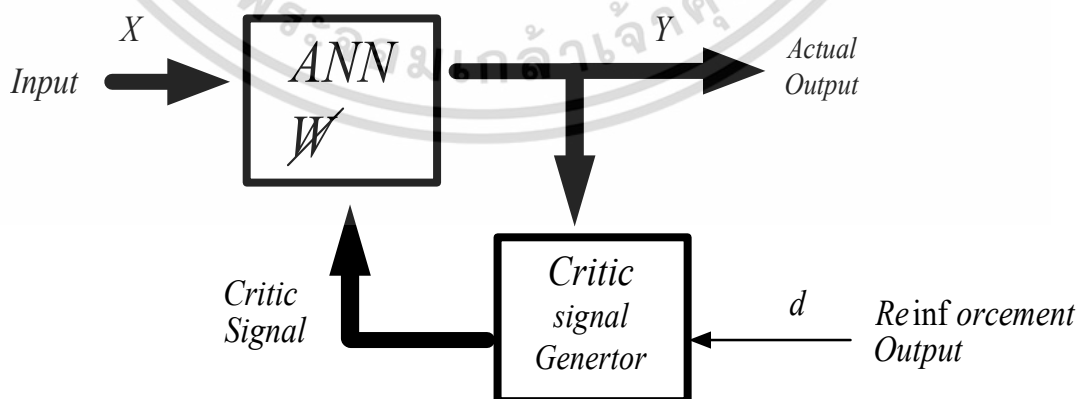
เป็นการฝึกสอนโดยไม่ต้องการเอาต์พุตเป้าหมายเข้ามาช่วยในการตัดสินใจซึ่งชุดข้อมูลการฝึกสอนจะมีแต่ข้อมูลอินพุตเท่านั้น ระบบการฝึกสอนในโครงข่ายจะมีการคำนวณปรับเปลี่ยนค่าของน้ำหนัก เพื่อให้เอาต์พุตคงที่ การคำนวณนี้เรียกว่า “self-organizing”



รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมการฝึกสอนแบบอันซูปเปอร์ไวส์

#### 4.5.2 การฝึกสอนแบบเสริม (Reinforcement Learning)

การฝึกสอนแบบซูปเปอร์ไวส์ นั้นคือแต่ละอินพุตที่เข้ามาเราได้กำหนดเอาต์พุตเป้าหมายเป็นคู่ไว้ตั้งกล่าวมาแล้วในตอนต้น แต่บางครั้งเอาต์พุตจริงที่ออกมาอาจมีค่าผิดพลาดมากเกินไป ในกรณีนี้จะมีเพียงบิตหนึ่งอันเดียวเท่านั้นของข้อมูลที่จะป้อนกลับไปเพื่อชี้บอกว่าเอาต์พุตจริงถูกต้องหรือผิดพลาด ซึ่งข้อมูลที่ ป้อนกลับไปเรียกว่า Reinforcement Signal และการฝึกสอนแบบนี้ เรียกว่า “Reinforcement Learning” โดยระบบการทำงานสามารถแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 บล็อกไดอะแกรมการฝึกสอนแบบเสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.6 ฟังก์ชันถ่ายโอน [19]

ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นส่วนที่ทำหน้าที่รวมค่าเชิงตัวเลขจากเอาต์พุตของนิวรอน แล้วทำการตัดสินใจว่าจะส่งสัญญาณเอาต์พุตออกไปในรูปใด ฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถเป็นได้ทั้งแบบเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้นก็ได้ โดยการเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนจะขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบที่นำเอาโครงข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้ ฟังก์ชันถ่ายโอนมีอยู่หลายแบบ ตัวอย่างแบบที่มีการใช้งานทั่ว ๆ ไปมากที่สุดมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.2 การเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนควรจะต้องมีการวิเคราะห์พิจารณาให้เหมาะสมกับระบบหรือปัญหาที่ต้องการแก้ไข ตัวอย่างเช่นฟังก์ชันซิกมอยแบบลอการิทึมมีเอาต์พุตอยู่ในช่วง (0, 1) ในขณะที่ฟังก์ชันซิกมอยแบบเส้นสัมผัสไฮเพอร์โบลาร์มีเอาต์พุตอยู่ในช่วง (-1,1) เป็นต้น ลักษณะความเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นของฟังก์ชันถ่ายโอนเองนั้น มีผลโดยตรงต่อการทำงานของโครงข่าย ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของการทำให้เป็นทั่วไป (generalization) หรือความเร็วในการเรียนรู้ของโครงข่าย อย่างไรก็ตามการเลือกชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอนมักจะทำโดยการทดลอง เลือกฟังก์ชันแบบต่างๆ ทำการปรับพารามิเตอร์ของฟังก์ชันแล้วสังเกตผลว่าโครงข่ายช่วยให้ผลลัพธ์ที่ต้องการหรือไม่ ถ้าไม่ ก็ทำการเลือกฟังก์ชันหรือปรับพารามิเตอร์ใหม่ จนกระทั่งได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ

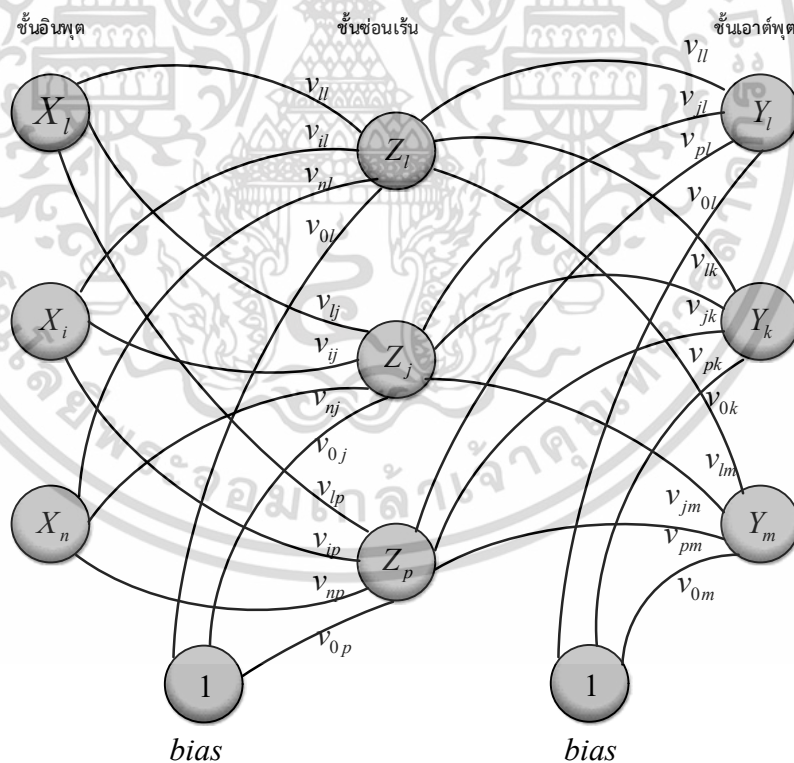
ตารางที่ 4.2 ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบต่างๆ

ชื่อฟังก์ชัน	สมการความสัมพันธ์	กราฟความสัมพันธ์
ซิกมอยแบบเส้นสัมผัสไฮเพอร์โบลาร์ Hyperbolic tangent sigmoid	$y = \frac{1}{1 + e^{-n}}$	
ซิกมอยแบบลอการิทึม Log- sigmoid	$y = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$	
ฮาร์ดลิมิต Hard limit	$y = 0 \text{ ถ้า } n < 0$ $y = 1 \text{ ถ้า } n \geq 0$	
ฮาร์ดลิมิตแบบสมมาตร Symmetrical hard limit	$y = -1 \text{ ถ้า } n < 0$ $y = +1 \text{ ถ้า } n \geq 0$	

เส้นตรง Linear	$y = n$	
เส้นตรงบวก Positive linear	$y = 0$ ถ้า $n < 0$ $y = n$ ถ้า $n \geq 0$	

#### 4.7 การเรียนรู้แบบแพร่กลับ (Backpropagation learning)

การฝึกแบบซูปเปอร์ไวส์ ซึ่งเป็นที่นิยมมากและสามารถใช้งานได้ดีก็คือ การเรียนรู้แบบแพร่กลับเนื่องจากใช้งานได้ดีกับโครงข่ายประสาทเทียมที่มีแบบหลายชั้นโดยการเรียนรู้แบบแพร่กลับมีกระบวนการที่สำคัญอยู่ 3 ขั้นตอน คือ การส่งรูปแบบของอินพุตเข้าไปในโครงข่าย การคำนวณและแพร่กลับค่าผิดพลาดและการปรับค่าถ่วงน้ำหนักให้เหมาะสม แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การเรียนรู้แบบแพร่กลับแบบชั้นซ่อนหนึ่งชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 แสดงตัวอย่างง่าย ๆ ของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้นและมีจำนวนชั้นซ่อน (Hidden layer)  $z$  จำนวน 1 ชั้น อยู่ระหว่างชั้นเอาต์พุต (Output layer)  $y$  และชั้นอินพุต (Input layer)  $x$

ค่าไบอัสที่ส่งให้หน่วยเอาต์พุต  $y_k$  แทนด้วย  $w_{0k}$  และค่าไบอัสที่ส่งให้หน่วยซ่อน  $z_j$  แทนด้วย  $v_{0j}$  ทิศทางการไหลของสัญญาณจะไหลไปข้างหน้าเมื่ออยู่ในช่วงของการทำงานแต่เมื่ออยู่ในช่วงของการแพร่กลับสัญญาณจะไหลย้อนทิศทางเดิม

ในระหว่างสัญญาณไหลไปข้างหน้า หน่วยอินพุตแต่ละตัว ( $x_i$ ) ได้รับความสัญญาณอินพุตและกระจายสัญญาณไปให้หน่วยซ่อนแต่ละตัว ( $z_1, \dots, z_p$ ) เพื่อทำการคำนวณหาค่าฟังก์ชันการถ่ายโอน ( $z_j$ ) แล้วส่งให้หน่วยเอาต์พุตต่อไป จากนั้นหน่วยเอาต์พุตแต่ละตัว ( $y_k$ ) จะคำนวณหาค่าระดับฟังก์ชันการถ่ายโอน ( $y_i$ ) เพื่อจัดเป็นผลตอบสนองของโครงข่ายที่มีต่อรูปแบบของอินพุตที่กำหนดให้

ในระหว่างการเรียนรู้หน่วยเอาต์พุตแต่ละตัวจะทำการเปรียบเทียบค่าระดับฟังก์ชันการถ่ายโอน ( $y_k$ ) ที่คำนวณได้กับค่าเป้าหมาย เพื่อนำไปหาค่าผิดพลาดที่หน่วยนั้น ๆ ค่าผิดพลาดนี้ใช้สัญลักษณ์เป็น  $\delta_k$  ( $k = 1, \dots, m$ ) โดยค่า  $\delta_k$  เป็นค่าผิดพลาดของหน่วยเอาต์พุต  $y_k$  นี้จะถูกส่งกลับไปให้ทุกหน่วยในชั้นก่อนหน้า ซึ่งก็คือหน่วยซ่อนที่เชื่อมต่อกับหน่วยเอาต์พุต  $y_k$  จากนั้นจึงนำไปปรับปรุงค่าถ่วง น้ำหนักระหว่างชั้นเอาต์พุตกับชั้นซ่อนต่อไป

ในทำนองเดียวกันค่าผิดพลาด  $\delta_j$  ( $j = 1, \dots, p$ ) จะถูกคำนวณที่แต่ละหน่วยซ่อน ( $z_k$ ) แต่ไม่จำเป็นต้องส่งค่ากลับไปยังชั้นอินพุต เพียงแต่นำไปปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างชั้นซ่อนและชั้นอินพุตเท่านั้น

เมื่อได้ค่าผิดพลาด  $\delta_j$  แล้วทำการปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับทุกชั้นจะเกิดขึ้นอย่างทันที โดยการปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนัก  $w_{jk}$  จากหน่วยซ่อน  $z_k$  ไปยังหน่วยเอาต์พุต  $y_k$  ภายใต้เงื่อนไขของค่าผิดพลาด  $\delta_k$  และค่าระดับฟังก์ชันถ่ายโอน  $z_j$  ของหน่วยซ่อน  $z_j$  ส่วนการปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนัก  $v_{ij}$  จากหน่วยอินพุต  $x_i$  ไปยังหน่วยซ่อน  $z_k$  นั้นจะทำภายใต้เงื่อนไขของค่าผิดพลาด  $\delta_j$  และค่าระดับฟังก์ชันการถ่ายโอน  $x_i$  ของหน่วยอินพุต

#### 4.7.1 ตัวแปรที่ใช้ในการเรียนรู้แบบแพร่กลับ

$x$  เวกเตอร์การฝึกอินพุต (input training vector) ดังสมการ

$$x = (x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) \quad (4-2)$$

$d$  เวกเตอร์เอาต์พุตเป้าหมาย (output training vector ) ดังสมการ

$$d = (d_1, \dots, d_k, \dots, d_m) \quad (4-3)$$

$\delta_k$  ค่าผิดพลาดเนื่องจากหน่วยเอาต์พุต  $Y_k$  ที่แพร่กลับมายังหน่วยซ่อน เพื่อนำไปปรับปรุงค่า ถ่วงน้ำหนัก  $w_{jk}$

$\delta_j$  ค่าผิดพลาดเนื่องจากหน่วยซ่อน  $z_j$  เพื่อนำไปปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนัก  $v_{ij}$

$\alpha$  อัตราการเรียนรู้

$X_i$  หน่วยอินพุตที่  $i$

$z_j$  หน่วยซ่อนที่  $j$

$Y_k$  หน่วยเอาต์พุตที่  $k$

$v_{0j}$  ค่าไบอัสที่หน่วยซ่อนที่  $j$

$w_{0k}$  ค่าไบอัสที่หน่วยเอาต์พุต  $k$

อินพุตลัพท์ที่ส่งไปให้  $z_j$  ใช้สัญลักษณ์  $z\_in_j$  โดยหาค่าได้ดังสมการที่

$$z\_in_j = v_{0j} + \sum_i x_i v_{ij} \quad (4-4)$$

สัญญาณเอาต์พุตหรือค่าระดับฟังก์ชันถ่ายโอนของ  $z_j$  ใช้สัญลักษณ์  $z_j$  ดังสมการที่

$$z_j = f(z\_in_j) \quad (4-5)$$

อินพุตลัพท์ที่ส่งไปให้  $Y_k$  ใช้สัญลักษณ์  $y\_in_k$  โดยหาค่าได้ดังสมการที่

$$y\_in_k = w_{0k} + \sum_i z_i w_{ik} \quad (4-6)$$

สัญญาณเอาต์พุตหรือค่าระดับฟังก์ชันถ่ายโอนของ  $Y_k$  ใช้สัญลักษณ์  $y_k$  ดังสมการที่

$$y_k = f(y\_in_k) \quad (4-7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.2 ขั้นตอนกระบวนการเรียนรู้แบบแพร่กลับ

**ขั้นที่ 0** กำหนดค่าถ่วงน้ำหนักเริ่มต้น โดยทำการสุ่มค่าถ่วงน้ำหนัก

**ขั้นที่ 1** ทดสอบเงื่อนไขของการสิ้นสุดการเรียนรู้ ถ้ายังไม่เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ให้ทำตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 9

**ขั้นที่ 2** เลือกลำดับแต่ละคู่ของการฝึก (Training pair) แล้วทำตามขั้นตอนที่ 3 ถึง 8

##### - ช่วงสัญญาณไหลไปข้างหน้า

**ขั้นที่ 3** แต่ละหน่วยอินพุต ( $X_i, i=1, \dots, n$ ) ได้รับสัญญาณอินพุต  $x_i$  และกระจายสัญญาณไปให้ชั้นถัดไป (หน่วยซ่อน)

**ขั้นที่ 4** แต่ละหน่วยซ่อน ( $Z_j, j=1, \dots, p$ ) รวมผลคูณของค่าถ่วงน้ำหนักกับสัญญาณอินพุตตามสมการที่ (4-4) จากนั้นนำฟังก์ชันการถ่ายโอนไปคำนวณค่าสัญญาณเอาต์พุต เพื่อส่งสัญญาณนี้ให้ทุกหน่วยในชั้นถัดไป (หน่วยเอาต์พุต) ตามสมการที่ (4-5)

**ขั้นที่ 5** แต่ละหน่วยเอาต์พุต ( $Y_k, k=1, \dots, m$ ) รวมค่าผลคูณของค่าถ่วงน้ำหนักกับสัญญาณอินพุตตามสมการที่ (4-6) จากนั้นนำฟังก์ชันการถ่ายโอนไปคำนวณหา ค่าสัญญาณเอาต์พุตตั้งสมการที่ (4-7)

##### - ช่วงแพร่สัญญาณผิดพลาดกลับ

**ขั้นที่ 6** แต่ละหน่วยเอาต์พุต ( $Y_k, k=1, \dots, m$ ) ได้รับรูปแบบเป้าหมายที่มีความสัมพันธ์กับรูปแบบการฝึกอินพุต แล้วนำไปคำนวณหาค่าผิดพลาด ( $\delta_k$ ) โดยค่า  $\delta_k$  นี้ จะถูกส่งไปยังทุกหน่วยของชั้นที่ต่ำกว่าตั้งสมการที่

$$\delta_k = (d_k - y_k) f'(y_{in_k}) \quad (4-8)$$

คำนวณค่าถ่วงน้ำหนักที่ปรับปรุง ( $\Delta w_{jk}$ ) รวมถึงค่าไบอัสที่ปรับปรุง ( $\Delta w_{0k}$ ) เพื่อนำไปปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนักต่อไป ตั้งสมการที่ (4-9) และ (4-10)

$$\Delta w_{jk} = \alpha \delta_k z_j \quad (4-9)$$

$$\Delta w_{0k} = \alpha \delta_k \quad (4-10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 7 แต่ละหน่วยซ่อน ( $z_j, j = 1, \dots, p$ ) จะรวมค่าผิดพลาดอินพุตของหน่วยนั้นๆ ที่ได้รับจากชั้นที่สูงกว่า ตามความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\delta_{in_j} = \sum_{k=1}^m \delta_k w_{jk} \quad (4-11)$$

จากนั้นนำไปคำนวณค่าผิดพลาดของแต่ละหน่วยดังสมการ

$$\delta_j = \delta_{in_j} f'(z_{in_j}) \quad (4-12)$$

แล้วนำไปคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักที่ถูกต้องและค่าไบอัสที่ถูกต้องหนักดังสมการที่ (4-11) และ (4-12) เพื่อนำไปปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนักต่อไป

$$\Delta v_{ij} = \alpha \delta_j x_i \quad (4-13)$$

$$\Delta v_{0j} = \alpha \delta_j \quad (4-14)$$

- ช่วงปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส

ขั้นที่ 8 แต่ละหน่วยเอาต์พุต ( $Y_k, k = 1, \dots, m$ ) จะทำการปรับค่าไบอัสและค่าถ่วงน้ำหนัก ( $j = 0, \dots, p$ ) ดังสมการ

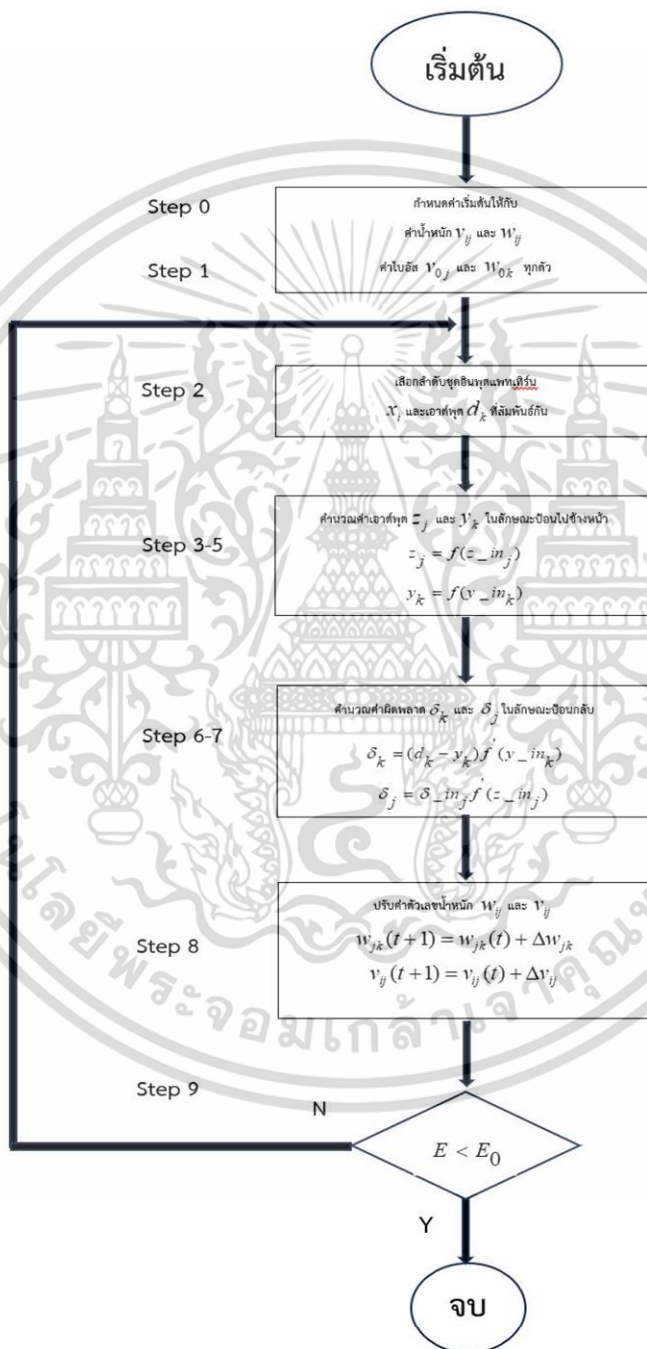
$$w_{jk}(t+1) = w_{jk}(t) + \Delta w_{jk} \quad (4-15)$$

แต่ละหน่วยซ่อน ( $z_j, j = 1, \dots, p$ ) จะทำการปรับค่าไบอัสและค่าถ่วงน้ำหนัก ( $i = 0, \dots, n$ ) ดังสมการ

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij}(t) + \Delta v_{ij} \quad (4-16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 9 สภาวะหยุดการทดสอบหลังจากหาค่าถ่วงน้ำหนัก และค่าไบอัสได้แล้วสามารถหาเอาต์พุตจากค่าอินพุตและค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสที่ได้โดยใช้สมการที่ (4-4) ถึง (4-7) โดยค่าจากสมการที่ (4-7) คือ ค่าเอาต์พุตที่ต้องการ

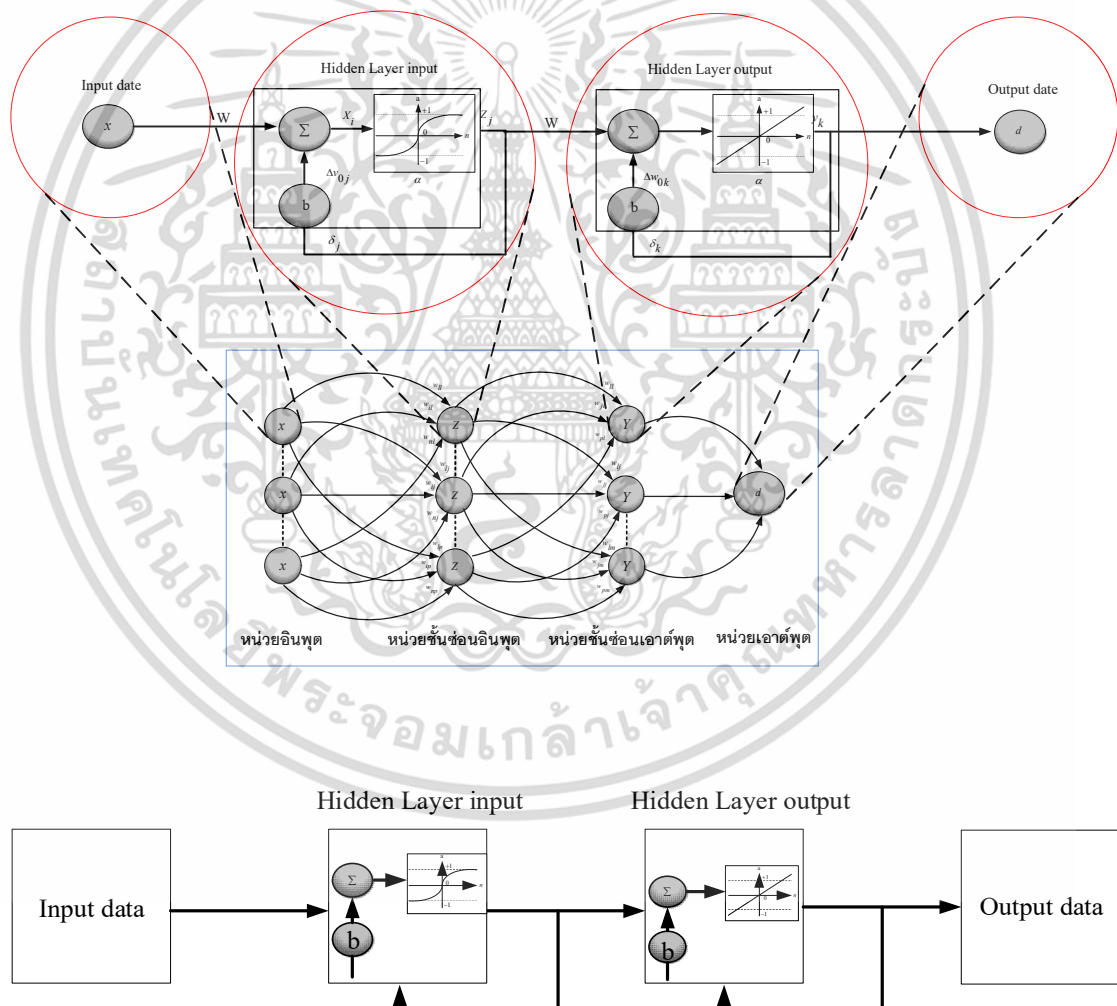


รูปที่ 4.12 โฟลว์ชาร์ตกระบวนการเรียนรู้ แบบแพร่กลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.8 บทสรุป

จากเนื้อหาในบทที่ 4 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม ได้แก่ ลักษณะโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียม รวมทั้งขั้นตอนการฝึกสอนแก่โครงข่ายประสาทเทียมและยังได้กล่าวถึงโครงข่ายประสาทเทียมแบบเชิงเส้นที่ปรับตัวเองซึ่งจะนำประยุกต์มาใช้ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบเวกเตอร์ทางอ้อม และส่วนสุดท้ายของบทนี้ได้อธิบายถึงวิธีการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ โดยจะเป็นพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมในลูบควบคุมความเร็วและลูบควบคุมกระแสของเวกเตอร์ ในบทต่อไป



รูปที่ 4.13 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการทำงานโครงข่ายประสาทเทียม

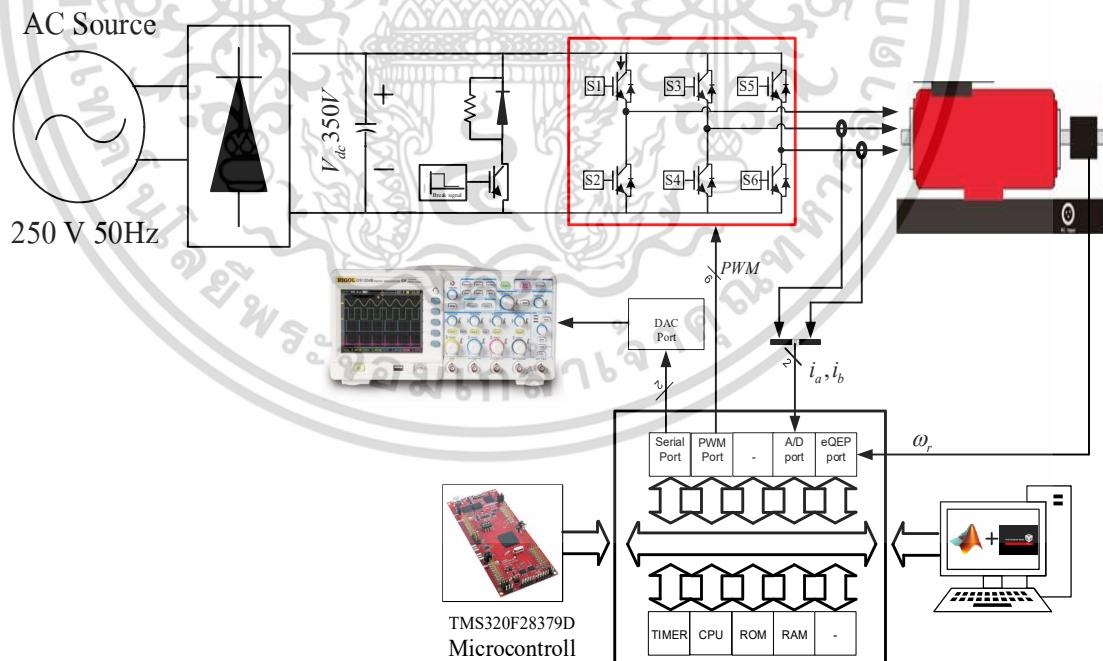
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม

### 5.1 บทนำ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink จำลองการทำงานของระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมโดยมีการตรวจจับกระแสมอเตอร์และความเร็วรอบของมอเตอร์มาประมวลผลในรูปควบคุมกระแสและรูปควบคุมความเร็ว มีการออกแบบของโครงข่ายประสาทเทียมนำไปประยุกต์ใช้กับโปรแกรม Code composer studio (CCS) และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28379D โดยมีโมดูลกำลังอินเวอร์เตอร์สามเฟส PM25RSB120 เป็นตัวรับสัญญาณ PWM เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตชิง (switching) ไปขับมอเตอร์ แสดงโครงสร้างพื้นฐานของระบบดังรูปที่ 5.1

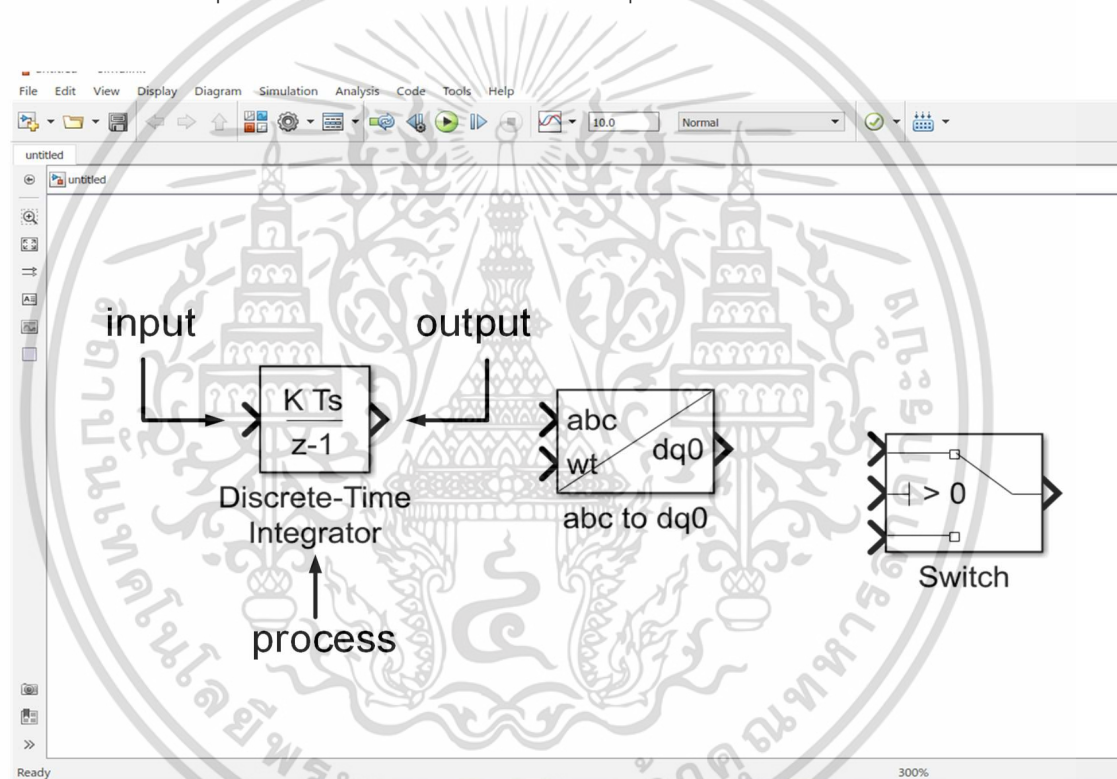


รูปที่ 5.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 MATLAB Simulink

MATLAB Simulink ออกแบบและสร้างโดยบริษัท MathWorks ได้พัฒนาขึ้นสำหรับงานสร้างแบบจำลองระบบพลวัต (Dynamic System Modeling) ต่างๆ ในรูปของบล็อกเซต (Block sets) หรือบล็อกไดอะแกรม (Block diagram) มีลักษณะเป็นรูปภาพ(แสดงในรูปที่ 5.2) คือ เป็นการโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาษาที่เป็นรูปภาพหรือกราฟิก ซึ่งบล็อกแต่ละบล็อกนั้นเปรียบเหมือนฟังก์ชัน หรือ คำสั่งต่างๆ ที่กำหนดให้ทำงานแตกต่างกันไป โดยแต่ละบล็อกนั้นจะประกอบด้วย input, Process และ output สำหรับเชื่อมต่อกับบล็อกเซตอื่นๆ ให้เป็นระบบหรือโครงข่ายโปรแกรมขึ้น



รูปที่ 5.2 บล็อกเซตฟังก์ชันที่มี input ,processและoutput

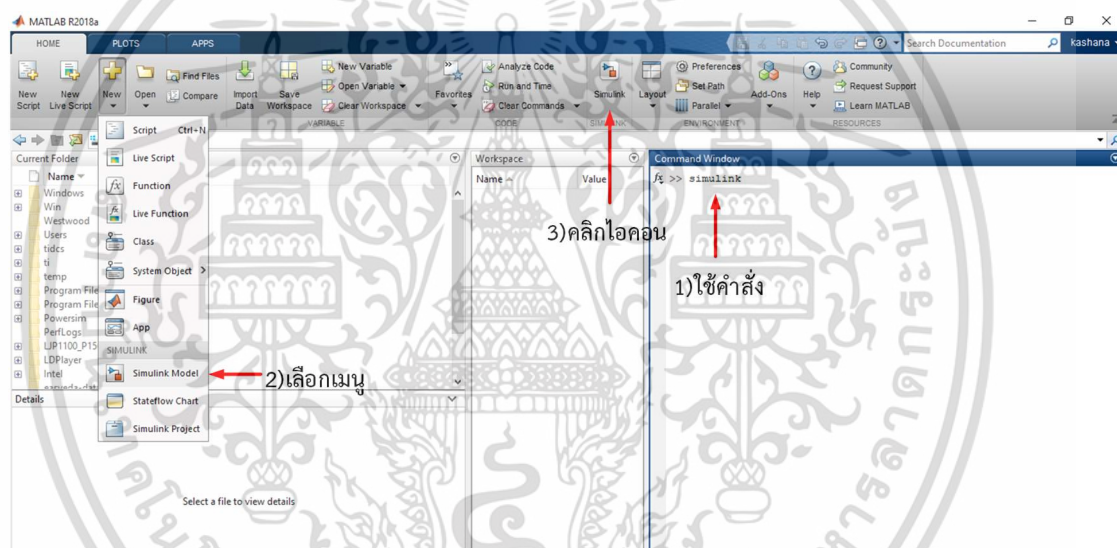
นอกจากใช้สร้างเป็นโปรแกรมได้แล้ว ยังสามารถจำลองการทำงาน (Simulating) และการวิเคราะห์ระบบ (Analyzing) อีกด้วย MATLAB ได้รวบรวมบล็อกเซตต่างๆ ไว้เป็นชุดไลบรารี (Block set Libraries) มากมายเช่นเดียวกันซึ่งถูกนำไปใช้ในงานอย่างแพร่หลายสำหรับการออกแบบโมเดลการสร้างแบบจำลองสำหรับระบบควบคุมอัตโนมัติการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลและการประมวลผลภาพดิจิทัล ซึ่งสามารถแปลงจากบล็อกเซตให้เป็นโค้ดภาษาซีได้ อีกทั้งสามารถทำงานร่วมกับโปรแกรมอื่นๆได้อีกไม่ว่าจะเป็น โปรแกรม Code composer studio (CCS) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.1 การเปิดใช้งาน MATLAB Simulink

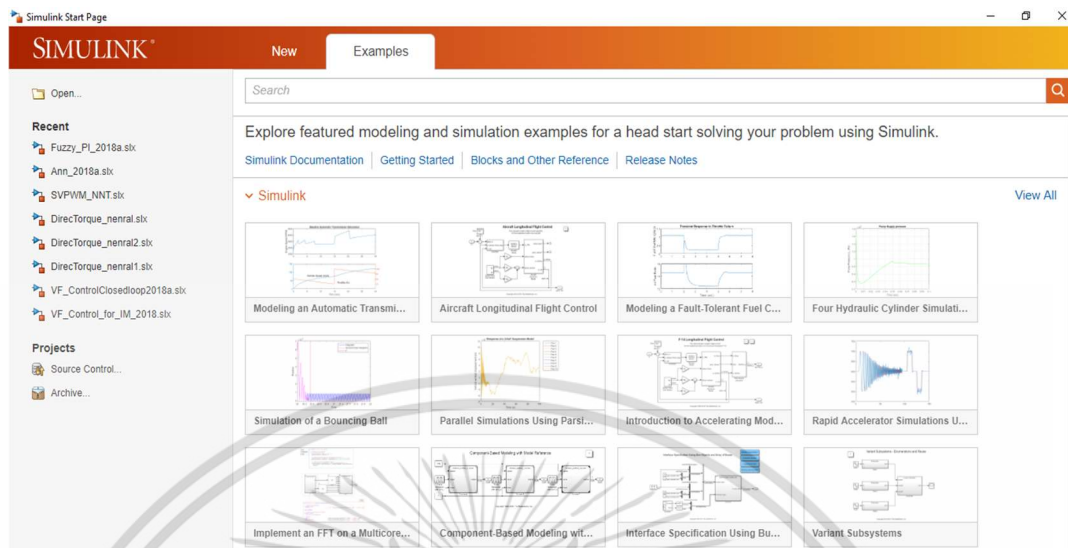
โปรแกรม MATLAB Simulink จะทำงานภายใต้ MATLAB Desktop (IDE) ดังนั้นเมื่อเราติดตั้ง MATLAB เรียบร้อยทำการเปิดโปรแกรมที่ Desktop เพื่อใช้งานในส่วนของ Simulink โดยจะมีอยู่ 3 วิธี

- 1 การเปิดโดยใช้คำสั่ง Simulink ที่หน้าต่าง Command window
  - 2 การเปิดเมนู Simulink Model บนแท็บ Home (Contextual Tab)
  - 3 การเปิดโดยการคลิกไอคอน Simulink บนหน้าต่าง MATLAB Desktop
- โดยจะแสดงในรูปที่ 5.3



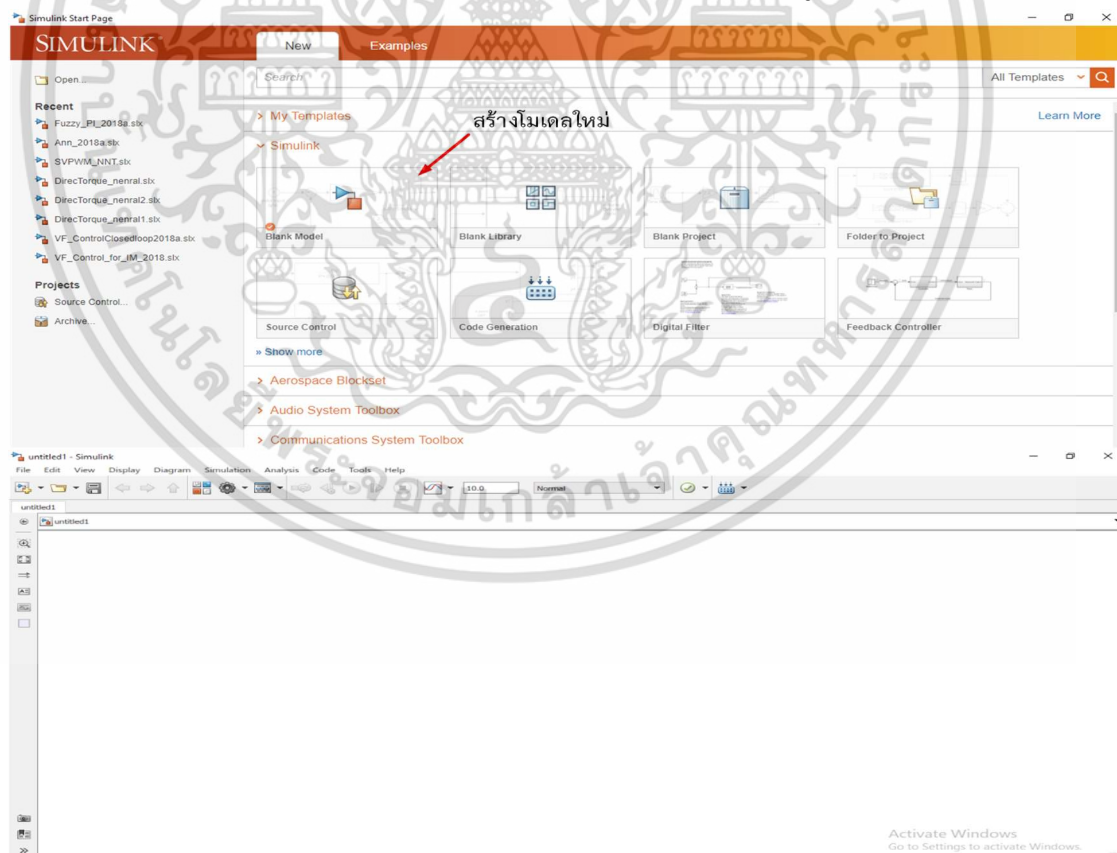
รูปที่ 5.3 การเปิดใช้งาน MATLAB Simulink

เมื่อทำการเปิด Simulink ใช้งานจะแสดงหน้าต่าง Simulink Start Page โดยหน้าต่างนี้จะมีจุดมุ่งหมายในการให้ผู้ใช้ใช้งานมีความสะดวกมากขึ้น เช่น เปิดงานที่เคยทำไว้แล้วหรือสร้างงานใหม่ตามหมวดหมู่ประเภทต่างๆ และศึกษาเรียนรู้เกี่ยวกับโมเดล Simulink ที่โปรแกรมได้จัดเตรียมเป็นหมวดหมู่ให้ แสดงดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ส่วนประกอบหน้าต่าง Simulink Start Page

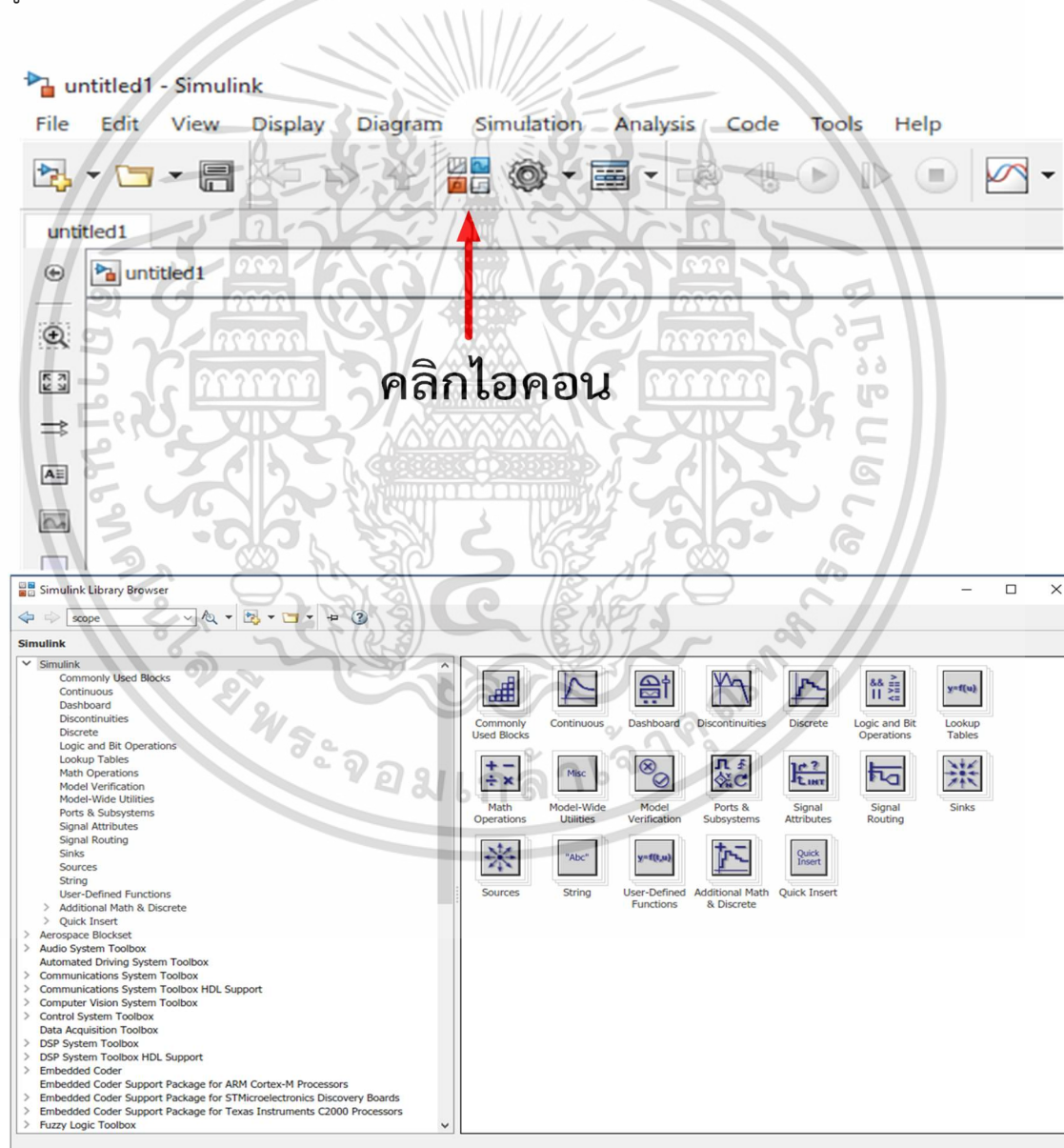
ในการสร้างโมเดลใหม่ใน Simulink ให้ทำการเลือกเปิดใช้งาน Simulink Editor โดยทำการคลิกไอคอน Blank Model บนหน้าต่าง Simulink Start Page แสดงดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 การเปิดหน้าต่าง Simulink Editor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใต้หน้าต่าง Simulink Editor ยังมีหน้าต่างย่อยสำคัญๆ อีกหน้าต่างหนึ่ง คือ หน้าต่าง Simulink Library Browser แสดงดังรูปที่ 5.6 เป็นหน้าต่างที่ MATLAB ได้บรรจุบล็อกไดอะแกรม (Block diagram) หรือบล็อกเซต (Block sets) ไว้มากมาย โดยได้จัดเป็นหมวดหมู่ต่างๆ (Toolboxes) เป็นชุดคำสั่งที่เรียกว่า “ทูลบ็อก” ที่จะนำไปเขียนเป็นโปรแกรมขึ้น ทำได้โดยคลิกที่ไอคอน ค้างไว้ลากและวางไปที่หน้าต่าง Simulink Editor แล้วเชื่อมต่อกันเป็นโมเดลด้วยเส้นเชื่อมต่อ การเปิดหน้าต่าง Simulink Library Browser ทำให้ได้คลิกที่ไอคอนคอนโทรล Library Browser บนแถบเมนูไปตอนคอลโทรล (Toolbar) ที่หน้าต่าง Simulink Editor แสดงการเปิดหน้าต่างเพื่อใช้งานแสดงดังรูปที่ 5.6



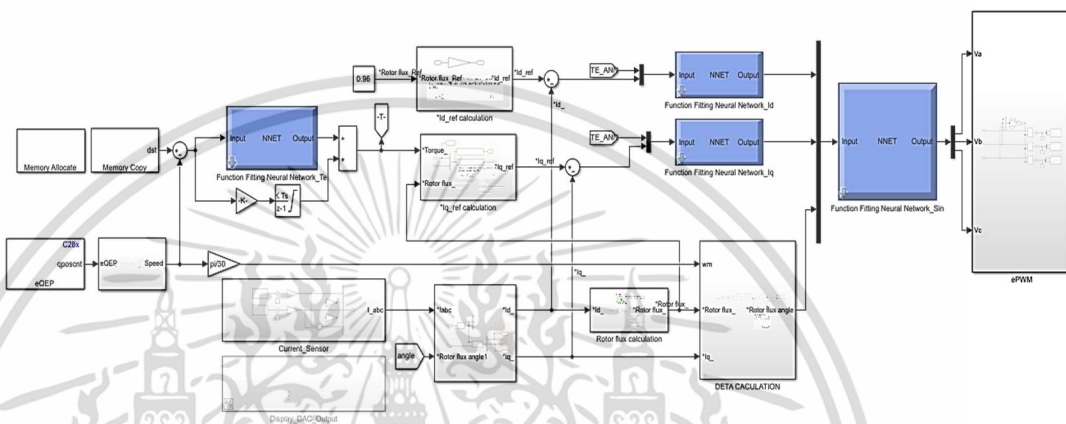
รูปที่ 5.6 การเปิดใช้งาน Simulink Library Browser

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2 การจำลองระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิค

#### โครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม

ในการจำลองโมเดลควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมได้ทำการสร้างโดยใช้ ทูลบล็อก จาก Simulink Library แสดงในรูปที่ 5.7

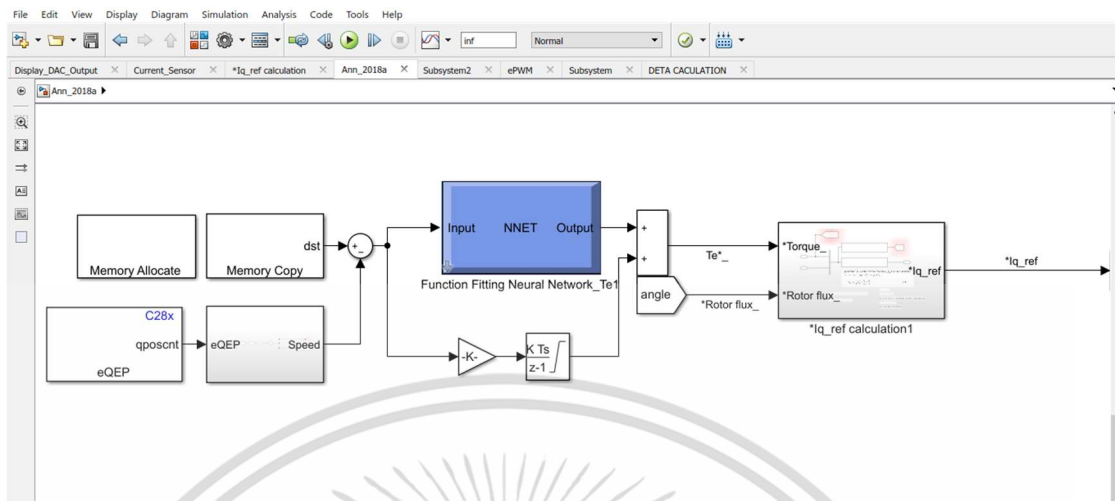


รูปที่ 5.7 การจำลองเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมจาก ทูลบล็อก Simulink Library

จากรูปเป็นโมเดลการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมที่ใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม การควบคุมความเร็วรอบแบบเวกเตอร์ทางอ้อมจะมีตัวควบคุมอยู่สามชุดด้วยกัน คือ ตัวควบคุมลูปความเร็วหนึ่งชุดและตัวควบคุมลูปควบคุมกระแสสองชุดได้ทำการออกแบบโดยใช้ทูลบล็อก จาก Simulink Library

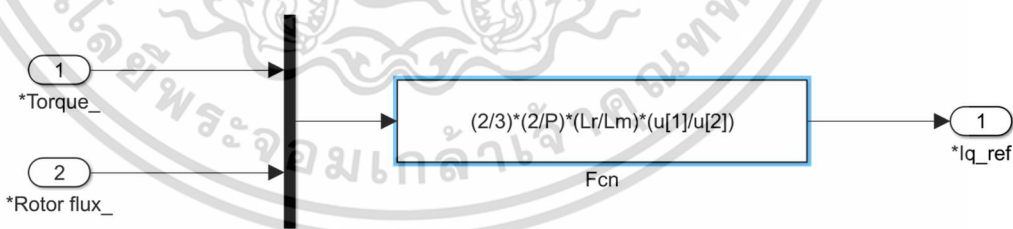
#### ลูปความเร็วรอบ

ในลูปควบคุมความเร็วการกำหนดความเร็วของมอเตอร์ จะกำหนดในรูปของความเร็วเชิงมุม ( $\omega^*$ ) ลบกับค่าความเร็วเชิงมุมที่ตรวจจับได้ ( $\omega$ ) ซึ่งจะได้ค่าความผิดพลาดส่งไปยังตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมแล้วนำไปบวกกับค่าความผิดพลาดที่ผ่านอินทิกรัล จะได้อัตราส่วนของแรงบิดอ้างอิง ( $T_e^*$ ) โดยตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมจะทำหน้าที่ควบคุมแรงบิดอ้างอิง ( $T_e^*$ ) ไม่ให้กระแส  $I_q^*$  เกินพิกัด ในส่วนของกระแส  $I_q^*$  ที่ได้จากการคำนวณมาจากสมการที่ (2-42) โดยแสดงลูปความเร็วรอบในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 การจำลองรูปความเร็วรอบจาก ทูลบล็อกร Simulink Library

จากรูปที่ 5.8 ภาพรวมของระบบมีการทำงานดังต่อไปนี้ ทำการกำหนดความเร็วของมอเตอร์จากบล็อก Memory Allocate ซึ่งกำหนดให้เป็น Speed Command จากนั้นควบคุมแบบวงปิดโดยการเปรียบเทียบกับค่าความเร็วจริงที่ตรวจจับได้จาก eQEP ได้ค่าความผิดพลาดของความเร็วออกมาเป็นเงื่อนไขให้โครงข่ายประสาทเทียมและบล็อกอินทิกรัล ซึ่งบล็อกของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถสร้างได้จากขั้นตอนสร้างบล็อกโมเดลของโครงข่ายประสาทเทียมในหัวข้อ 5.3 การออกแบบตัวควบคุมประสาทเทียมต่อไป จากนั้นนำเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมนำมาบวกกับค่าความผิดพลาดที่ผ่านการอินทิกรัล ซึ่งจะได้เป็นแรงบิดอ้างอิงเพื่อหากระแสอ้างอิงแกน  $q$  จากสมการที่ (2-42) ใช้บล็อกฟังก์ชัน Fcn ในการสร้างสมการกระแสอ้างอิงในแกน  $q$  แสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 บล็อกฟังก์ชัน Fcn สร้างสมการกระแสอ้างอิงในแกน  $q$



รูปที่ 5.10 ชุดรับสัญญาณความเร็วรอบของเอ็ดโค้ตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ eQEP ทำการรับค่าสัญญาณพัลส์จาก speed Encoder โดยจะส่งสัญญาณออกมาเป็นพัลส์แรงดันที่มีความละเอียด 1000 พัลส์/รอบ และใช้เครื่องมือ Rate Transition และดีเลย์เพื่อต้องการคำนวณสัญญาณพัลส์ในช่วงเวลาหนึ่ง จากนั้นนำมาแปลงหน่วยให้เป็น RPM โดยใช้สมการ

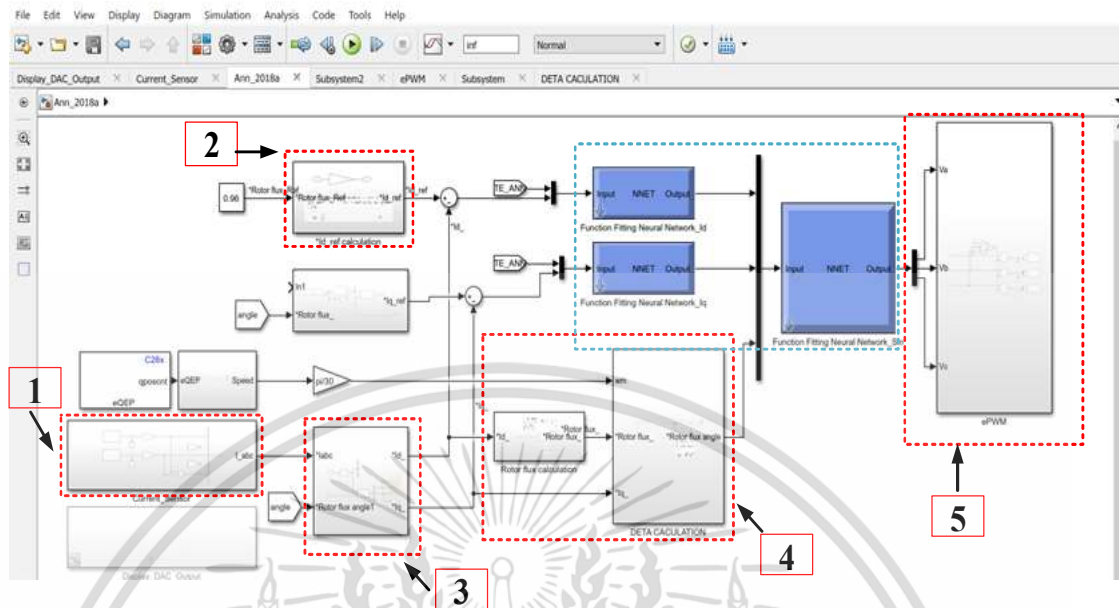
$$gain = \frac{60 \times \left( \frac{1}{\text{Rate transition Time}} \right)}{4 \times \text{Speed Encoder Resolution}}$$

### ลูบกระแส

ส่วนของลูบควบคุมกระแส จะมีการควบคุมอยู่บนแกน  $d$  และแกน  $q$  โดยมีการส่งกลับค่ากระแส  $i_a, i_b$  และ  $i_c$  จากนั้นแปลงจากปริมาณสามเฟสเป็นปริมาณสองโดยใช้การแปลงแบบคลาร์กจะได้กระแส  $i_\alpha$  และ  $i_\beta$  ขั้นตอนต่อไปแปลงจากปริมาณสองเฟสที่อยู่บนแกนหยุดนิ่งไปเป็นแกนหมุนโดยใช้รูปแบบการแปลงแบบปาร์คโดยใช้มุมในการหมุนคือ  $\theta_e$  ที่ได้จากรูปแบบการคำนวณในสมการที่ (2-45) ดังนั้นได้กระแส  $i_d$  และ  $i_q$  สำหรับการควบคุมกระแสบนแกน  $d$  และแกน  $q$

การควบคุมกระแสบนแกน  $q$  ทำได้ดังนี้คือ นำกระแส  $i_q^*$  ที่ได้จากรูปควบคุมความเร็วมาลบกับกระแส  $i_q$  จะได้ค่าความผิดพลาด  $i_{q\text{error}}$  เป็นเงื่อนไขที่หนึ่ง และนำค่าแรงบิดอ้างอิง  $T_e^*$  ที่ได้จากตัวควบคุมประสาทเทียบในลูความเร็วเป็นเงื่อนไขที่สอง ส่งไปยังตัวควบคุมแรงบิดเทียบบนแกน  $q$  ทำให้ได้กรอบอ้างอิงแกนหมุน  $q$  ( $v_q$ ) ส่วนการควบคุมกระแสบนแกน  $d$  จะกำหนดให้ค่ากระแส  $i_d^*$  เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งส่วนมากจะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่อยู่ที่พิกัดของฟลักซ์ การควบคุมกระแสบนแกน  $d$  จะนำค่ากระแส  $i_d^*$  ลบกับกระแส  $i_d$  จะได้ค่าความผิดพลาด  $i_{d\text{error}}$  เป็นเงื่อนไขที่หนึ่งและนำค่าแรงบิดอ้างอิง  $T_e^*$  ที่ได้จากตัวควบคุมประสาทเทียบในลูความเร็วเป็นเงื่อนไขที่สองส่งไปยังตัวควบคุม แรงบิดเทียบบนแกน  $d$  ทำให้ได้กรอบอ้างอิงแกนหมุน  $d$  ( $v_d$ )

ในลูกระแสทั้งบนแกน  $d$  และแกน  $q$  ที่ควบคุมด้วยโครงข่ายประสาทเทียบจะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไม่ให้เกิดการปรับเกินขนาด (Over modulation) จากกรอบอ้างอิงแกนหมุน  $q$  และกรอบอ้างอิงแกนหมุน  $d$  จะถูกแปลงจากปริมาณสองเฟสที่อยู่บนแกนหมุนไปเป็นปริมาณสองเฟสที่อยู่บนแกนหยุดนิ่งโดยมีมุมในการหมุน ( $\theta_e$ ) เป็นตัวกำหนดมุมเฟสจากนั้นแปลงปริมาณสองเฟสที่อยู่บนแกนหยุดนิ่งเป็นปริมาณสามเฟสโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียบทำให้ได้แรงดัน  $V_{sa}, V_{sb}$  และ  $V_{sc}$  ต่อมานำสัญญาณแรงดันทั้งสามเฟสถูกนำไปสร้างเป็นสัญญาณควบคุมในวงจร PWM เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อเป็นตัวสวิตซ์การทำงานของ IGBT ทั้ง 6 ตัวของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสเพื่อขับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยจะแสดงในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 การจำลองรูปกระแสจาก ทูลบล็อก Simulink Library

จากรูปที่ 5.11 ภาพรวมของระบบในรูปกระแสซึ่งจะแบ่งเป็น 5 ส่วน ในส่วนของการควบคุมกระแสในแกน  $d$  แกน  $q$  ที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมจะอธิบายในหัวข้อ 5.3 การออกแบบตัวควบคุมประสาทเทียม

ส่วนที่ 1. ชุดตรวจจับกระแส (Current Sensor)

ส่วนที่ 2. ชุดกระแสอ้างอิงแกน  $d$

ส่วนที่ 3 ชุดแปลงกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงสองเฟส  $dq$

ส่วนที่ 4 ชุดการคำนวณมุมหมุนที่ความเร็วเชิงโรตัส ( $\theta_e$ )

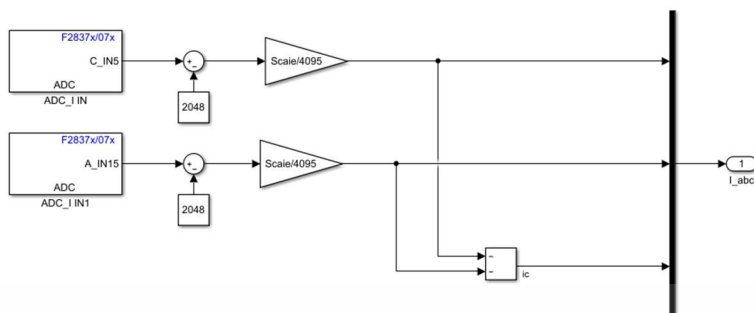
ส่วนที่ 5 ชุดแปลงสัญญาณสเปซเวกเตอร์และเปรียบเทียบกับสัญญาณขับสวิตช์ PWM

โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ชุดตรวจจับกระแส (Current Sensor)

สำหรับชุดตรวจจับกระแสจะเป็นการใช้ทูลบล็อก ADC ในการรับสัญญาณอนาล็อกจากไมโครคอนโทรลเลอร์ 3.3 V แปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลค่าความละเอียดอยู่ที่ 12 บิตหรือ 4095 ค่า เนื่องจากมีการออกแบบใช้สัญญาณทางด้านอนาล็อก เพื่อให้ได้ขนาดเริ่มต้นที่ศูนย์ของสัญญาณไซน์อยู่ที่ 1.65 V ดังนั้นในส่วนของดิจิทัลทำการออกแบบใช้ตกลงมา แล้วนำไปลบ 2048 จากนั้นนำไป calibrate เพื่อหาอัตราส่วนที่เทียบเท่ากับกระแสจริง สำหรับตัวตรวจจับกระแสในงานวิจัยนี้จะใช้เป็น 2 ตัวเพื่อลดต้นทุน โดยการนำกระแสเฟสที่ตรวจจับจาก ADC เฟส A และ เฟส B มาลบกันได้เป็นกระแสเฟส C แสดงในรูปที่ 5.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 ชุด ADC ตรวจสอบกระแสแปลงอนาล็อกเป็นดิจิทัล

#### - ชุดกระแสอ้างอิงแกน $d$

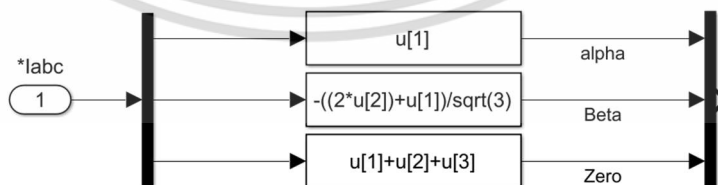
สำหรับในส่วนของกระแสอ้างอิงแกน  $d$  จะได้จากโรเตอร์ฟลักซ์อ้างอิงซึ่งกำหนดไว้เป็น 0.62wb จะได้  $i_d^* = \left( \frac{\lambda r^*}{L_m} \right)$  สามารถเขียนเป็นบล็อกฟังก์ชัน Gian ในการสร้างสมการกระแสอ้างอิงในแกน  $d$  แสดงในรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 บล็อกฟังก์ชัน Gian สร้างสมการกระแสอ้างอิงในแกน  $d$

#### - ชุดแปลงกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงสองเฟส $dq$

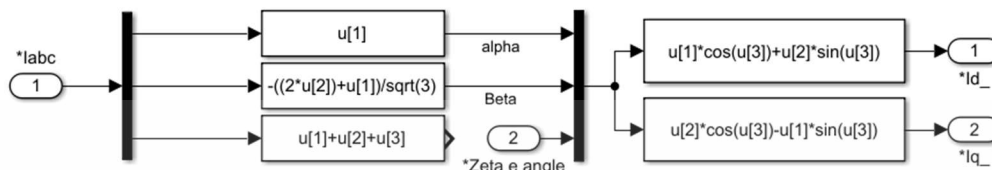
สำหรับการแปลงปริมาณกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นปริมาณกรอบอ้างอิงสองเฟส  $dq$  ในส่วนนี้จะเป็นการนำกระแสที่ตรวจจับได้จาก ADC แปลงปริมาณกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นปริมาณกรอบอ้างอิงสองเฟส  $dq$  ในส่วนแรกจะใช้เทคนิคการแปลงแบบคลาร์กจากสมการที่ (2-22) จะได้กระแส  $i_\alpha$  และ  $i_\beta$  แสดงดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 ชุดบล็อกฟังก์ชัน Fcn การแปลงแบบคลาร์ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

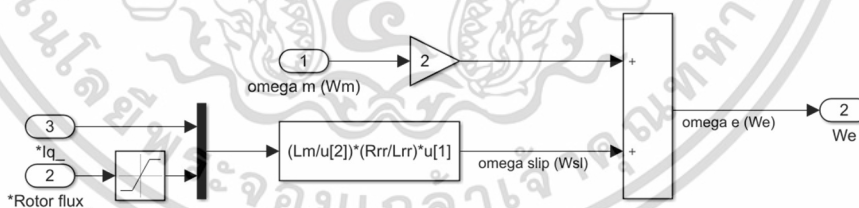
ขั้นตอนต่อไปแปลงจากปริมาณสองเฟสที่อยู่บนแกนหยุดนิ่งไปเป็นแกนหมุนโดยใช้รูปแบบการแปลงแบบปาร์คโดยใช้มุมในการหมุนคือ  $\theta_e$  ที่ได้จากรูปแบบการคำนวณ ในสมการที่ (2-71) แสดงในรูปที่ 5.15 ดังนั้นจึงได้กระแส  $i_d$  และ  $i_q$  สำหรับการควบคุมกระแสบนแกน  $d$  และ แกน  $q$



รูปที่ 5.15 ชุดบล็อกฟังก์ชัน Fcn การแปลงแบบคลาร์กและปาร์ค

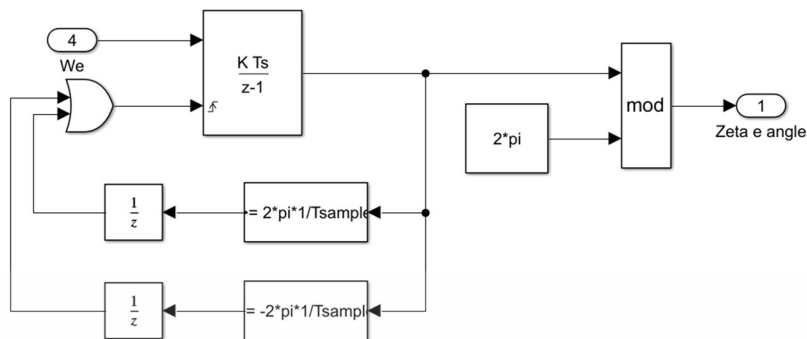
#### - ชุดการคำนวณมุมการหมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนัส ( $\theta_e$ )

สำหรับการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมใช้มุมในการหมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนัส ( $\theta_e$ ) มุมดังกล่าวสำหรับแปลงแกน  $abc$  ให้อยู่บน แกน  $dq$  และยัง แปลงกลับจากแกน  $dq$  ให้อยู่บนแกน  $abc$  ของระบบ การควบคุมดังกล่าวก็จะใช้มุมของการแปลงกลับหมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนัส เหมือนเดิม โดยในการคำนวณมุมของการหมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนัส สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-71) การคำนวณค่ามุมที่ความเร็วเชิงโคโรนัสจะใช้ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ ซึ่งได้ตรวจจับจากเอ็นโค้ดเดอร์ จะมีการส่งค่าความเร็วรอบทางกลเข้ามาแล้วจะถูกแปลงเป็นค่าความเร็วทางไฟฟ้า จากนั้นนำมาบวกกับ ความเร็วเชิงมุมของสลิป ในสมการที่ (2-70) จะได้ค่าประมาณของสลิป ซึ่งเห็นว่ามีการใช้ค่าคงที่ทางเวลาฝั่งขดลวดโรเตอร์ซึ่งต้องใช้ค่าพารามิเตอร์  $L_m$ ,  $R_{rr}$  และ  $L_{rr}$  ในการคำนวณ โดยชุดบล็อกฟังก์ชัน Fcn คำนวณ  $\omega_e$  แสดงได้ดังรูปต่อไป



รูปที่ 5.16 ชุดบล็อกฟังก์ชัน Fcn คำนวณ  $\omega_e$

สำหรับค่าของมุมเฟสที่ส่งออกไปจะให้รีเซ็ตสัญญาณให้เริ่มใหม่ ทุกๆ มุมเฟสที่ค่า  $2\pi$  เรเดียนหรือครบหนึ่งคาบ ข้อควรระวังคือควรทำตัวรีเซ็ตอินทิกรัล (integral) มุมเฟสไว้ เพื่อป้องกันการหยุดทำงานกระทันหันในกรณีหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ ในส่วนของอินทิกรัลเก็บค่าจนเกินลิมิต ดังแสดงทูลบล็อกในรูปที่ 5.17

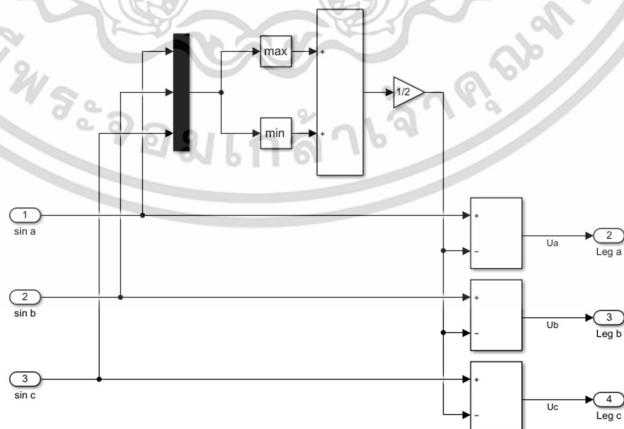


รูปที่ 5.17 ชุดรีเซตสัญญาณ  $\omega_c$  ที่  $2\pi$

ฟังก์ชันโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับสร้างกรอบอ้างอิงแกมมา  $dq$  และฟังก์ชันการสร้างสัญญาณไซน์สามเฟสจะอธิบายรายละเอียดขั้นตอนสร้างบล็อกโมเดลของโครงข่ายประสาทเทียมและเงื่อนไขการสร้างให้หัวข้อ 5.3 การออกแบบตัวควบคุมประสาทเทียมถัดไป

#### - ชุดแปลงสัญญาณสเปซเวกเตอร์

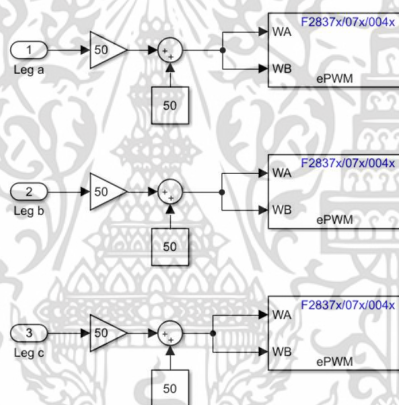
จากเทคนิคสเปซเวกเตอร์จะมีส่วนช่วยในเรื่องลดฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแส รวมถึงเพิ่มค่า Modulation index ได้ 15% การเกิด Over Modulate โดยขั้นตอนการทำงานจะรับค่าสัญญาณไซน์อ้างอิงที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม และนำค่าสูงสุดและต่ำสุดของสัญญาณไซน์มาบวกกันและคูณด้วย 0.5 จากนั้นนำไปลบกับสัญญาณไซน์อ้างอิงที่โครงข่ายประสาทเทียมสร้างขึ้นมา จะได้สัญญาณสเปซเวกเตอร์ที่ไปมอดูเลชัน 3 สัญญาณ แสดงทูลบล็อกการสร้างดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 ชุดแปลงสัญญาณสเปซเวกเตอร์

### - ชุดเปรียบเทียบสัญญาณขับสวิตช์ PWM

หลังจากได้สัญญาณสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน 3 สัญญาณแล้ว สัญญาณดังกล่าวจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม โดยใช้ทูลบล็อกฟังก์ชัน ePWM ไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 ที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ จะรับค่าสัญญาณมอดูเลชันเป็น Percentage หรือค่าของสัญญาณต้องอยู่ระหว่าง 0 ถึง 100 แต่เนื่องสัญญาณมอดูเลชันที่รับมามีค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1 ต้องทำการออฟเซตสัญญาณขึ้นโดยคูณกับ 50 แล้วบวกด้วย 50 เพื่อให้สัญญาณดังกล่าวมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 100 จากนั้นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับ สัญญาณคล้ายสามเหลี่ยม จะได้สัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์แต่ละตัว ส่งออกสู่วงจรรับส่งสัญญาณ PWM โดยทำการแยกสัญญาณผ่าน Not gat ให้สัญญาณตรงข้ามกันของสัญญาณ Leg  $a, b, c$  ดังนั้นได้สัญญาณ PWM 6 สัญญาณไปขับสวิตช์ IGBT ทั้ง 6 ตัวของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส โดยแสดงทูลบล็อกการสร้างต่อไปนี้



รูปที่ 5.19 ชุด ePWM ขับสัญญาณ PWM

### 5.3 การออกแบบตัวควบคุมประสาทเทียม

จากโครงสร้างพื้นฐานของหลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ ในส่วนของตัวควบคุมได้มีการออกแบบตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมอยู่ 3 ส่วน ในรูปควบคุมความเร็วจะเป็นการแสดงขั้นตอนสร้างบล็อกโมเดลของโครงข่ายประสาทเทียมด้วยโปรแกรม MATLAB/ Simulink ส่วนรูปควบคุมกระแสและสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงสามเฟส จะแสดงให้เห็นโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่มีการฝึกสอนแล้วโดยแสดงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

#### 5.3.1 การออกแบบตัวควบคุมของรูปควบคุมความเร็ว

หลักการทำงานของการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีการควบคุมแบบฟีดฟอร์เวิร์ดที่พบว่าการควบคุมความเร็วจะถูกควบคุมอยู่บนแกน  $q$  เท่านั้นซึ่งมีความสอดคล้องกับสมการแรงบิดของมอเตอร์ในสมการที่ (2-68) โดยที่แกน  $d$  มีหน้าที่ควบคุมปริมาณสนามแม่เหล็กเท่านั้น ดังนั้นการควบคุมแรงบิดทางไฟฟ้าจึงขึ้นอยู่กับแกน  $q$  เพียงอย่างเดียว ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมจะเป็นการทำนายปริมาณแรงบิดอ้างอิงที่ต้องการบนแกน  $q$

การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมเลือกใช้แบบโครงข่ายไปข้างหน้า (feed-forward network) สถาปัตยกรรมมีการเชื่อมต่อระหว่างชั้นเป็นแบบทิศทางเดียว คือมีทิศทางจากอินพุตไปยังเอาต์พุต ซึ่งเป็นชนิดโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi-Layer) โดยการฝึกสอนแบบซูปเปอร์ไวส์ (Supervised Training) ที่มีการรู้แบบแพร่กลับ (Backpropagation Learning)

กำหนดเงื่อนไขอินพุตคือความผิดพลาดความเร็วรอบและเงื่อนไขเอาต์พุตคือแรงบิดอ้างอิงโดยแสดงข้อมูลในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ต้องการใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียม

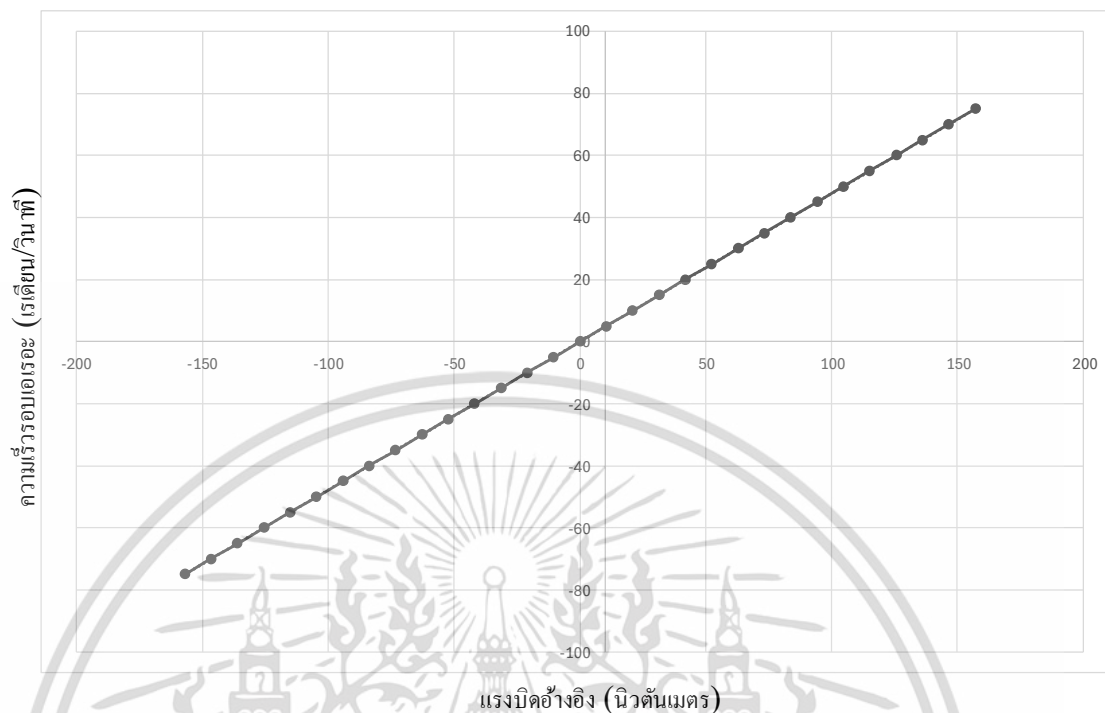
ข้อมูลอินพุต	ข้อมูลเอาต์พุต
ความเร็วรอบเอเรอะ (red)	แรงบิดอ้างอิง (N.m)
157.05	75
146.58	70
136.11	65
125.64	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

115.17	55
104.7	50
94.23	45
83.76	40
73.29	35
62.82	30
52.35	25
41.88	20
31.41	15
20.94	10
10.47	5
0	0
-10.47	-5
-20.94	-10
-31.41	-15
-41.88	-20
-52.35	-25
-62.82	-30
-73.29	-35
-83.76	-40
-94.23	-45
-104.7	-50
-115.17	-55
-125.64	-60
-136.11	-65
-146.58	-70
-157.05	-75

เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของโครงข่ายจะได้ดังรูปที่ 5.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



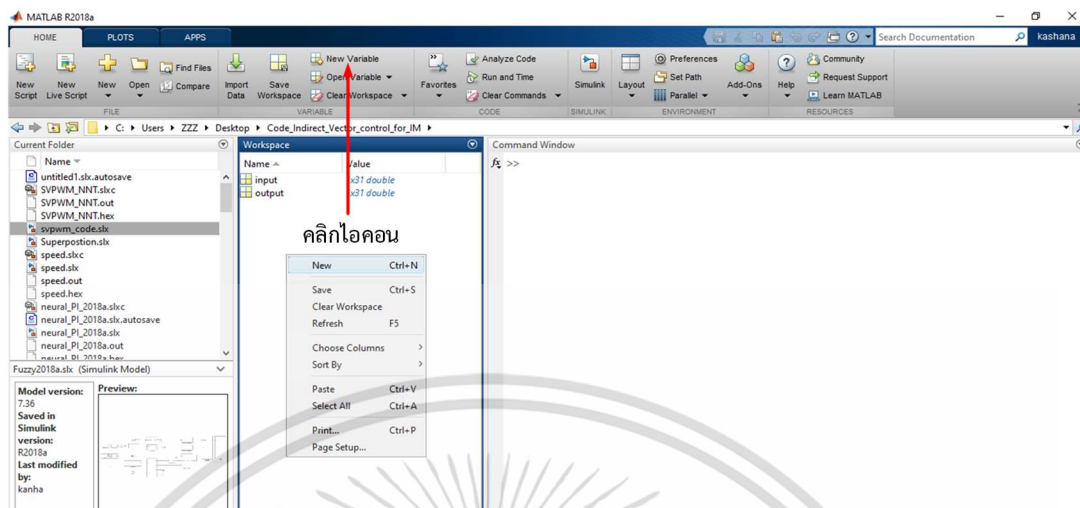
รูปที่ 5.20 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ต้องการใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียม

จากตารางที่ 5.1 พิจารณาข้อมูลอินพุตค่าผิดพลาดความเร็วเชิงมุมเป็นเงื่อนไขในการฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียม เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ดังนั้นจึงนำความเร็วรอบจริงมาลบกับความเร็วรอบที่ต้องการได้เป็นค่าผิดพลาดของความเร็วรอบ จากทฤษฎีการควบคุมความเร็วรอบจะขึ้นอยู่กับแกน  $q$  จากสมการที่ (2-68)  $iq^*$  จะขึ้นอยู่กับ  $T_c^*$  ดังนั้นเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมจะได้เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของ  $T_c^*$  เมื่อเทียบกับเปอร์เซ็นต์ของแรงบิดจริง ดังนั้นเงื่อนไขในการสอนของโครงข่ายประสาทเทียมในรูปควบคุมความเร็วรอบจะได้เป็นค่าผิดพลาดความเร็วเชิงมุมและแรงบิดอ้างอิง

เมื่อได้เงื่อนไขโครงข่ายประสาทเทียมแล้วทำการสร้างบล็อกโมเดลของโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้โปรแกรม MATLAB/ Simulink มี 7 ขั้นตอนดังนี้

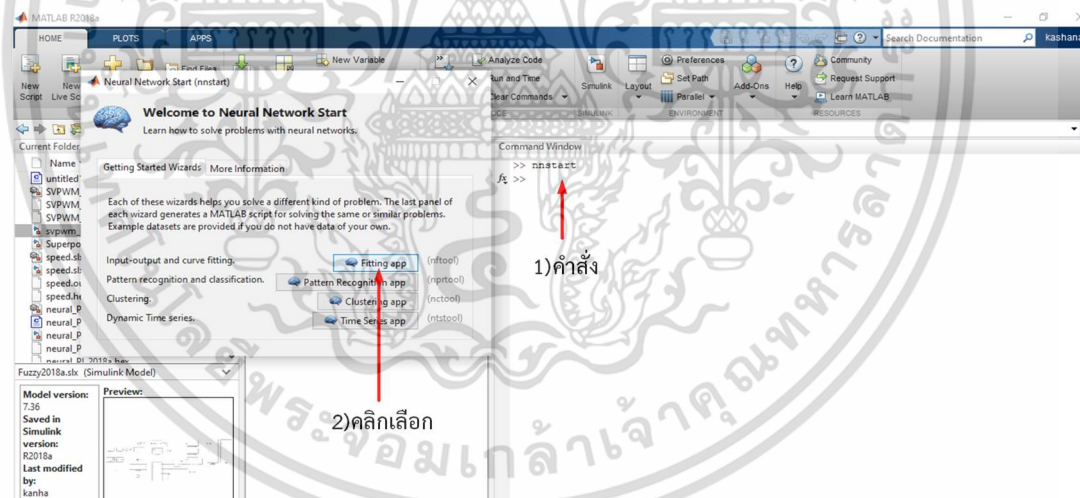
### ขั้นตอนสร้างบล็อกโมเดลของโครงข่ายประสาทเทียม

**ขั้นตอนที่ 1** เมื่อทำการเปิดหน้าต่าง Simulink Start Page จากนั้นเพิ่มตัวแปรไปยัง Workspace โดยการคลิกที่ New Variable หรือคลิกขวาที่เมาท์แล้วเลือก New โดยจะสร้างตัวแปรสองตัวนั้นคือ input และ output จากนั้นนำข้อมูลจากตารางที่ 5.1 มาใส่ในตัวแปร แสดงในรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 สร้างตัวแปรข้อมูลโครงข่ายสำหรับการฝึกสอน

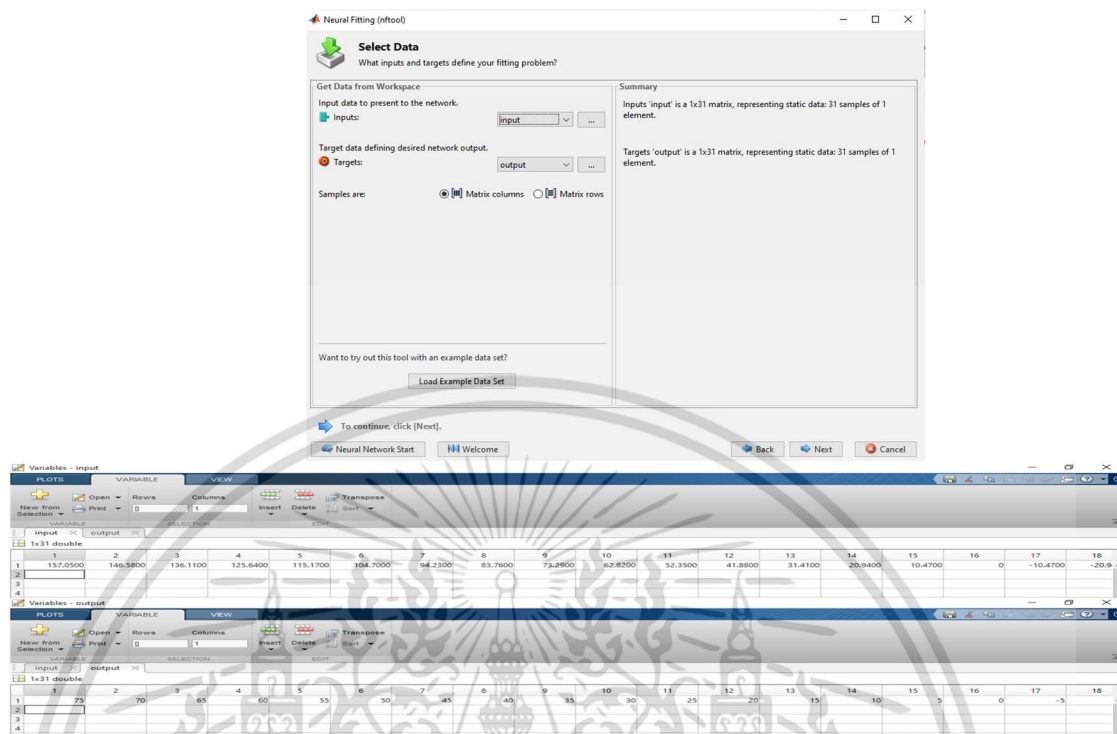
ขั้นตอนที่ 2 ใช้คำสั่ง “nnstart” เพื่อเปิดฟังก์ชันเริ่มโครงข่ายประสาทเทียม Neural Network Start  
คลิกเลือก Fitting app จากนั้นจะเข้าสู่หน้า Neural Fitting และให้กด Next



รูปที่ 5.22 เริ่มต้นใช้งานฟังก์ชันเริ่มโครงข่ายประสาทเทียม

ขั้นตอนที่ 3 เลือกข้อมูลที่จะสร้างโมเดลของโครงข่ายประสาทเทียมเลือกข้อมูลที่สร้างไว้ในขั้นตอนที่ 1  
ซึ่ง Inputs จะใส่เป็นตัวแปร input ในส่วนของ Targets จะใส่เป็นตัวแปร output และส่วน samples  
ให้เลือกเป็น Matrix columns เนื่องจากข้อมูลตัวแปรจัดอยู่ในรูปแบบแถวแนวนอนจากนั้นให้คลิก  
Next

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 เลือกข้อมูลและตัวแปรที่สร้างโมเดลของโครงข่ายประสาทเทียม

ขั้นตอนที่ 4 เป็นการตรวจสอบข้อมูลและทดสอบค่าข้อมูล โดยค่า Training 70% Validation การตรวจสอบชุดข้อมูล 15% Testing 15% จากนั้นคลิก Next

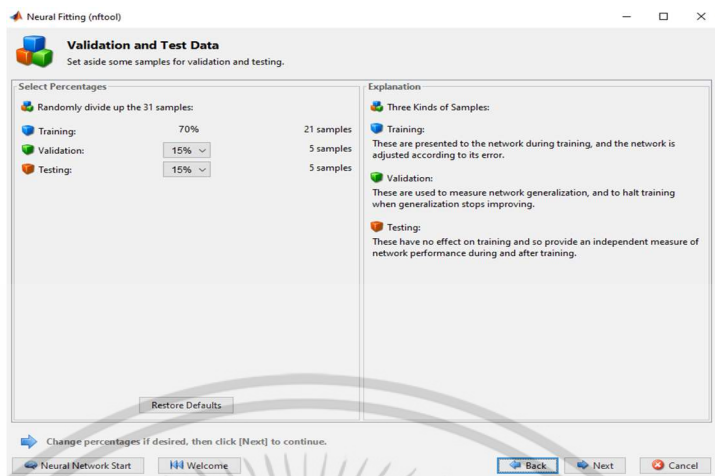
คุณลักษณะการแบ่งข้อมูลตามที่คุณอธิบายนั้นมีลักษณะดังนี้

Training Set (70%): เป็นเซตข้อมูลที่ใช้สำหรับการฝึกโมเดล neural network โดยมีขนาด 70% ของข้อมูลทั้งหมดใช้ในการปรับพารามิเตอร์ของโมเดลเช่น น้ำหนักของเซลล์โครงข่ายประสาท โดยใช้ gradient descent

Validation Set (15%): เป็นเซตข้อมูลที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลในระหว่างการฝึก ช่วยในการตรวจสอบประสิทธิภาพของโมเดลบนข้อมูลที่ไม่ได้ใช้ในการฝึก และเป็นสิ่งสำคัญในการตรวจจับ overfitting (การเกิดโมเดลที่มีประสิทธิภาพสูงในข้อมูลฝึก แต่ทำงานไม่ดีในข้อมูลที่ไม่ได้ใช้ในการฝึก)

Test Set (15%): เป็นเซตข้อมูลที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพสุดท้ายของโมเดลหลังจากที่ฝึกและปรับแต่งพารามิเตอร์แล้วช่วยในการประเมินความสามารถของโมเดลในการเทียบกับข้อมูลที่ไม่เคยเห็นมาก่อน ซึ่งเป็นการประเมินที่เป็นอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 การตรวจสอบและทดสอบข้อมูล Training , Validation และ Testing

จะเป็นการกำหนดโหนดของนิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) โดยกำหนดที่ 10 โหนด ในชั้นซ่อน จากนั้นคลิก Next แสดงในรูปที่ 5.25 โดยโครงข่ายมาตรฐานที่ใช้สำหรับการปรับฟังก์ชันคือ

### 1. โครงสร้างของโครงข่าย

- โครงข่าย feedforward สองชั้น: หมายถึงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทที่ข้อมูลไหลจากชั้นนำเข้าผ่านชั้นซ่อนไปยังชั้นส่งออกโดยไม่มีการวนรอบหรือลูป

- ฟังก์ชันการถ่ายโอน sigmoid ในชั้นซ่อน: ฟังก์ชัน sigmoid ถูกใช้เป็นฟังก์ชันการกระตุ้นในชั้นซ่อนของโครงข่ายประสาทโดยทั่วไป มันช่วยในการนำข้อมูลความไม่เชิงเส้นเข้าสู่โครงข่าย เพื่อให้โครงข่ายเรียนรู้ความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนในข้อมูล

- ฟังก์ชันการถ่ายโอนเชิงเส้นในชั้นส่งออก: ชั้นส่งออกทั่วไปใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอนเชิงเส้น ซึ่งหมายความว่าผลลัพธ์ของโครงข่ายคือการผสมเชิงเส้นของข้อมูลจากชั้นก่อนหน้า นี้เหมาะสำหรับงานที่ผลลัพธ์เป็นค่าต่อเนื่องหรือการแปลงเชิงเส้นของคุณสมบัติข้อมูล

### 2. จำนวนเซลล์เครื่องปรับปรุง:

- โครงข่ายถูกกำหนดค่าเริ่มต้นด้วยจำนวนเซลล์ซ่อนที่ 10 เซลล์ จำนวนเซลล์ในชั้นซ่อนกำหนดความซับซ้อนของฟังก์ชันที่โครงข่ายสามารถประมาณค่าได้

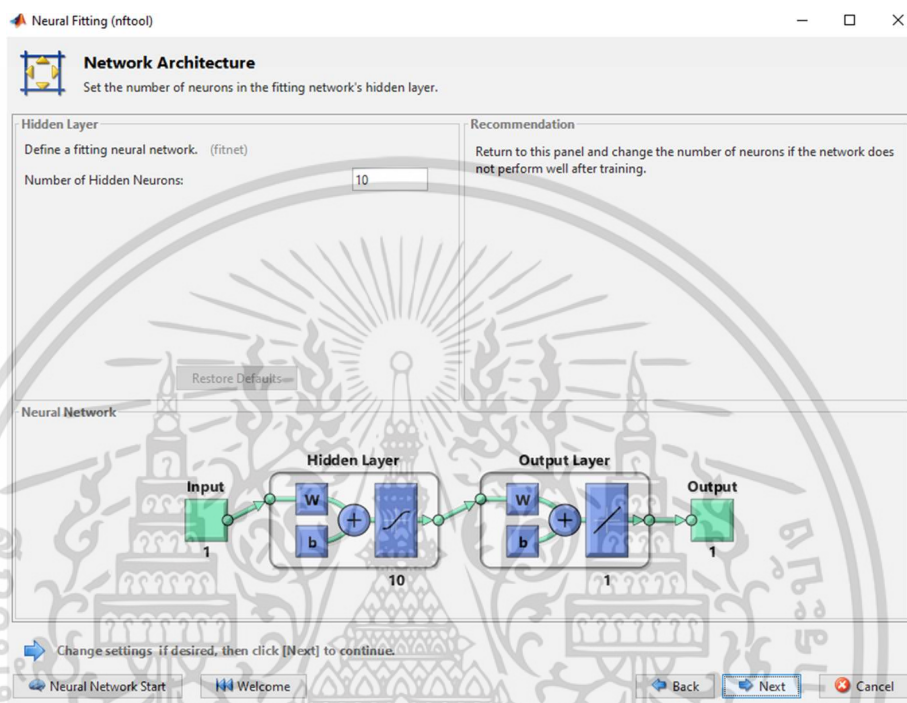
- ถ้าประสิทธิภาพในการฝึกของโครงข่ายแย่ อาจต้องพิจารณาเพิ่มจำนวนเซลล์ในชั้นซ่อนเพื่อให้โครงข่ายสามารถจับความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนของข้อมูลได้มากขึ้น

### 3. การปรับจำนวนเซลล์เครื่องปรับปรุง:

- การปรับเปลี่ยนจำนวนเซลล์ในชั้นซ่อนเป็นหนึ่งในวิธีที่สามารถพัฒนาประสิทธิภาพของโครงข่ายได้ ซึ่งจะช่วยให้โครงข่ายสามารถรับรู้รูปแบบที่ซับซ้อนของข้อมูลได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

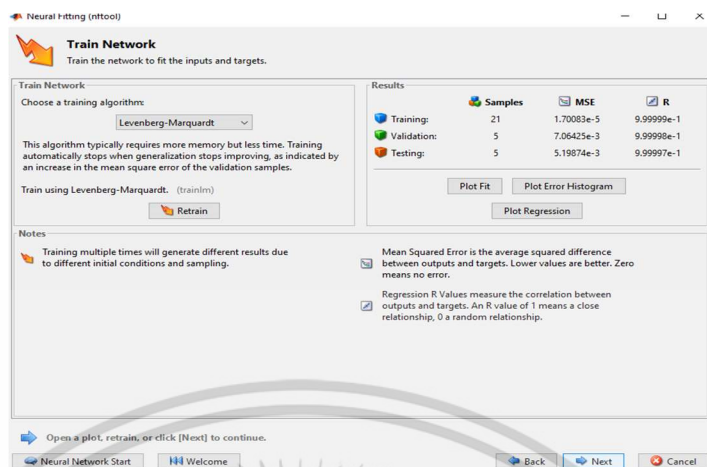
- การเพิ่มจำนวนเซลล์ซ่อนควรทำอย่างระมัดระวังเพื่อป้องกันการเกิด overfitting ควรตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากชุดการทดสอบเพื่อให้แน่ใจว่าโมเดลมีความสามารถในการใช้งานกับข้อมูลที่ไม่เคยมีมาก่อนและมีประสิทธิภาพที่ดี



รูปที่ 5.25 กำหนดโหนดของนิวรอนในชั้นซ่อน

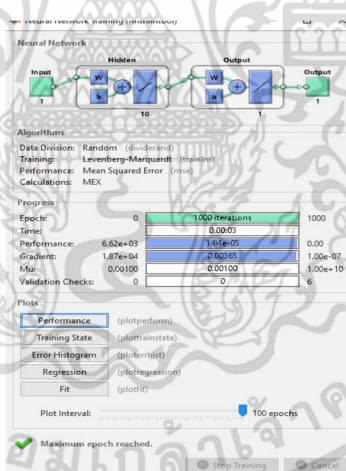
ขั้นตอนที่ 5 จะแสดงหน้าต่างการฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียม โดยการคลิกเลือก Train โดยอัลกอริทึมการฝึกสอนเลือกใช้เป็นแบบ เลเวนเบิร์ก-มาร์ควาร์ด โดยอัลกอริทึมนี้ใช้หน่วยความจำมากขึ้น แต่แลกกับการใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยลงและจะหยุดอัตโนมัติเมื่อมีการปรับปรุงค่าผิดพลาดกำลังสองที่เหมาะสมในส่วนผลของการฝึกสอน

แสดงค่าเฉลี่ยผลต่างยกกำลังสอง (Mean Squared Error) หรือ (MSE) คือผลต่างระหว่างเอาต์พุตที่ทำนายและเอาต์พุตจริง ซึ่ง MSE จะไม่ติดลบและจะมีค่าน้อยที่สุดคือ 0 ต่อมาค่าความถดถอยเส้นตรง Linear Regression (R) คือการนำข้อมูลมาหาความสัมพันธ์เส้นตรงยิ่งค่าเข้าใกล้ 1 หรือ -1 จะบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ทำการฝึกสอนว่ามีประสิทธิภาพดี ถ้าค่าความถดถอยเส้นตรงเข้าใกล้ 0 นั้นบ่งบอกถึงความไม่สัมพันธ์ของข้อมูล จากนั้นคลิก Next



รูปที่ 5.26 Neural Network Training การฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียม

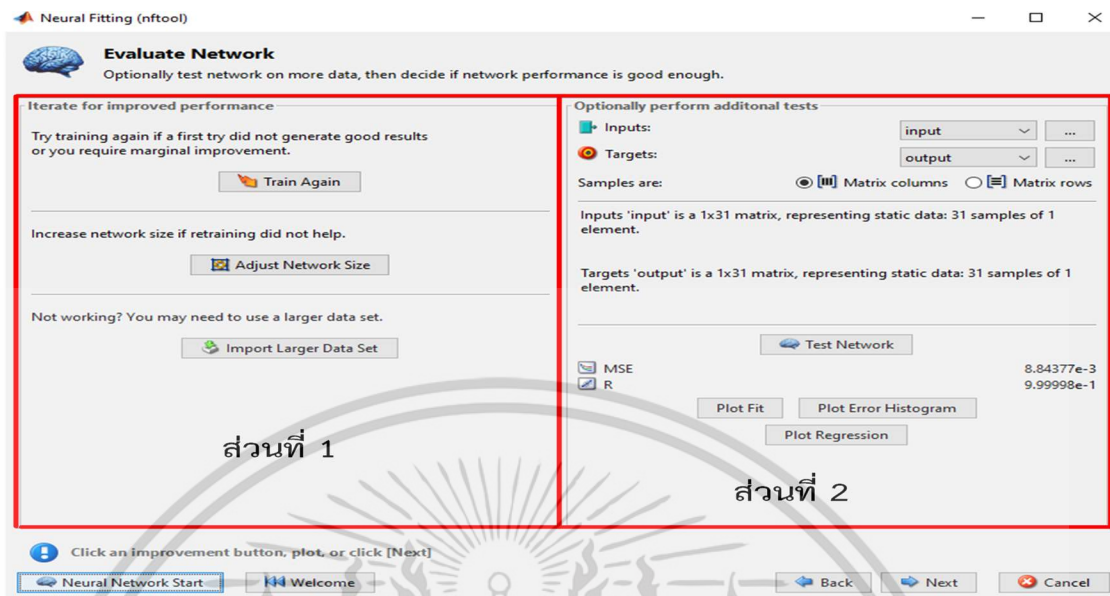
เมื่อคลิก คำสั่ง Train แล้วจะมีหน้าต่าง Neural Network Training หน้าต่างนี้จะแสดงโครงสร้างที่ใช้ในการสอน รายละเอียดอัลกอริทึมในการฝึกสอน, ความก้าวหน้าการทำงานของโครงข่าย และพล็อตกราฟของโครงข่าย



รูปที่ 5.27 รายละเอียดอัลกอริทึมในการฝึกสอน

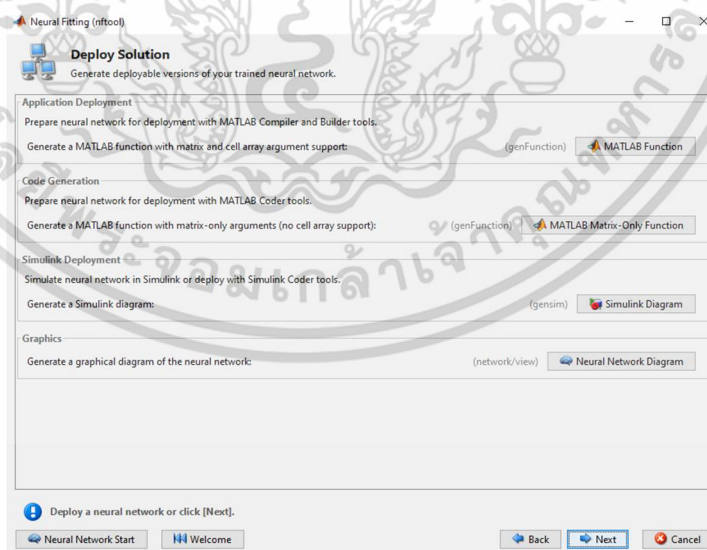
ขั้นตอนที่ 6 จะแสดงหน้าต่าง Evaluate Network โดยส่วนที่ 1 จะเป็นการประเมินผลการฝึกสอน หรือทำการฝึกสอนซ้ำเพื่อประสิทธิภาพที่ดีขึ้นโดยใช้การฝึกสอนแบบเดิมเมื่อคลิก Train Again จะกลับไปขั้นตอนที่ 5 ส่วนที่ 2 จะเป็นเลือกทำการทดสอบเพิ่มเติมขั้นตอนนี้จะกลับไปสู่กระบวนการขั้นตอนที่ 3 และขั้นตอนที่ 5 หากไม่ประสงค์ทำทั้งสองส่วนนี้สามารถคลิก Next หรือทำเสร็จทั้งสองส่วนนี้ให้คลิก Next เพื่อไปขั้นตอนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.28 ประเมินโครงข่าย (Evaluate Network)

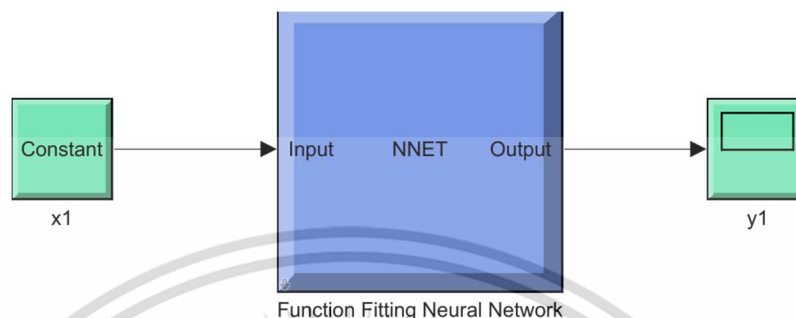
ขั้นตอนที่ 7 จะแสดง Deploy solution ในส่วนนี้จะเป็นการนำโครงข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้ในรูปแบบต่างๆ เช่น แอปพลิเคชันใน MATLAB ฟังก์ชัน, สร้างโค้ดเมทริกซ์ฟังก์ชันและบล็อกโมเดลไดอะแกรมจำลอง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เป็นบล็อกไดอะแกรมจำลองเพื่อที่จะไปประยุกต์ใช้ในหน้าต่าง Simulink Editor



รูปที่ 5.29 Deploy solution

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคลิก Simulink Diagram ได้เป็นบล็อกโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้งานแสดงในรูปที่ 5.30 จากนั้นนำไปเชื่อมต่อกับรูปควบคุมความเร็ว ในรูปที่ 5.8

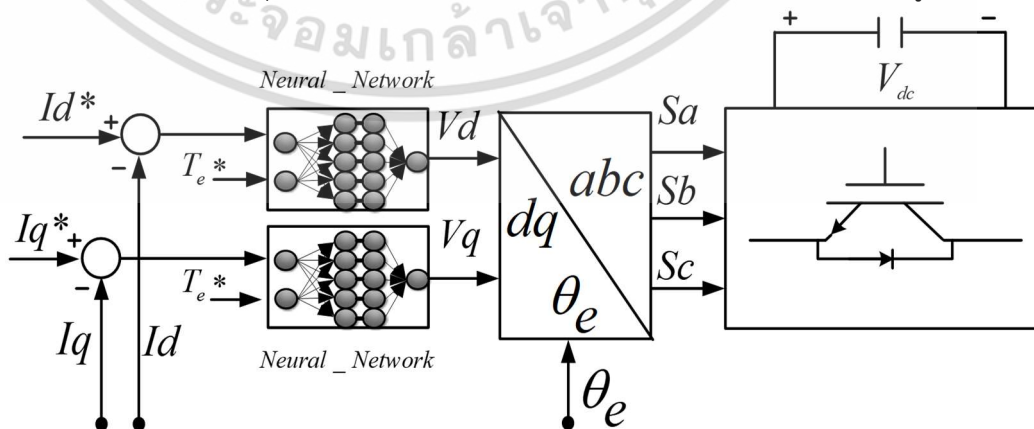


รูปที่ 5.30 Simulink Diagram

### 5.3.2 การออกแบบตัวควบคุมของรูปควบคุมกระแส

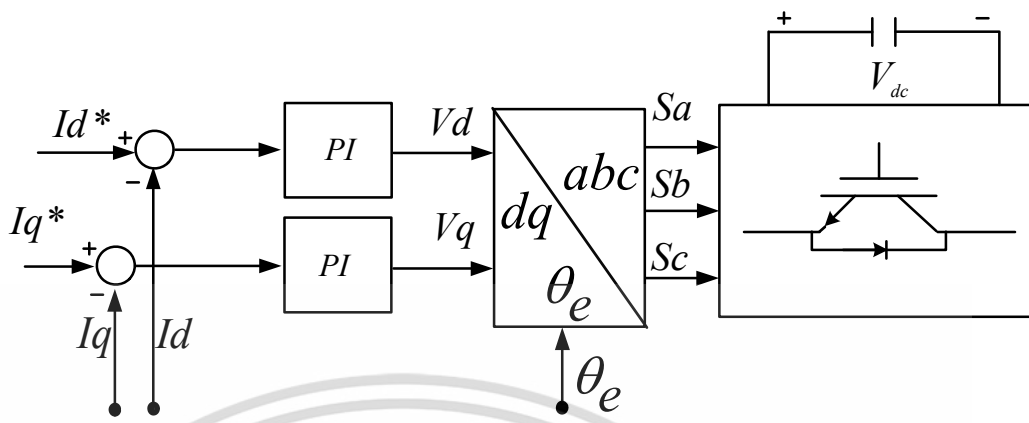
การควบคุมการทำงานของรูปควบคุมกระแสจะใช้ตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมอยู่สองชุดด้วยกัน โดยที่ชุดแรกจะควบคุมกระแส  $i_d$  และชุดที่สองจะควบคุมกระแส  $i_q$  ตัวควบคุมกระแสทั้งบนแกน  $d$  และแกน  $q$  จะมีค่าเงื่อนไขอินพุตไม่เหมือนกันจึงออกแบบตัวควบคุมกระแสบนแกน  $d$  และบนแกน  $q$  ต่างกัน

การออกแบบโครงข่ายประสาทในรูปควบคุมกระแสจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ส่วนที่ 1 กระแสแกน  $d$  จะมีเงื่อนไขอินพุตอยู่ 2 เงื่อนไข คือความผิดพลาดของกระแสบนแกน  $d$  และแรงบิดอ้างอิง ในส่วนที่ 2 กระแสที่แกน  $q$  จะมีเงื่อนไขอินพุตอยู่ 2 เงื่อนไข คือความผิดพลาดของกระแสบนแกน  $q$  และแรงบิดอ้างอิง โดยเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมที่แกน  $q$  จะได้เป็นกรอบอ้างอิงแกนหมุน  $d$  และ เอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมที่แกน  $d$  จะได้เป็นกรอบอ้างอิงแกนหมุน  $d$  กรอบอ้างอิงแกน  $d$  โดยการควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมที่ควบคุมกระแสบนแกน  $d$  และ  $q$  จะถูกใช้เปรียบเทียบกับระบบควบคุมสัดส่วน-ปริพันธ์ (PI controller) โดยแสดงไดอะแกรมดังรูปที่ 5.31



(ก) การควบคุมรูปกระแสโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

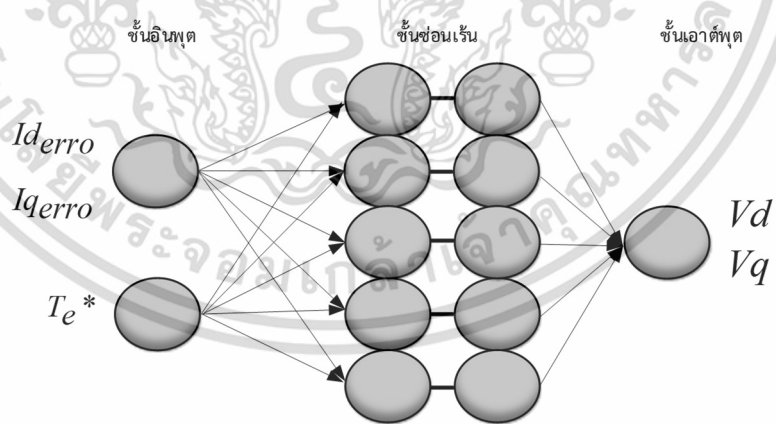
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) การควบคุมลูปกระแสโดยใช้ระบบควบคุมสัดส่วน-ปริพันธ์ (PI controller)

รูปที่ 5.31 ตัวควบคุมลูปกระแสของเวกเตอร์ทางอ้อม

โครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยนี้เลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบโครงข่ายไปข้างหน้า (feed-forward network) ซึ่งเป็นชนิดโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi-Layer) สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประกอบด้วยจำนวนชั้นอยู่ 3 ชั้น ประกอบด้วย ชั้นอินพุต 3 อินพุต, ชั้นซ่อนมีจำนวน 10 โหนด, เอาต์พุต 1 เอาต์พุตโดยแสดงในรูปที่ 5.32 มีฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบซิกมอยด์แบบลอการิทึม (Log- sigmoid) และการฝึกสอนแบบซูปเปอร์ไวส์ (Supervised Training) ที่มีการรู้แบบแพร่กลับ (Backpropagation Learning)



รูปที่ 5.32 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมในลูปกระแส

เงื่อนไขการสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการควบคุมกระแสบนแกน  $d$  และแกน  $q$  จะมีข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตดังตารางที่ 5.2

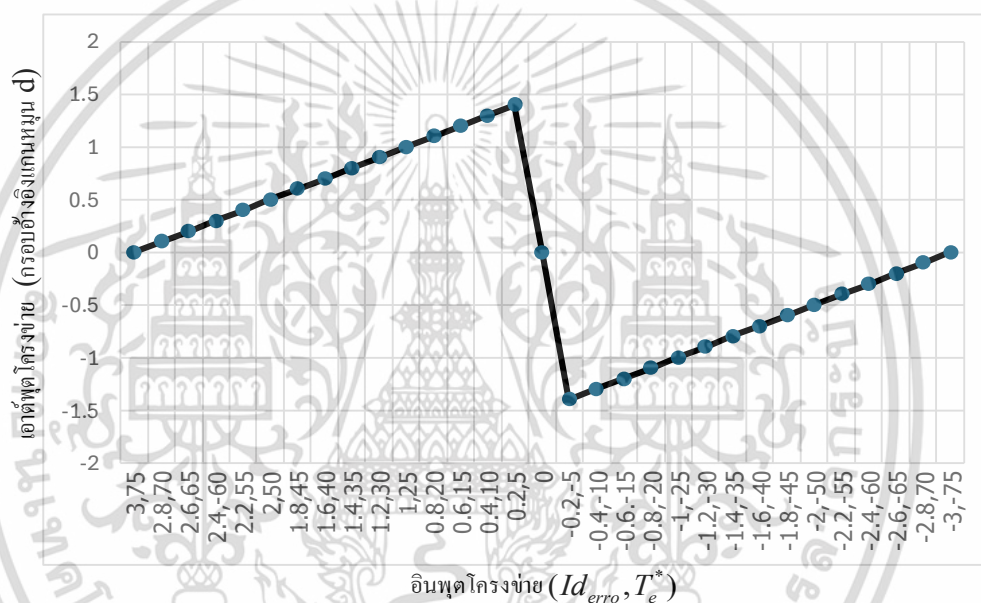
ตารางที่ 5.2 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตกระแสบนแกน  $d$  ที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

อินพุตโครงข่าย		เอาต์พุตโครงข่าย
$I_{d_{erro}}$ (A)	$T_e^*$ (N.m)	กรอบอ้างอิงแกนหมุน $d$ (V)
3	75	0
2.8	70	0.1
2.6	65	0.2
2.4	60	0.3
2.2	55	0.4
2	50	0.5
1.8	45	0.6
1.6	40	0.7
1.4	35	0.8
1.2	30	0.9
1	25	1
0.8	20	1.1
0.6	15	1.2
0.4	10	1.3
0.2	5	1.4
0	0	0
-0.2	-5	-1.4
-0.4	-10	-1.3
-0.6	-15	-1.2
-0.8	-20	-1.1
-1	-25	-1
-1.2	-30	-0.9
-1.4	-35	-0.8
-1.6	-40	-0.7
-1.8	-45	-0.6
-2	-50	-0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-2.2	-55	-0.4
-2.4	-60	-0.3
-2.6	-65	-0.2
-2.8	-70	-0.1
-3	-75	0

เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของโครงข่ายจะได้ดังรูปที่ 5.33



รูปที่ 5.33 ข้อมูลความสัมพันธ์อินพุตและเอาต์พุตกระแสนแกน  $d$

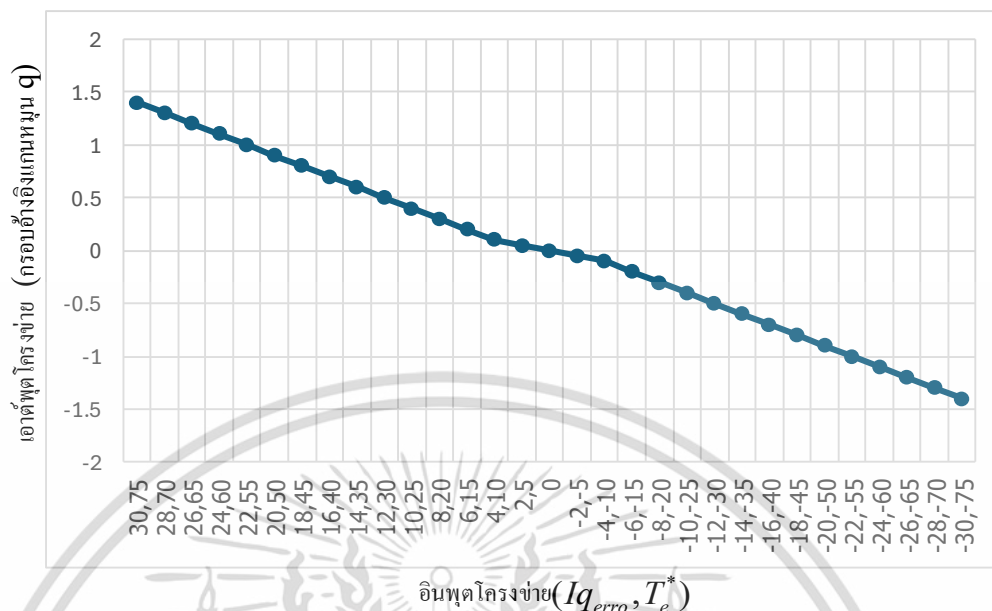
ตารางที่ 5.3 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตกระแสนแกน  $q$  ที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

อินพุตโครงข่าย		เอาต์พุตโครงข่าย
$I_{q_{erro}}$ (A)	$T_e^*$ (N.m)	กรอบอ้างอิงแกมมา $q$ (V)
30	75	1.4
28	70	1.3
26	65	1.2
24	60	1.1
22	55	1
20	50	0.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18	45	0.8
16	40	0.7
14	35	0.6
12	30	0.5
10	25	0.4
8	20	0.3
6	15	0.2
4	10	0.1
2	5	0.05
0	0	0
-2	-5	-0.05
-4	-10	-0.1
-6	-15	-0.2
-8	-20	-0.3
-10	-25	-0.4
-12	-30	-0.5
-14	-35	-0.6
-16	-40	-0.7
-18	-45	-0.8
-20	-50	-0.9
-22	-55	-1
-24	-60	-1.1
-26	-65	-1.2
-28	-70	-1.3
-30	-75	-1.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินพุตโครงข่าย ( $I_{q\_erro}, T_e^*$ )

### รูปที่ 5.34 ข้อมูลความสัมพันธ์อินพุตและเอาต์พุตกระแสบนแกน $q$

สำหรับการสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้วิธีแบบแพร่ย้อนกลับในนี้ได้ใช้ MATLAB เข้ามาช่วยในการฝึกสอนเพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส โดยข้อมูลในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมมีอินพุตและเอาต์พุตจากข้อมูลจากตารางที่ 5.2 และ 5.3 มีขั้นตอนสร้างบล็อกโมเดลของโครงข่ายประสาทเทียมเหมือนกันกับลูปควบคุมความเร็วรอบ

จากการสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยโปรแกรม MTLAB ค่าเฉลี่ยผิดพลาดกำลังสองไม่เกิน (MES) 0.001 และค่าความถดถอยเส้นตรง(R) ไม่ต่ำกว่า 0.98 ซึ่งจะได้ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส ดังนี้

ค่าถ่วงน้ำหนักขาเข้าบนแกน  $d$

$v_{11}$ 0.3055	$v_{21}$ -4.2536
$v_{12}$ -2.6294	$v_{22}$ -1.5303
$v_{13}$ 0.1997	$v_{23}$ -4.2008
$v_{14}$ 1.1573	$v_{24}$ -0.2349
$v_{15}$ -0.2527	$v_{25}$ -0.2104
$v_{16}$ -0.8564	$v_{26}$ 0.1755
$v_{17}$ -4.0589	$v_{27}$ 1.4614
$v_{18}$ -4.2405	$v_{28}$ -0.1801
$v_{19}$ 3.7781	$v_{29}$ 1.0052

$$v_{110} -4.5996$$

$$v_{210} 1.6835$$

ค่าไบอัสเข้าบนแกน  $d$

$$b_{11} 4.5750;$$

$$b_{12} 4.1245;$$

$$b_{13} 2.6829$$

$$b_{14} -1.5096$$

$$b_{15} 0.0985$$

$$b_{16} -0.0696$$

$$b_{17} -1.5684$$

$$b_{18} -3.0673$$

$$b_{19} 2.9219$$

$$b_{110} -4.1546$$

ค่าถ่วงน้ำหนักขาออกบนแกน  $d$

$$w_{11} -0.0014$$

$$w_{21} -0.0594$$

$$w_{31} 0.0024$$

$$w_{41} -0.5647$$

$$w_{51} -3.8201$$

$$w_{61} 0.9755$$

$$w_{71} 0.0171$$

$$w_{81} 0.1459$$

$$w_{91} 0.1527$$

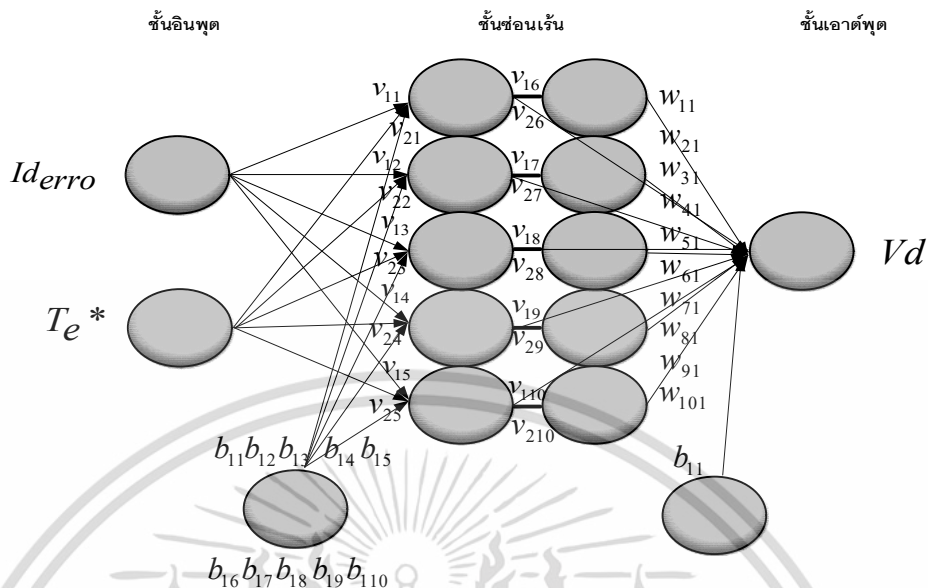
$$w_{101} 0.0833$$

ค่าไบอัสขาออกบนแกน  $d$

$$b_1 0.0817$$

สามารถเขียนรูปโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมใหม่จากรูปที่ 5.22 โดยแทนค่าถ่วงน้ำหนัก และค่าไบอัสที่หาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.35 โครงข่ายประสาทเทียมกระแสนแกน  $d$  ที่มีการฝึกสอนแล้ว

ค่าถ่วงน้ำหนักเข้าบแกน  $q$

$v_{11}$	-1.8732	$v_{21}$	2.9456
$v_{12}$	-2.3807	$v_{22}$	3.3028
$v_{13}$	4.8364	$v_{23}$	-3.2371
$v_{14}$	4.7397	$v_{24}$	0.8803
$v_{15}$	-0.0004	$v_{25}$	-0.1243
$v_{16}$	-3.6891	$v_{26}$	1.3921
$v_{17}$	-4.4283	$v_{27}$	-1.0843
$v_{18}$	4.3039	$v_{28}$	-0.6740
$v_{19}$	-3.1430	$v_{29}$	2.4900
$v_{110}$	3.3842	$v_{210}$	-3.0444

ค่าไบอัสเข้าบแกน  $q$

- $b_{11}$  4.6849
- $b_{12}$  3.6645
- $b_{13}$  -2.2085
- $b_{14}$  -1.5414
- $b_{15}$  0.0357

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $b_{16}$  -0.4249
- $b_{17}$  -1.1165
- $b_{18}$  2.3773
- $b_{19}$  -3.4992
- $b_{10}$  3.9147

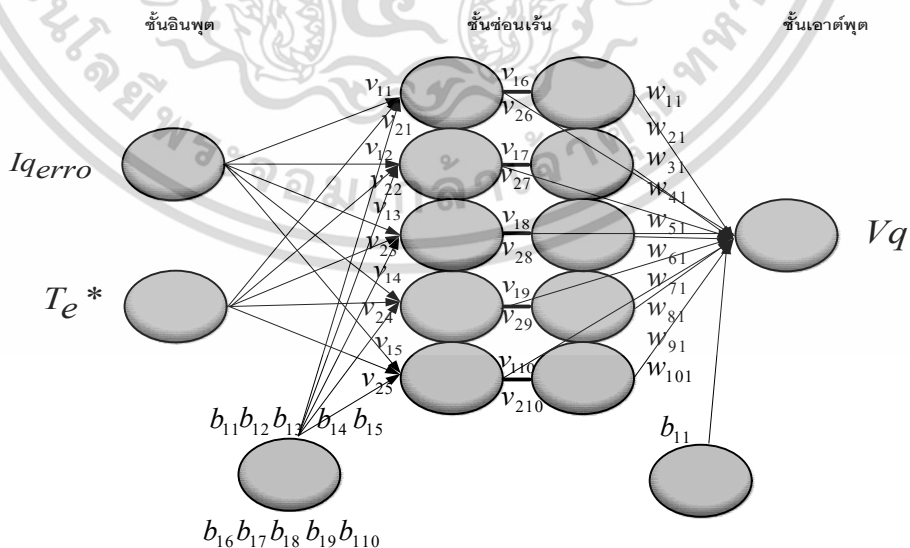
ค่าถ่วงน้ำหนักขาออกบนแกน  $q$

ค่าไบอัสขาออกบนแกน  $q$

- $w_{11}$  0.0077
- $w_{21}$  0.0014
- $w_{31}$  -0.0011
- $w_{41}$  -0.0002
- $w_{51}$  -8.0376
- $w_{61}$  0.0008
- $w_{71}$  0.0002
- $w_{81}$  -0.0003
- $w_{91}$  0.0047
- $w_{101}$  0.0036

$b_1$  0.2790

สามารถเขียนรูปโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมใหม่จากรูปที่ 5.36 โดยแทนค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสที่หาได้

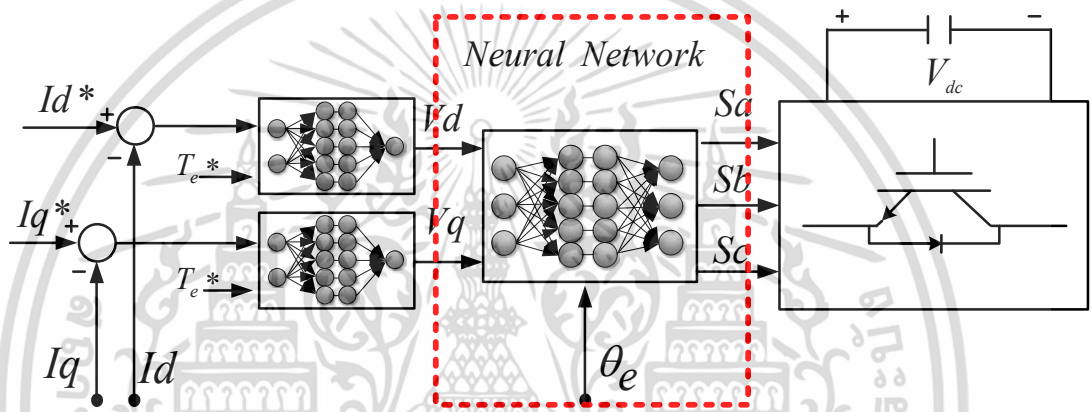


รูปที่ 5.36 โครงข่ายประสาทเทียมกระแสบนแกน  $q$  ที่มีการฝึกสอนแล้ว

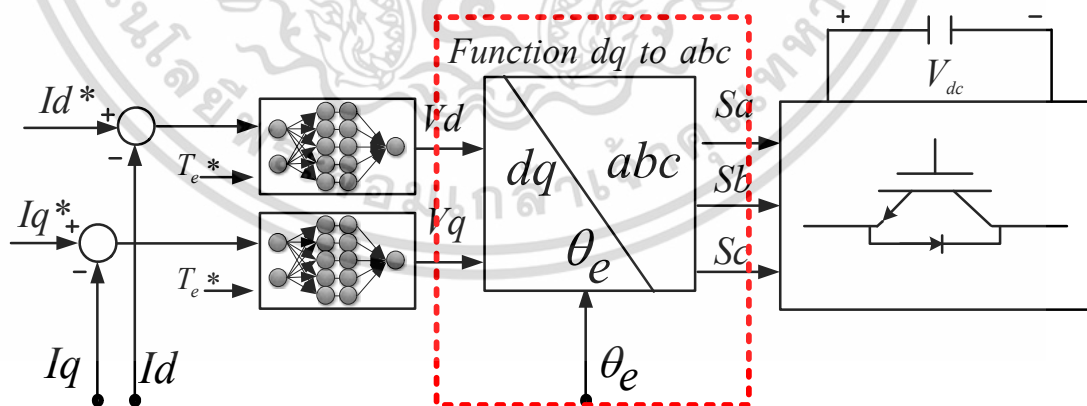
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.3 การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการเรียนรู้ฟังก์ชัน $dq$ to $abc$

การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการเรียนรู้ฟังก์ชัน  $dq$  to  $abc$  ซึ่งอินพุตโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วย สัญญาณกรอบอ้างอิงแกนหมุน  $d$ , สัญญาณกรอบอ้างอิงแกนหมุน  $q$  และมุมในการหมุน  $\theta_e$  ในส่วนของเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมจะมีสามเอาต์พุตประกอบด้วย สัญญาณไซน์สามลูกคลื่นที่แอมพลิจูด 1 V และมีมุมห่างกัน 120 องศา โดยโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการเรียนรู้ฟังก์ชันแปลง  $dq$  to  $abc$  จะถูกใช้เปรียบเทียบกับฟังก์ชันบล็อก  $dq$  to  $abc$  โดยแสดงไดอะแกรมดังรูปดังรูปที่ 5.37



(ก) ตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมฟังก์ชัน  $dq$  to  $abc$

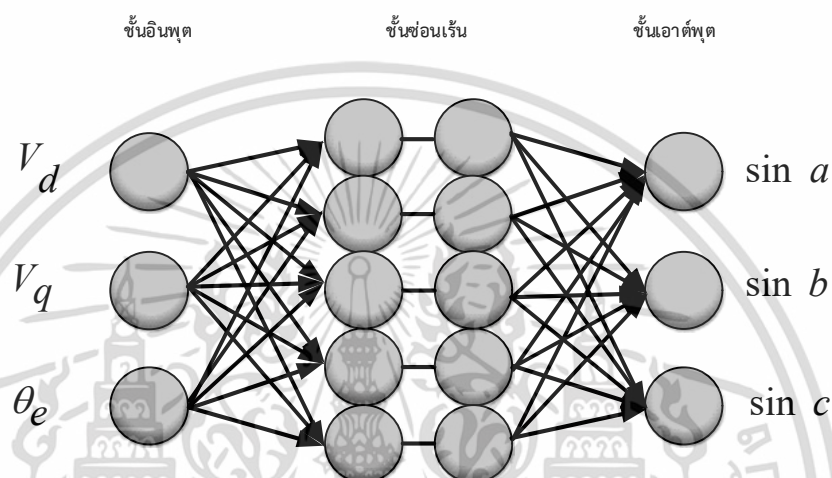


(ข) ทูลบล็อกฟังก์ชัน  $dq$  to  $abc$

รูปที่ 5.37 ฟังก์ชันแปลงกรอบอ้างอิง 2 เฟส เป็น 3 เฟส  $dq$  to  $abc$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงข่ายประสาทเทียมในส่วนของฟังก์ชัน  $dq$  to  $abc$  นี้จะเป็นการลอกเลียนแบบข้อมูลจากสมการที่ 2.28 โดยสถาปัตยกรรมของโครงข่ายจะเหมือนกับการออกแบบตัวควบคุมกระแสและการออกแบบตัวควบคุมของลูปควบคุมความเร็วแต่จะมีอินพุต 3 อินพุต และเอาต์พุต 3 เอาต์พุต แสดงโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 5.38



รูปที่ 5.38 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมฟังก์ชัน  $dq$  to  $abc$

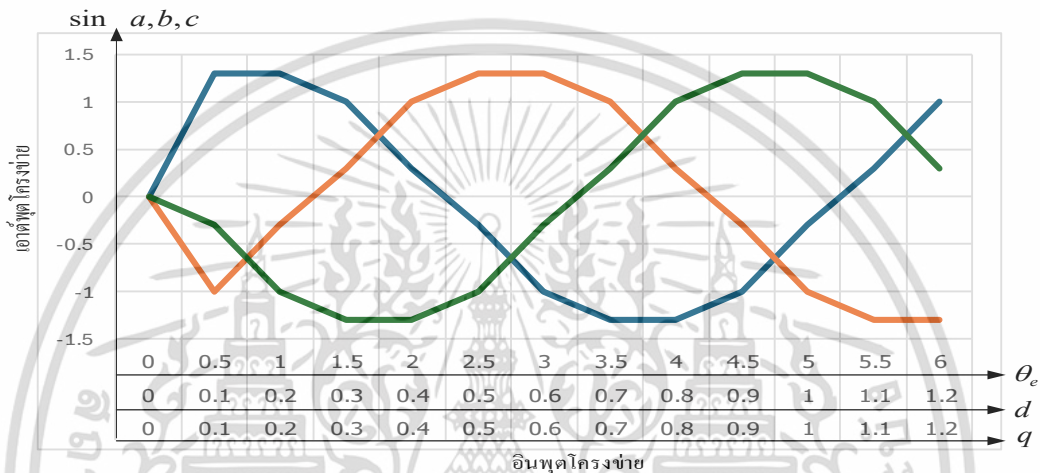
เงื่อนไขการสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในฟังก์ชัน  $dq$  to  $abc$  จะมีข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตฟังก์ชัน  $dq$  to  $abc$  ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

อินพุตโครงข่าย			เอาต์พุตโครงข่าย		
กรอบอ้างอิง แกนหมุน $d$	กรอบอ้างอิง แกนหมุน $q$	$\theta_e$	$\sin a$	$\sin b$	$\sin c$
0	0	0	0	0	0
0.1	0.1	0.5	1.3	-1.	-0.3
0.2	0.2	1	1.3	-0.3	-1
0.3	0.3	1.5	1	0.3	-1.3
0.4	0.4	2	0.3	1	-1.3
0.5	0.5	2.5	-0.3	1.3	-1
0.6	0.6	3	-1	1.3	-0.3
0.7	0.7	3.5	-1.3	1	0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.8	0.8	4	-1.3	0.3	1
0.9	0.9	4.5	-1	-0.3	1.3
1	1	5	-0.3	-1	1.3
1.1	1.1	5.5	0.3	-1.3	1
1.2	1.2	6	1	-1.3	0.3



รูปที่ 5.39 ข้อมูลความสัมพันธ์อินพุตและเอาต์พุตฟังก์ชัน  $dq$  to  $abc$

เมื่อทำการสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยโปรแกรม MTLAB จะได้ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส ดังนี้

ค่าถ่วงน้ำหนักขาเข้าฟังก์ชัน  $dq$  to  $abc$

$v_{11}$	0.1428	$v_{21}$	0.1973	$v_{31}$	1.3125
$v_{12}$	-0.0434	$v_{22}$	0.3526	$v_{32}$	1.2287
$v_{13}$	-0.0215	$v_{23}$	-0.5835	$v_{33}$	1.0395
$v_{14}$	-0.1708	$v_{24}$	-0.0132	$v_{34}$	1.4021
$v_{15}$	0.1487	$v_{25}$	-0.1531	$v_{35}$	-1.3839
$v_{16}$	-0.0745	$v_{26}$	-0.0614	$v_{36}$	-0.9071
$v_{17}$	-0.0641	$v_{27}$	-0.0922	$v_{37}$	0.9443
$v_{18}$	0.0990	$v_{28}$	-0.0102	$v_{38}$	-0.9301
$v_{19}$	-0.0041	$v_{29}$	0.1151	$v_{39}$	0.9415
$v_{10}$	-0.0930	$v_{20}$	0.0199	$v_{30}$	-0.9772

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าไบอัสขาเข้าฟังก์ชัน  $dq$  to  $abc$ 

$$b_{11} -1.6526$$

$$b_{12} 1.8387$$

$$b_{13} 0.7473$$

$$b_{14} 1.8198$$

$$b_{15} -1.9523$$

$$b_{16} -0.4879$$

$$b_{17} -0.4891$$

$$b_{18} 0.2071$$

$$b_{19} 0.1736$$

$$b_{10} -0.8318$$

ค่าถ่วงน้ำหนักขาออกฟังก์ชัน  $dq$  to  $abc$ 

$$w_{11} -16.7644$$

$$w_{12} 11.8283$$

$$w_{13} 4.9184$$

$$w_{21} -5.6947$$

$$w_{22} 5.0831$$

$$w_{23} 0.6058$$

$$w_{31} -5.9115$$

$$w_{32} 24.1690$$

$$w_{33} -18.2605$$

$$w_{41} -6.8081$$

$$w_{42} 20.3019$$

$$w_{43} -13.4985$$

$$w_{51} -15.4769$$

$$w_{52} 19.0185$$

$$w_{53} -3.5566$$

$$w_{61} 30.1182$$

$$w_{62} -49.6685$$

$$w_{63} 19.5776$$

$$w_{71} -32.8439$$

$$w_{72} 35.2870$$

$$w_{73} -2.4758$$

$$w_{81} -31.8418$$

$$w_{82} 7.0026$$

$$w_{83} 24.8032$$

$$w_{91} -1.3001$$

$$w_{92} -34.1415$$

$$w_{93} 35.4348$$

$$w_{101} -39.9729$$

$$w_{102} 25.8249$$

$$w_{103} 2.2542$$

ค่าไบอัสขาออกฟังก์ชัน  $dq$  to  $abc$ 

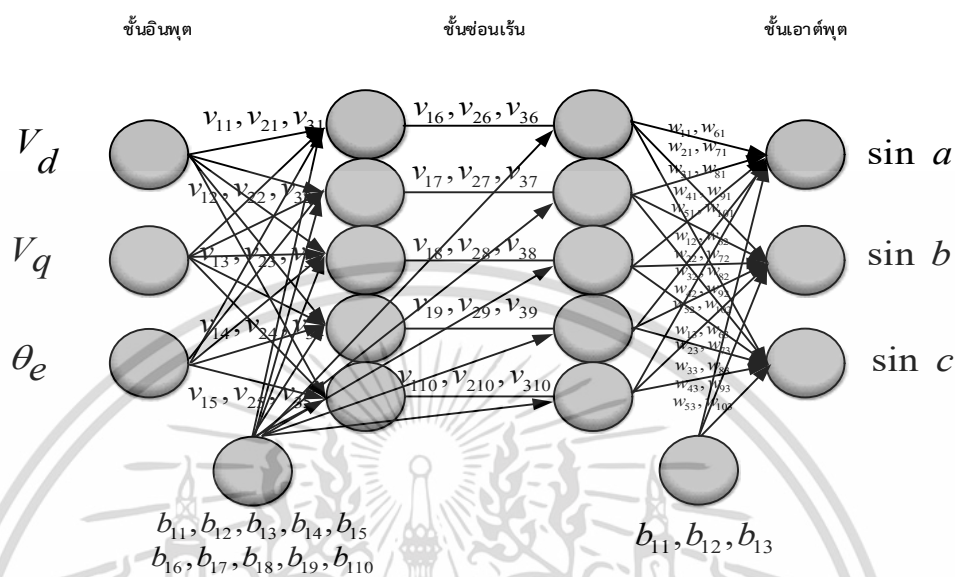
$$b_{11} -0.3394$$

$$b_{12} 1.2609$$

$$b_{13} -0.9212$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเขียนรูปโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมใหม่จากรูปที่ 5.40 โดยแทนค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสที่หาได้



รูปที่ 5.40 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมฟังก์ชัน  $dq$  to  $abc$  ที่มีการฝึกสอนแล้ว

#### 5.4 โปรแกรม Code composer studio (CCS)

โปรแกรม Code composer studio (CCS) เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการช่วยพัฒนาโปรแกรม หรือ เรียกว่า integrated development environment (IDE) tool ของบริษัท Texas instruments ใช้ common object file format (COFF) หรือไฟล์นามสกุล .COFF ในการพัฒนาโปรแกรมให้สามารถใช้ประโยชน์ให้สูงสุด โดยที่โค้ดไฟล์ของแต่ละโค้ดถูกเรียกว่า “โมดูล” ซึ่งถูกเขียนแยกกันอย่างอิสระ โดยจะรวมทรัพยากรที่จำเป็นในการทำงานของแต่ละโมดูล สำหรับการเขียนโมดูลนี้สามารถเขียนได้โดยการใช้ CCS ด้วยโปรแกรมภาษา Assembly ที่มีนามสกุลของไฟล์เป็น .ASM และโปรแกรมภาษาซีที่มีนามสกุลของไฟล์เป็น .C

สำหรับโปรแกรม CCS ที่แสดงตามรูปที่ 5.41 ประกอบไปด้วย editor, compiler, assembler, linker และ automatic build process นอกจากนี้ยังสามารถแสดงผลกราฟที่เชื่อมต่อระหว่างอินพุต และเอาต์พุตหลายๆโมดูลถูกเชื่อมต่อจากโปรแกรมด้วยการใช้ tinker ซึ่ง linker นี้จะจัดสรรทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพในแต่ละระบบของโมดูลโดย linker ใช้ command file (CMD) เพื่อที่จะแยกแยะ ในส่วนของการจองพื้นที่ในหน่วยความจำที่เหมาะสมในแต่ละโมดูลเพื่อนำไปสู่ขบวนการแปลงไฟล์เป็นนามสกุล .OUT ต่อไป

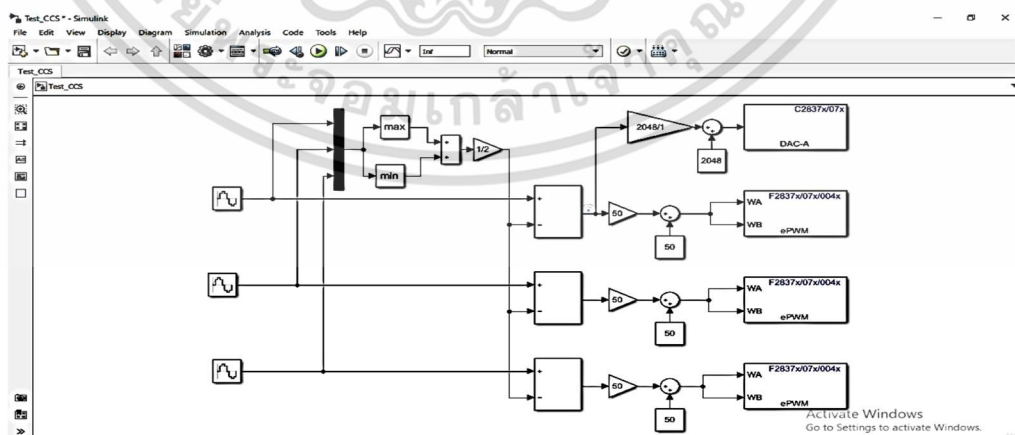


รูปที่ 5.41 หน้าต่างเปิดใช้งานโปรแกรม Code composer studio (CCS)

#### 5.4.2 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม CCS V 8.2.0

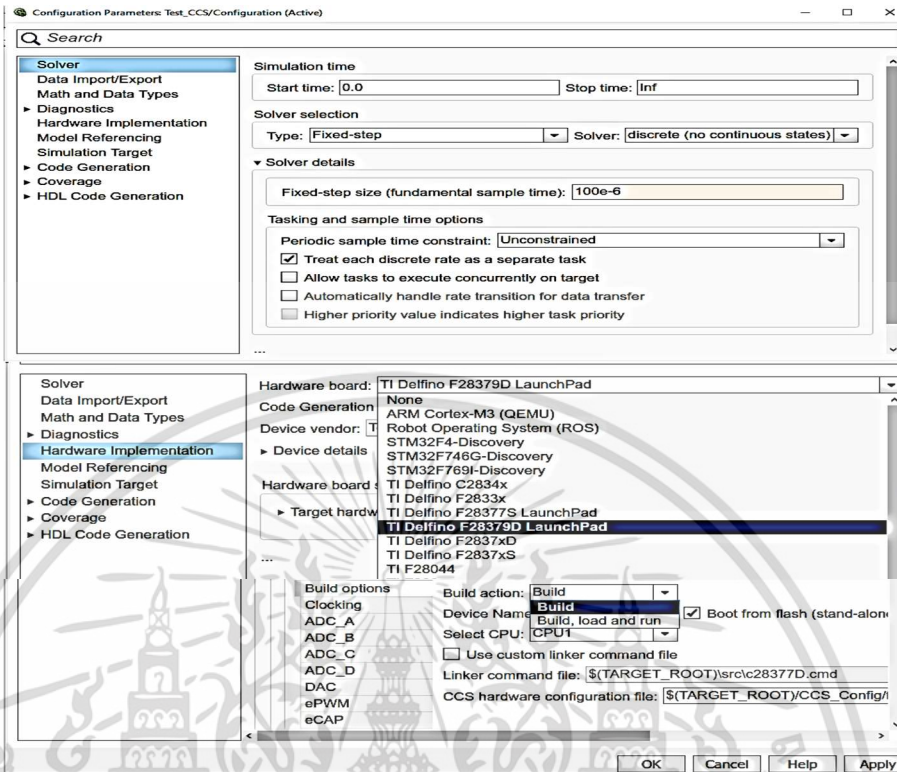
ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม CCS V 8.2.0 ทำการโหลดชื่อไฟล์ Test\_CCS.slx ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งโปรแกรมแสดงบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 5.28 จะประกอบด้วยบล็อกเช็ตของสัญญาณ Space vector pulse width modulation (SVPWM) ที่ถูกนำไปมอดูเลชันผ่านบล็อก ePWM และบล็อก DAC-A จะประกาศสัญญาณออกเป็น (SVPWM) แสดงดังรูปที่ 5.42

ในการใช้งานโปรแกรม CCS V 8.2.0 ร่วมกับโปรแกรม MATLAB/SIMULINK จะต้องตั้งค่า Stop time ให้เป็น inf โดยมีการตั้งค่า solver option ให้เป็น Fixed-step และ Discrete (No continuous states) ในการกำหนดช่วงเวลาของ Sample time ให้กำหนดเป็น 100e-6 (100ไมโครวินาที) หากไม่สามารถ Build ได้ให้ปรับช่วงเวลาให้สูงขึ้นและให้ไปเลือก TI Delfino F28379D Launch Pad ที่ Hardware Implementation และเลือก Build action ให้เป็น Build แสดงดังรูปที่ 5.43 จากนั้นกด OK



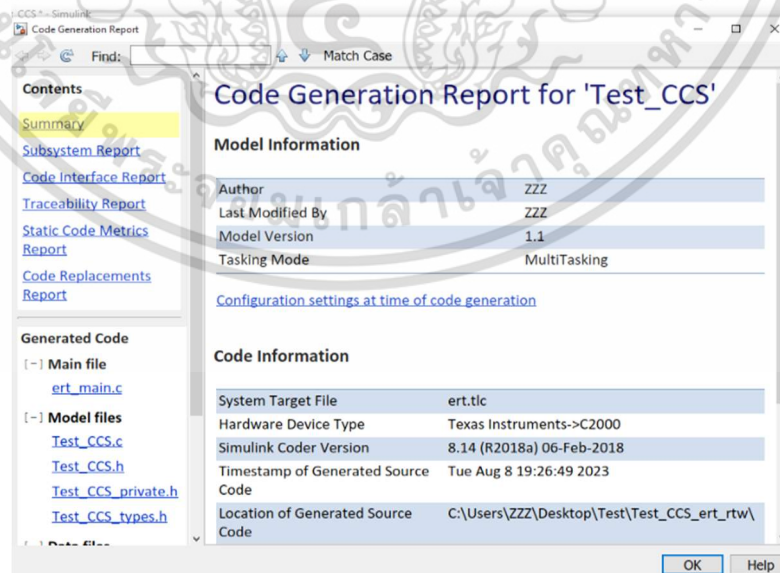
รูปที่ 5.42 บล็อกเช็ตของ Test\_CCS.slx ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.43 การตั้งค่า Model Configuration parameters ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

ทำการ Build บล็อกเซ็ตของ Test\_CCS.slx โปรแกรมตัวอย่าง เมื่อ Build ผ่านแล้วจะได้ file Test\_CCS.out ที่ folder file หน้า Workspace แสดงในรูปที่ 5.44



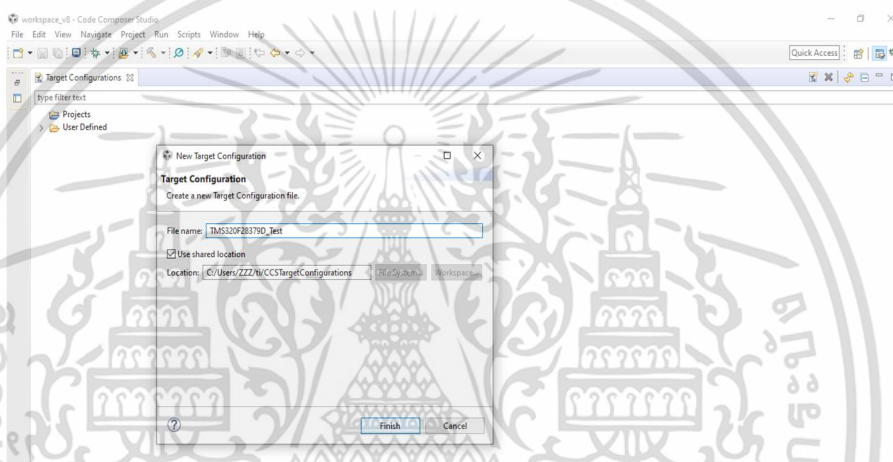
รูปที่ 5.44 ผลการ Build บล็อกเซ็ตของ Test\_CCS.out ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับขั้นตอนการเชื่อมต่อและการรันโปรแกรมใน CCS V 8.2.0

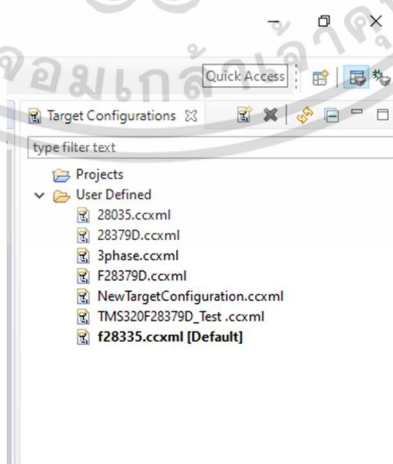
- 1 เลือก New Target Configuration
- 2 ตั้งค่า เป้าหมายเป็น Spectrum Digital DSK-EVM-eZdsp onboard USB Debug Probe
- 3 กำหนด Type filter text เป็น TMS320F28379D จากนั้นกด SAVE.

ขั้นตอนที่ 1 เลือก New Target Configurations จะแสดงขึ้น ต่อมาให้ทำการตั้งชื่อ Target ที่ต้องการที่ช่อง File name ซึ่งในที่นี้ใช้ชื่อว่า TMS320F28379D\_Test จากนั้นทำการ Finish



รูปที่ 5.45 New Target Configurations

ขั้นตอนที่ 2 ตั้งค่าอุปกรณ์ที่จะเชื่อมต่อกับโปรแกรม CCS นั้นก็คือ TMS320F28379D โดยการคลิกเลือกแท็บ TMS320F28379D\_Test ซึ่งเป็นชื่อที่ได้ตั้งไว้ในขั้นตอนที่ 1

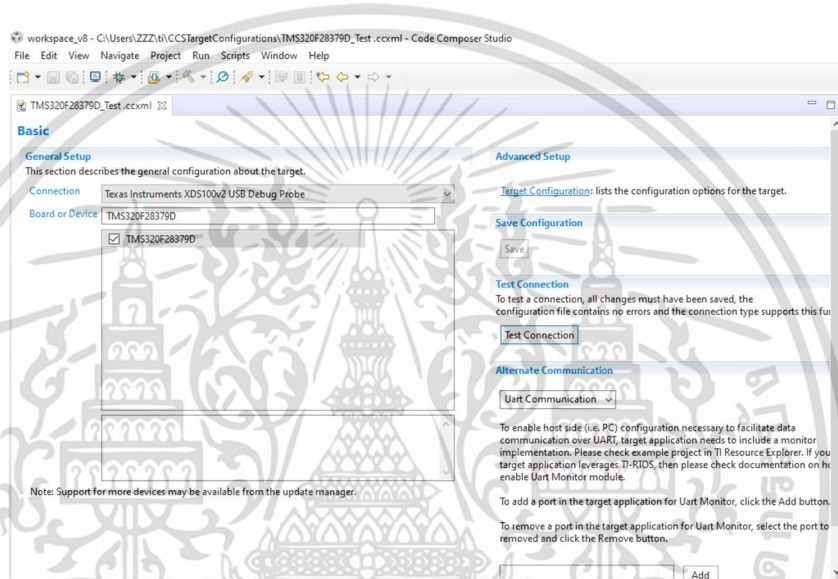


รูปที่ 5.46 สร้างไฟล์ชื่อที่จะเชื่อมต่อกับโปรแกรม CCS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

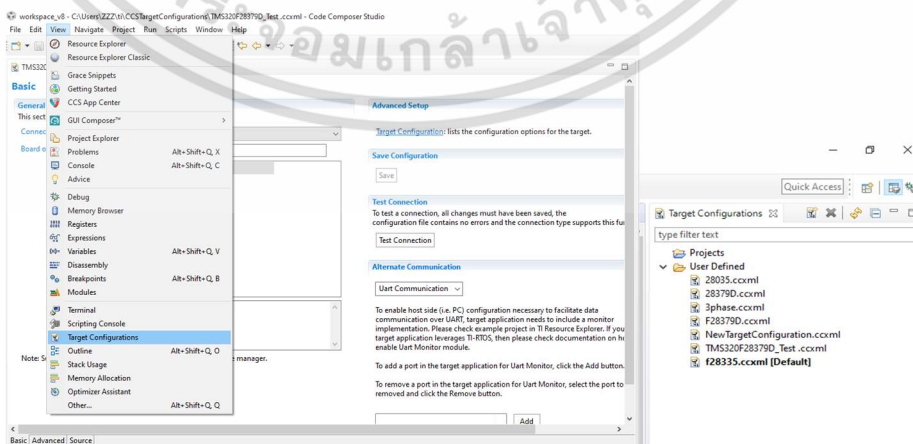
ขั้นตอนที่ 3 จากนั้นที่หัวข้อ Connection โดยปกติโปรแกรมจะตั้งค่ามาตรฐานเป็น Texas instruments Simulator ให้ทำการเปลี่ยนเป็น Texas instruments XDS100v2 USB Debug Probe

ขั้นตอนที่ 4 ที่หัวข้อ Board or Device ทำการเลือกเป็น TMS320F28379D จากนั้นคลิก Save และ Test Configuration



รูปที่ 5.47 ตั้งค่าอุปกรณ์ที่จะเชื่อมต่อกับโปรแกรม CCS

ขั้นตอนที่ 5 ต่อมาไปที่หน้าต่าง Target Configurations ในกรณีที่ไม่พบสามารถเรียกขึ้นมาโดยคลิก View จากนั้นเลือก Target Configurations

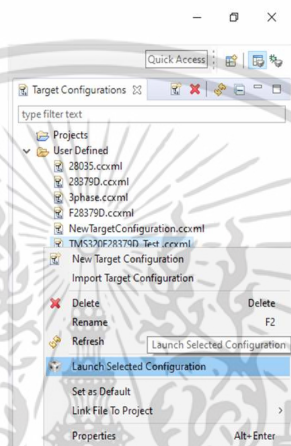


รูปที่ 5.48 ค้นหา Target Configurations

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 6 จะเห็นได้ว่าโปรแกรมจะทำการสร้างไฟล์ขึ้นที่โฟลเดอร์ User Defined โดยใช้ชื่อตามที่ได้ตั้งไว้ในขั้นตอนที่ 1 TMS320F28379D\_Test

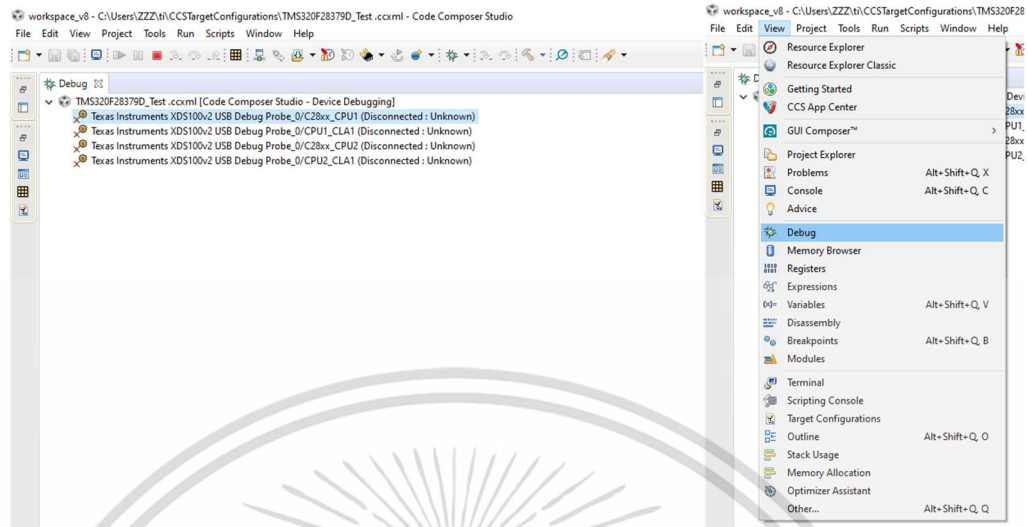
ขั้นตอนที่ 7 ทำการ Run Target ที่ได้ทำการ Config ไว้โดยการคลิกขวาที่มีชื่อตามที่ตั้งไว้แล้วเลือก Launch Selected Configuration



รูปที่ 5.49 เลือก *Launch Selected Configuration*

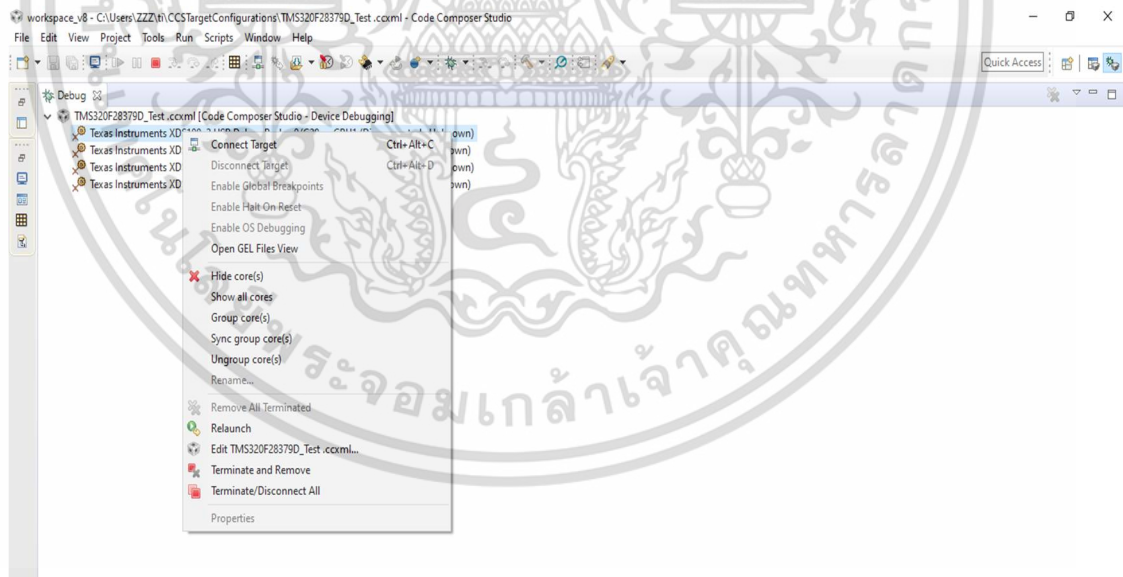
ขั้นตอนที่ 8 หลังจากทีคลิก *Launch Selected Configuration* แล้วโปรแกรมจะแสดงหน้าต่าง progress เพื่อแสดงการทำงานและเมื่อหน้าต่าง progress หายไป ที่ช่อง Debug จะแสดงรายละเอียดของ Target ที่ตั้งค่าไว้ ในกรณีที่โปรแกรมไม่แสดง Debug หรือถูกปิดไว้สามารถเปิดได้โดยคลิกที่ View แล้วเลือก Debug

ขั้นตอนที่ 9 เมื่อช่อง Debug ถูกเรียกใช้งานจะแสดงดังรูปที่ 3.50 จะพบว่าตัวบอร์ด TMS320F28379D อยู่ในโหมด Disconnected Device นั้นยังไม่ได้มีการเชื่อมต่อซึ่งสามารถสังเกตได้ที่ช่อง Disassembly จะไม่มีข้อมูลใด ๆ แสดงออกมา



รูปที่ 5.50 แสดงช่อง Debug

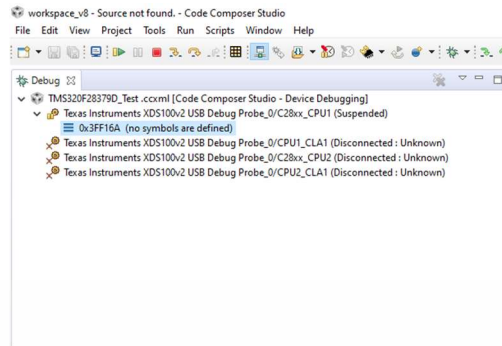
ขั้นตอนที่ 10 การเชื่อมต่อโปรแกรม CCS กับบอร์ด TMS320F28379D สามารถทำได้โดยคลิกขวาที่ Texas instruments XDS100v2 USB Debug Probe\_0/C28xx\_CPU1 จากนั้นเลือก Connect Target



รูปที่ 5.51 Connect Target

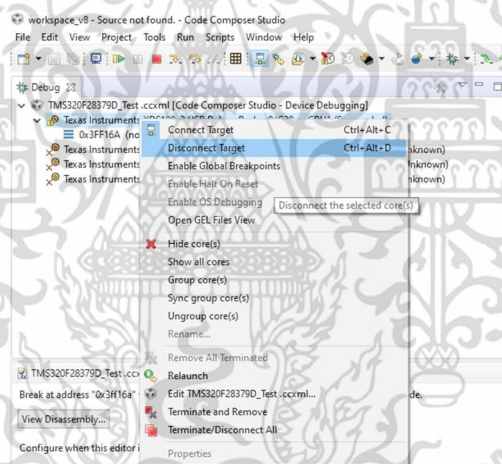
ขั้นตอนที่ 11 หลังจากที่เลือก Connect Target เพื่อเชื่อมต่อแล้ว Disconnected Device จะหายไป และสังเกต Disassembly จะมีข้อมูลแสดงออกมาซึ่งหมายถึงโปรแกรม CCS เชื่อมต่อกับบอร์ด TMS320F28379D แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.52 เชื่อมต่อกับบอร์ด TMS320F28379D

ขั้นตอนที่ 12 ในกรณีที่หยุดเชื่อมต่อกับบอร์ด TMS320F28379D สามารถทำได้โดยคลิกขวาที่ Texas instruments XDS100v2 USB Debug Probe\_0/C28xx\_CPU1 จากนั้นเลือกที่ Disconnect Target

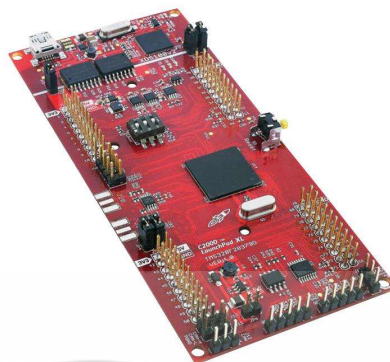


รูปที่ 5.53 หยุดเชื่อมต่อกับบอร์ด TMS320F28379D

## 5.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 เบอร์ TMS320F28379D

กระบวนการการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสนั้นใช้ตัวประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 เบอร์ TMS320F28379D แสดงในรูปที่ 3.54 ซึ่งจะใช้งานร่วมกับโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และโปรแกรม Code composer studio (CCS) เพื่อให้ระบบที่ได้ออกแบบไว้มีการทำงานที่ถูกต้องและสัมพันธ์กันระหว่างการทดสอบงานจริงและการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.54 C2000 เบอร์ TMS320F28379D

ไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28379D เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์แบบมีการใช้ชุดคำสั่งแบบ Embedded Composer โดยจะแปลงชุดคำสั่งการทำงานจากระบบการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK มีคุณสมบัติการใช้งานและสมรรถนะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนี้

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้ซีพียูด้วยเทคโนโลยีซีมอส (CMOS)
  - ความถี่ในการประมวลผลเท่ากับ 200 MHz (ความเร็วรอบประมวลผล 5 นาโนวินาที)
  - แรงดันซีพียู 1.9V/1.8V, แรงดันพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตเท่ากับ 3.3 โวลต์
2. ซีพียูประสิทธิภาพสูง ขนาด 32 บิต (TMS320F28xxx)
  - มาตรฐาน 1757 IEEE-754 Single-Precision Floating-Point Unit (FPU)
  - Trigonometric Math Unit (TMU)
  - Viterbi/Complex Math Unit (VCU-II)
  - Unified Memory Programming Model
  - Code-Efficient (in C/C++ and Assembly)
3. On-Ship Memory
  - 512KB(256KW) or 1MB(512KW) of Flash (ECC-Protected)
  - 132KB(66KW) or 164KB(82KW) of RAM
  - Dual-Zone Security Supporting Third-Party Development
  - Unique Identification Number
4. Clock and System Control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Two Internal Zero-Pin 10MHz Oscilloscope
  - On-Chip Crystal Oscillator
  - Windowed Watchdog Timer Module
  - Missing Clock Detection Circuitry
5. Analog Subsystem
- Up to Four Analog to Digital Converters (ADCs)
  - 16-bit Mode
  - 1.1 MSPS Each (Up to 4.4-MSPS system Throughput)
  - Single-Ended Input
  - Up to 24 External Channels
  - Single Sample and Hold (S/H) on Each ADC
  - Hardware-Integrated Post-Processing of ADC Converter
  - Saturating Offset Calibration
  - Error of Set Point Calculation
  - High, Low and Zero-Crossing Compare with Interrupt Capability
  - Trigger to Sample Delay Capture
  - Eight Windowed Comparators with 12-bit Digital to Analog (DAC)
  - Three 12-Bit Buffered DAC Outputs
6. Enhanced Control Peripherals
- 24 PWM Channels with Enhanced Features
  - 16 High-Resolution Pulse Width Modulator (HRPWM) Channels
  - High Resolution on Both A and B Channels of 8 PWM Modules
  - Dead-Band Support (on Both Standard and High Resolution)
  - Six Enhanced Capture (eCAP) Modules
  - Three Enhanced Quadrature Encoder Pulse (eQEP) Modules
7. Peripheral Interrupt Expansion (PIE) Block That Supports all 58 Peripheral
8. 128-Bit Security Key/Lock
- Protects Flash/OTP/RAM Block
  - Prevents Firmware Reverse Engineering
9. Enhanced Control Peripherals

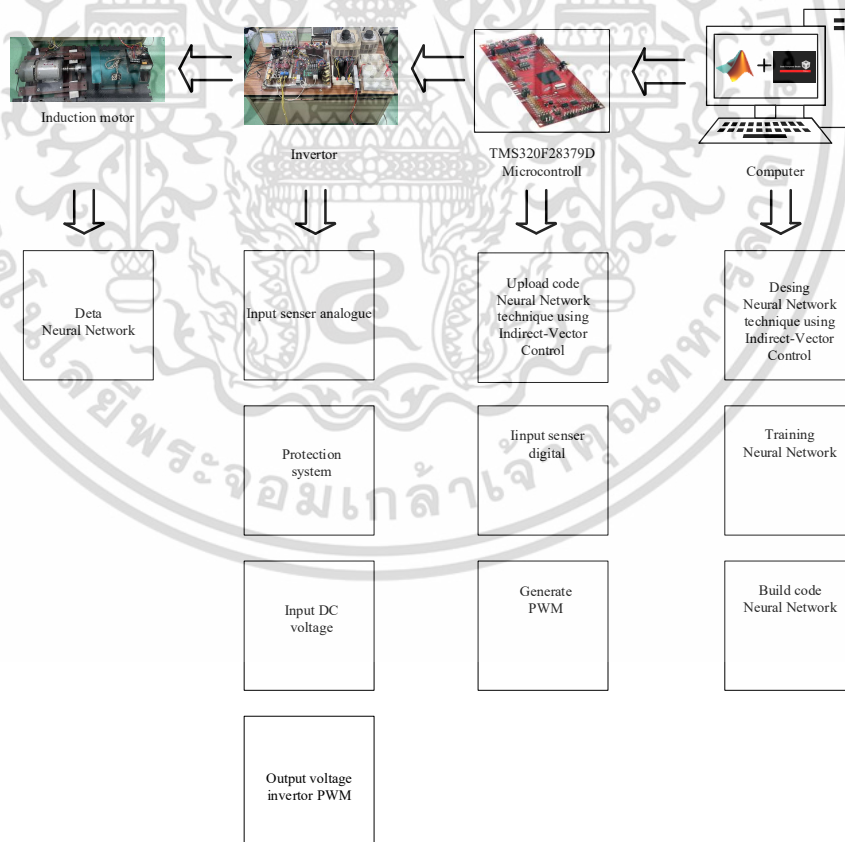
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Up to 18 PWM Output
  - Up to 6 HRPWM Output With 150 ps MEP Resolution
  - Up to 6 Even Capture Inputs Up to 2 Quadrature Encoder Interfaces
  - Up to 8 32-Bit Timers (6 for eCAPS and 2 for eQEPs)
  - Up to 9 16-Bit Times (6 for ePWMs and 3XINTCRs)
10. Three 32-Bit CPU Timers
11. Serial Port Peripherals Up to 2 CAN Modules
- Up to 3 SCI (UART) Module
  - Up to 2 McBSP Module (Configurable as SPI)
  - One SPI Module
  - One Inter-Integrated-Circuit (I2C) Bus
12. 12-Bit ADC, 16 Channels
- 80 ns Conversion Rate
  - 2x8 Channel Input Multiplexer Two Sample and Hold
  - Single/Simultaneous Conversions Internal or External Reference
13. Up to 88 Individually Programmable, GPIO pins With Input Filtering
14. JTAG Boundary Scan Support
15. Advanced Emulation Functions
- Analyze and Breakpoint Functions Real
  - Time Debug via Hardware
16. Deployment Support Includes
- ANSI C/C++ Compiler/Assembler /Linker
  - Code Composer Studio IDE TM
  - DSP/BIOS
  - Digital Motor Control and Digital Power Software Libraries

จากข้อมูลคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ TMS320F28379D ที่กล่าวในข้างต้น  
 นับว่าเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีประสิทธิภาพและสมรรถนะในการทำงานและการคำนวณทาง  
 คณิตศาสตร์ รวมถึงการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลอยู่ในระดับสูง ซึ่งการที่จะให้การประมวลผล

### 5.6 สรุป

จากเนื้อหาในบทที่ 5 จะกล่าวถึงการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink การจำลองการทำงานของระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม การออกแบบตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมในรูปควบคุมความเร็วรอบ ในรูปควบคุมกระแสและในการสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงสามเฟส มีการใช้ลักษณะโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้า (feed-forward network) ซึ่งเป็นชนิดโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi-Layer) มีฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบซิกมอยด์แบบลอการิทึม (Log- sigmoid) และการฝึกสอนแบบซูปเปอร์ไวส์ (Supervised Training) ที่มีการรู้แบบแพร่กลับ (Backpropagation Learning) นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้กับโปรแกรม Code composer studio (CCS) ในการ Build Coed ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28379D ประมวลผลสัญญาณกระแสและความเร็วรอบที่ตรวจจับได้และส่งสัญญาณ PWM ไปขับอินเวอร์เตอร์ต่อไป โดยผลการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมจะแสดงให้เห็นผลลัพธ์ในบทต่อไป



รูปที่ 5.55 บล็อกไดอะแกรมการประยุกต์โปรแกรมร่วมกับชุดต้นแบบ

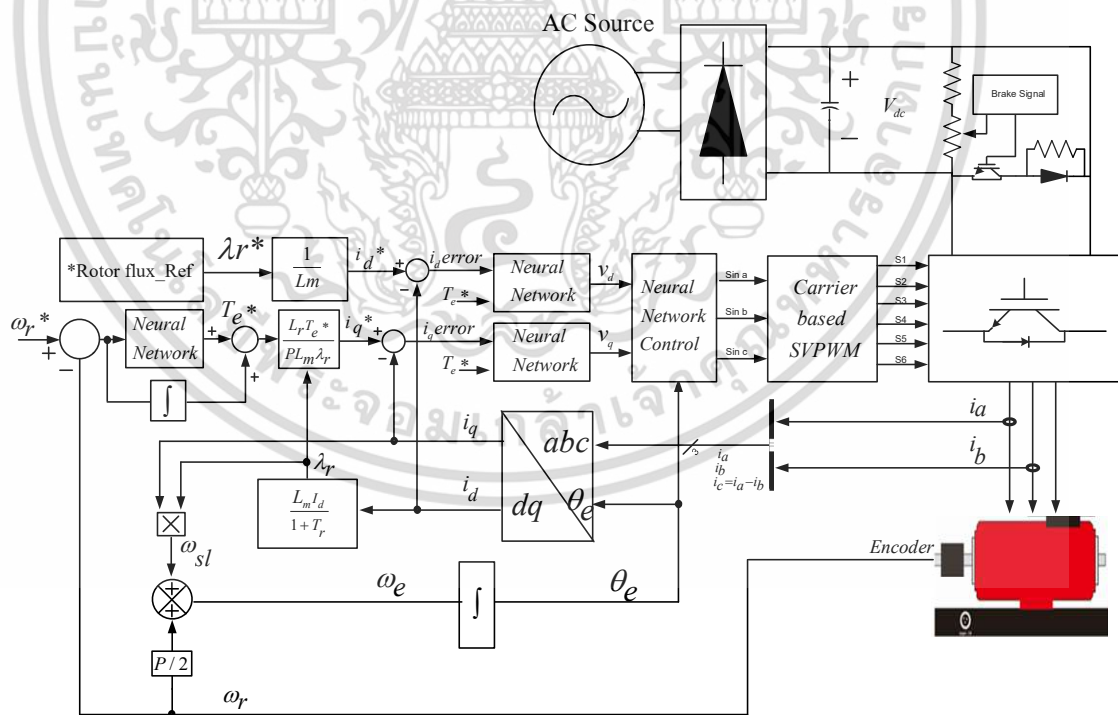
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# ผลจำลองและผลทดสอบการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม

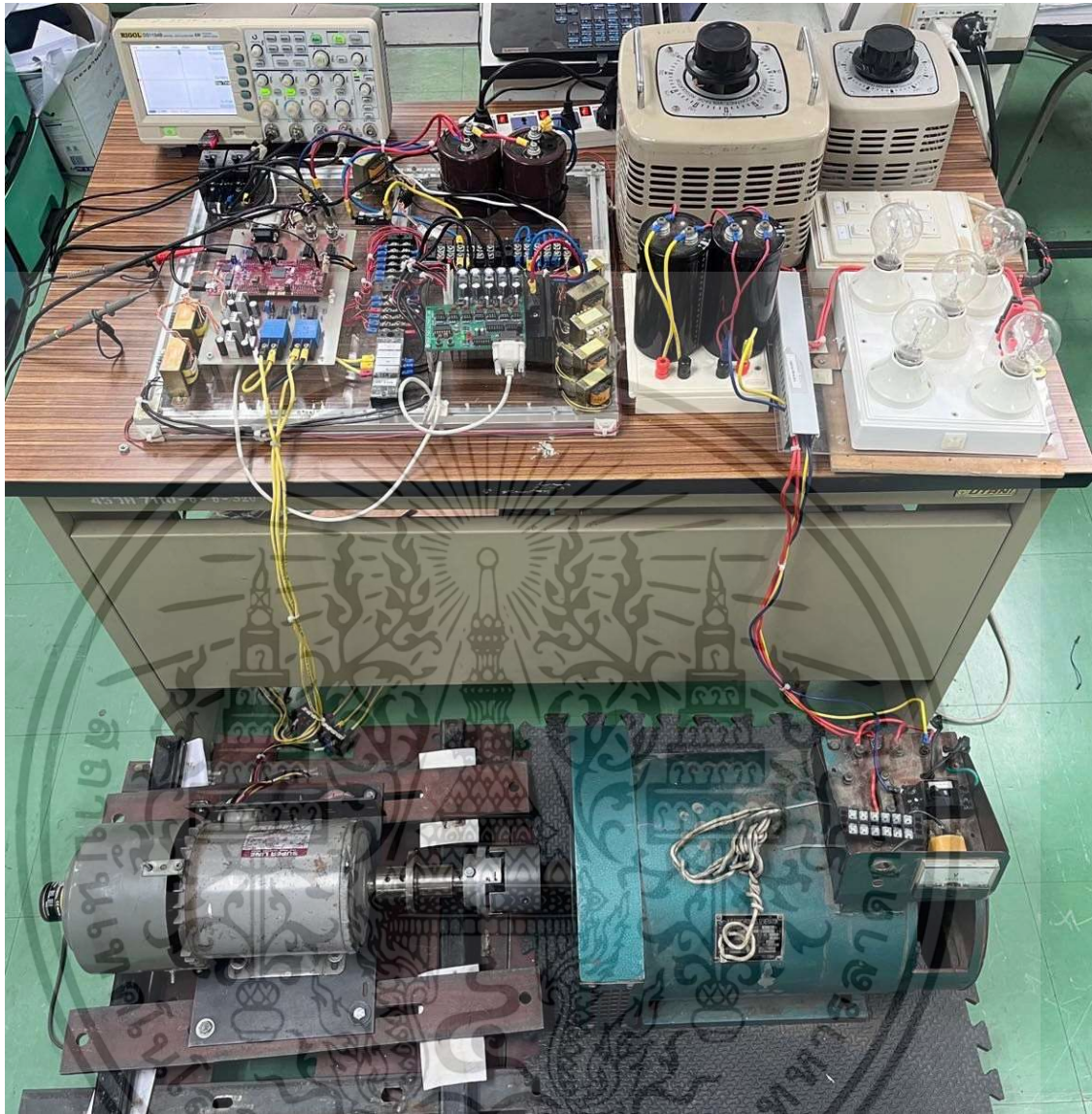
### 6.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองและทดสอบการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม โดยผลการจำลองได้จากโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยแสดงบล็อกไดอะแกรมของการจำลองนี้ดังรูปที่ 6.1 เปรียบเทียบกับชุดต้นแบบโดยการควบคุมปริมาณผลทั้งระบบใช้เป็นชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล C2000 TMS320F28379D ส่วนชุดวงจรกำลังประกอบด้วยชุดอินเวอร์เตอร์สามเฟส IPM Module เบอร์ PM25RSB120 ที่มีพิกัดแรงดันที่ 1200V และพิกัดกระแสที่ 25A และชุดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในส่วนของสัญญาณตรวจจับจะมีตรวจจับกระแส 2 ตัว และ เอ็นโค้ดเดอร์ตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์ 1 ตัว โดยแสดงชุดต้นแบบในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.1 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 ชุดต้นแบบในการทดสอบการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม

ได้กำหนดหัวข้อที่จะนำเสนออยู่ 3 หัวข้อดังต่อไปนี้

1. การสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงสามเฟสด้วยโครงข่ายประสาทเทียม
2. จำลองเปรียบเทียบทดสอบการควบคุมความเร็วรอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียม
3. การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบดั้งเดิม PI เปรียบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม

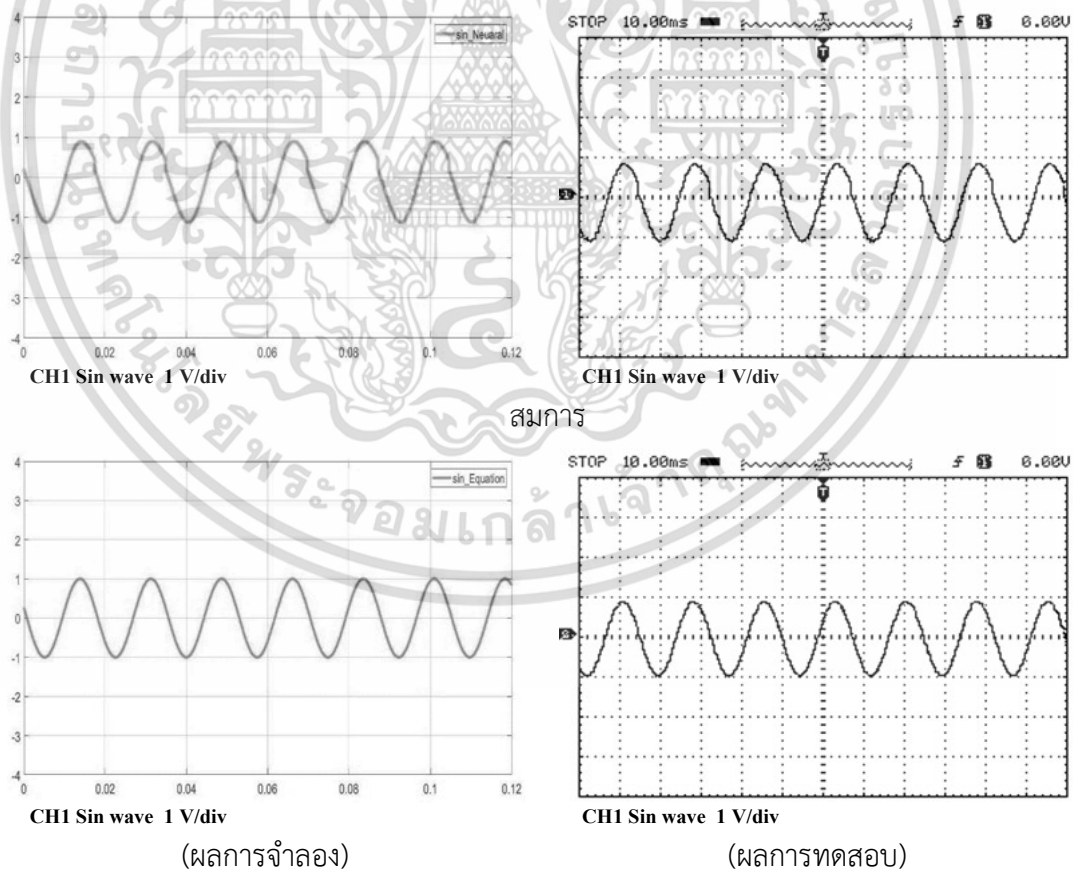
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 การสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงสามเฟสด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

ในงานวิจัยนี้ได้นำโครงข่ายประสาทเทียมมาสร้างสัญญาณอ้างอิงสามเฟสที่นำไปมอดูเลชัน โดยจะแสดงผลตอบสนองการทำงานของตัวควบคุมเทียบกับสมการ การแปลงแกนหมุนอ้างอิงสองเฟสให้อยู่ในแกนอ้างอิงสามเฟสหรืออินเวอร์สแบบปาร์ค-คลาร์ก ซึ่งทำการทดสอบที่ 5 สถานะดังต่อไปนี้

- ความถี่สูงค่าที่ 57.4Hz กรอบอ้างอิงแกน  $dq$  คงที่ 1 V และมุมรีเซ็ต  $\theta_e$  ที่  $2\pi$  rad
- ความถี่ต่ำค่าที่ 1 Hz และ กรอบอ้างอิงแกน  $dq$  คงที่ 1 V และมุมรีเซ็ต  $\theta_e$  ที่  $2\pi$  rad
- ความถี่ 50 Hz กรอบอ้างอิงแกน  $dq$  คงที่ 1 V และมุมรีเซ็ต  $\theta_e$  ที่ 0 rad เปลี่ยนเป็น  $2\pi$  rad
- ค่ากรอบอ้างอิงแกน  $dq$  เป็นตามลำดับ 0.34 V, 0.56 V ความถี่ 25Hz และมุมรีเซ็ต  $\theta_e$  ที่  $2\pi$  rad
- ค่าความถี่และค่ากรอบอ้างอิงแกน  $dq$  เป็นศูนย์

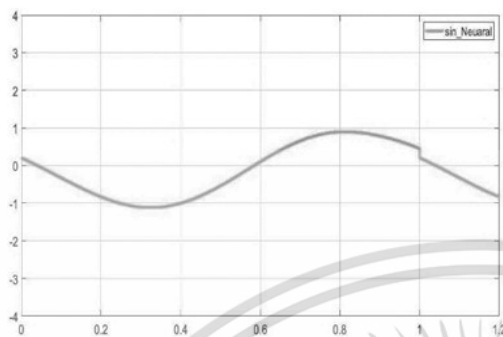
โครงข่ายประสาทเทียม



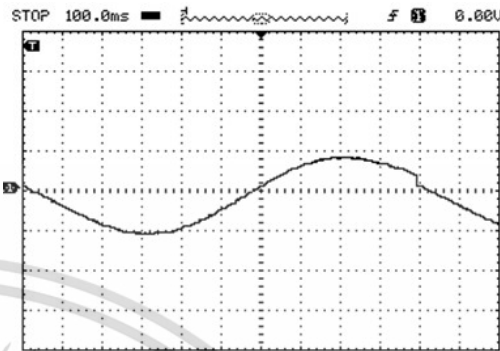
รูปที่ 6.3 สัญญาณอ้างอิงความถี่สูงค่าที่ 57.4Hz และกรอบอ้างอิงแกน  $dq$  คงที่ 1 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงข่ายประสาทเทียม

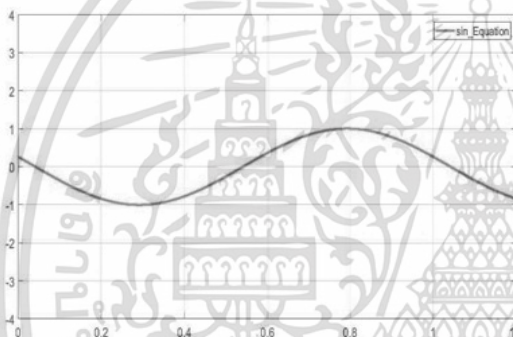


CH1 Sin wave 1 V/div



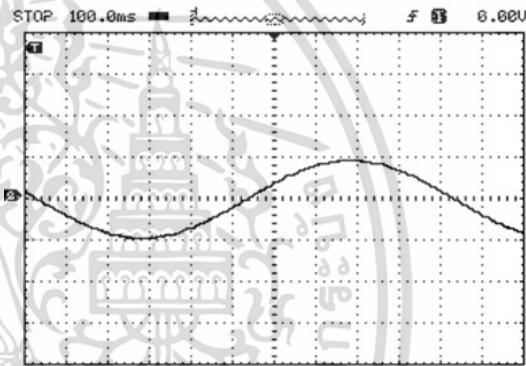
CH1 Sin wave 1 V/div

สมการ



CH1 Sin wave 1 V/div

(ผลการจำลอง)

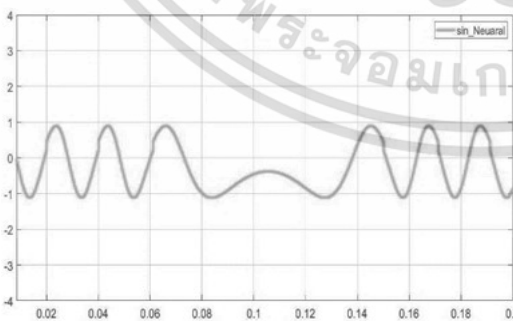


CH1 Sin wave 1 V/div

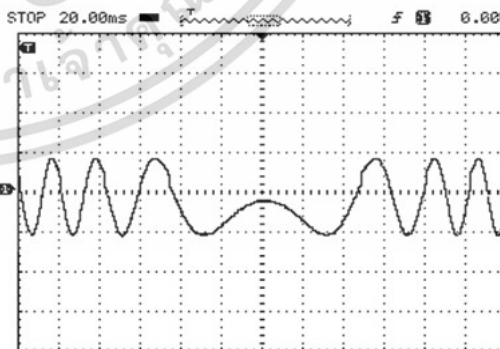
(ผลการทดสอบ)

รูปที่ 6.4 สัญญาณไซน์อ้างอิงความถี่ค่าที่ 1 Hz และกรอบอ้างอิงแกน dq คงที่ 1 V

โครงข่ายประสาทเทียม



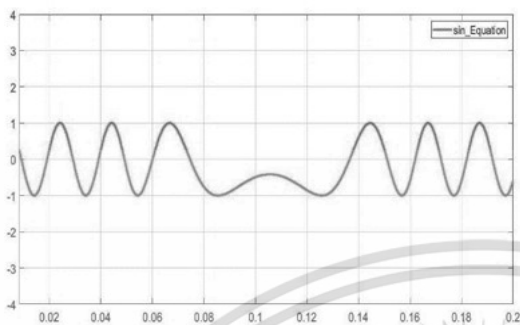
CH1 Sin wave 1 V/div



CH1 Sin wave 1 V/div

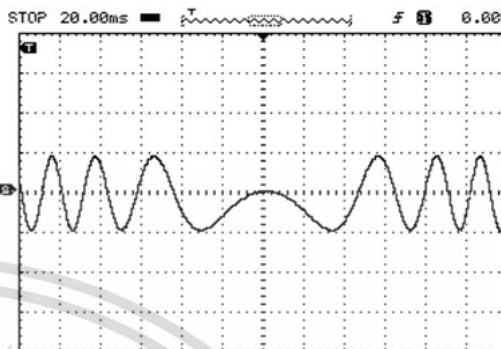
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ



CH1 Sin wave 1 V/div

(ผลการจำลอง)

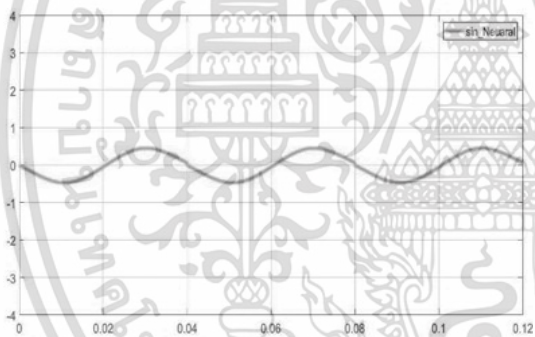


CH1 Sin wave 1 V/div

(ผลการทดสอบ)

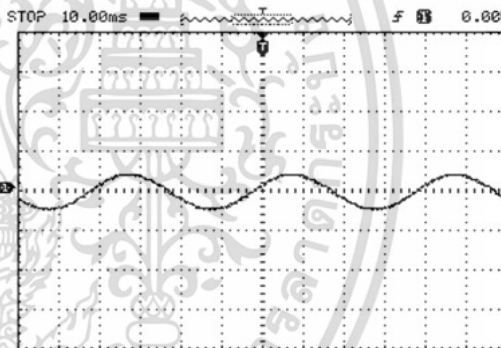
รูปที่ 6.5 สัญญาณไซน์อ้างอิงความถี่ 50 Hz กรอบอ้างอิงแกน  $dq$  คงที่ 1 V และ  $\theta_e$  เปลี่ยนมุมรีเซ็ต

โครงข่ายประสาทเทียม



CH1 Sin wave 1 V/div

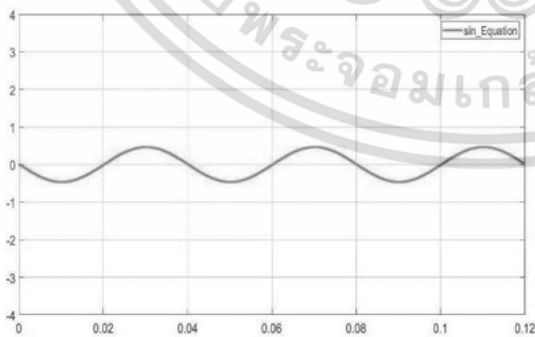
(ผลการจำลอง)



CH1 Sin wave 1 V/div

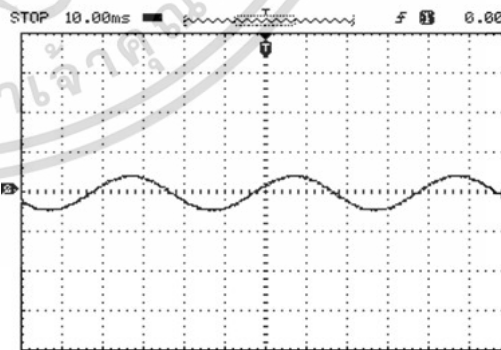
(ผลการทดสอบ)

สมการ



CH1 Sin wave 1 V/div

(ผลการจำลอง)



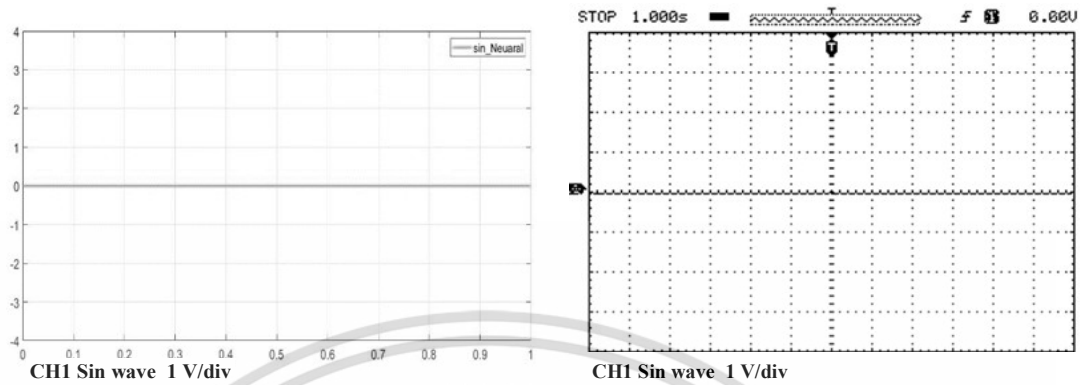
CH1 Sin wave 1 V/div

(ผลการทดสอบ)

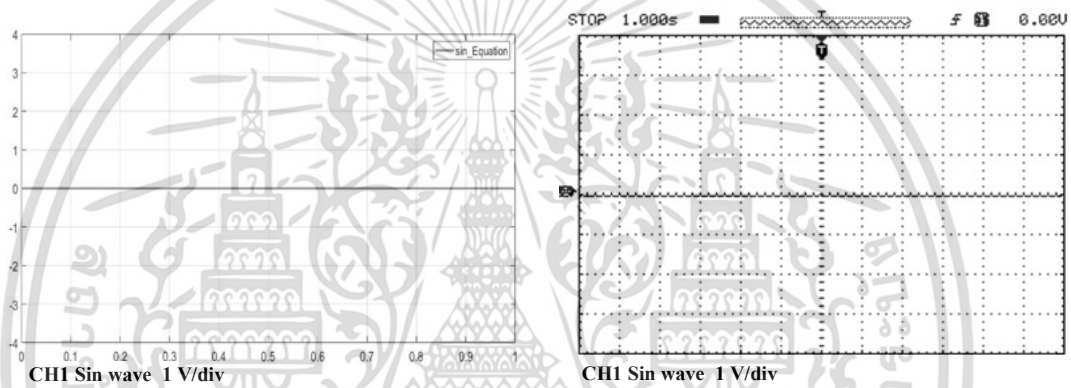
รูปที่ 6.6 สัญญาณไซน์อ้างอิงค่ากรอบอ้างอิงแกน  $dq$  เป็น 0.34 V, 0.56 V ความถี่คงที่ 25Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โครงข่ายประสาทเทียม



สมการ



(ผลการจำลอง)

(ผลการทดสอบ)

รูปที่ 6.7 สัญญาณไซน์อ้างอิงค่าความถี่และกรอบอ้างอิงแกน  $dq$  เป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหัวข้อขั้นต้นแสดงให้เห็นผลการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมในสถานะต่าง ๆ โดยจากผลการจำลองและผลการทดสอบนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันและเมื่อทำการสอบเทียบกับสมการ การแปลงแกนหมุนอ้างอิงสองเฟสให้อยู่ในแกนอ้างอิงสามเฟสหรืออินเวอร์สแบบปาร์ค-คลาร์ก สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

-ความถี่สูงค่าที่ 57.4Hz กรอบอ้างอิงแกน  $dq$  คงที่ 1 V และมุมรีเซ็ต  $\theta_e$  ที่  $2\pi$  rad

จากรูปที่ 6.3 การทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมยังมีความผิดเพี้ยนในช่วงสัญญาณไซน์ขอบขาลงช่วง  $\frac{11\pi}{6}$  เกิดจากการการรีเซ็ตเริ่มใหม่ของค่า  $\theta_e$  เพื่อที่จะทำให้สัญญาณไซน์ที่โครงข่ายประสาทเทียมสร้างขึ้นในลูกคลื่นถัดไปเริ่มต้นที่มุม 0 โดยจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 6.8 และในส่วนของแอมพลิจูดจะอยู่ที่ 1 V ซึ่งมีผลการตอบสนองที่เป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้ทำการสอนของตัวโครงข่ายประสาทเทียม

-ความถี่ต่ำค่าที่ 1 Hz และกรอบอ้างอิงแกน  $dq$  คงที่ 1 V และมุมรีเซ็ต  $\theta_e$  ที่  $2\pi$  rad

จากรูปที่ 6.4 ซึ่งจะเหมือนกับกับสถานะความถี่สูงในช่วงที่ความถี่ 1 Hz นั้นจะเห็นได้อย่างชัดเจนในคาบเวลาที่ค่า  $\theta_e$  รีเซ็ตเริ่มที่มุม  $\frac{11\pi}{6}$  ในส่วนของแอมพลิจูดจะอยู่ที่ 1 V ตามเงื่อนไขที่ได้ทำการฝึกสอน

-ความถี่ที่ 50 Hz กรอบอ้างอิงแกน  $dq$  คงที่ 1 V และมุมรีเซ็ต  $\theta_e$  ที่ 0 rad เปลี่ยนเป็น  $2\pi$  rad

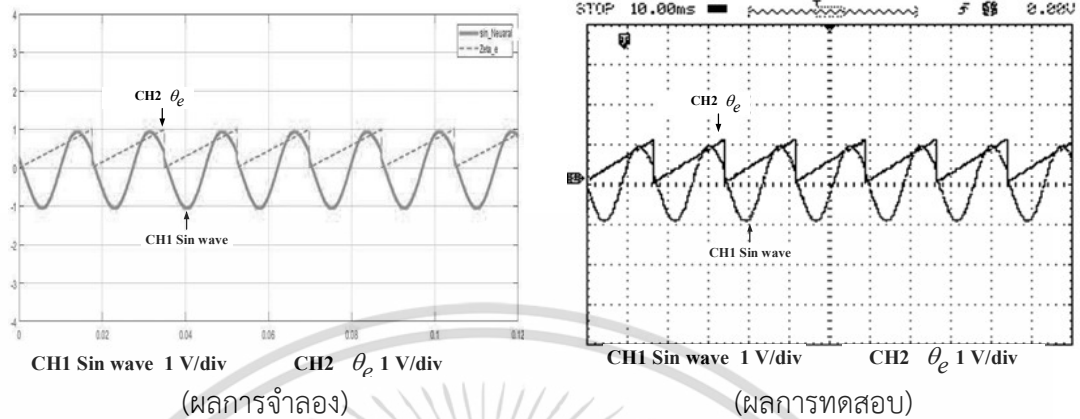
จากรูปที่ 6.5 การสร้างสัญญาณไซน์ยังมีความผิดเพี้ยนเล็กน้อยในช่วงเวลาที่ความถี่คงที่การรีเซ็ตเริ่มใหม่ของค่า  $\theta_e$  จะเริ่มที่ 0 แต่เมื่อเปลี่ยนมุมรีเซ็ตนั้นจะเห็นได้ว่าค่าของ  $\theta_e$  จะไม่ถูกรีเซ็ตแต่จะทำงานต่อเนื่องโดยการสลับด้านมุมการทำงานและเริ่มรีเซ็ตใหม่ในช่วงที่  $2\pi$  โดยจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 6.9

-ค่า กรอบอ้างอิงแกน  $dq$  เป็น 0.34 V, 0.56 V ความถี่คงที่ 25Hz และมุมรีเซ็ต  $\theta_e$  ที่  $2\pi$  rad

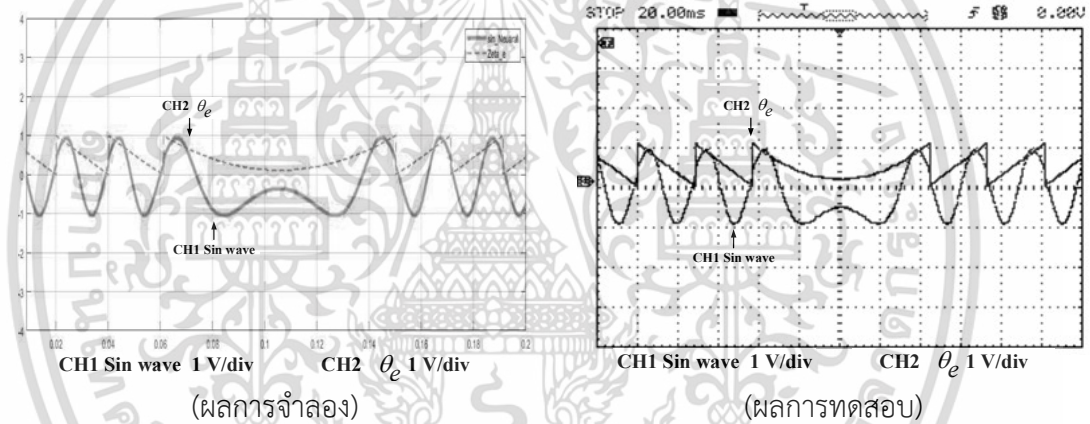
จากรูปที่ 6.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อแอมพลิจูดกรอบอ้างอิงแกน  $dq$  ลดลงสัญญาณไซน์ที่โครงข่ายประสาทเทียมสร้างขึ้นจะคล้ายกับสมการ นั้นหมายความว่าแอมพลิจูดกรอบอ้างอิงแกน  $dq$  น้อยลง การรีเซ็ตค่าของ  $\theta_e$  นั้นจะเข้าใกล้  $2\pi$  มากขึ้น โดยจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 6.10 เนื่องจากแอมพลิจูดขอบเขตในการทำนายของข้อมูลลดลงทำให้โครงข่ายมีการประมวลผลข้อมูลได้ดีขึ้นและนอกจากนี้ก็ยังขึ้นอยู่กับการฝึกสอนของตัวโครงข่าย

-ค่าความถี่และค่ากรอบอ้างอิงแกน  $dq$  เป็นศูนย์

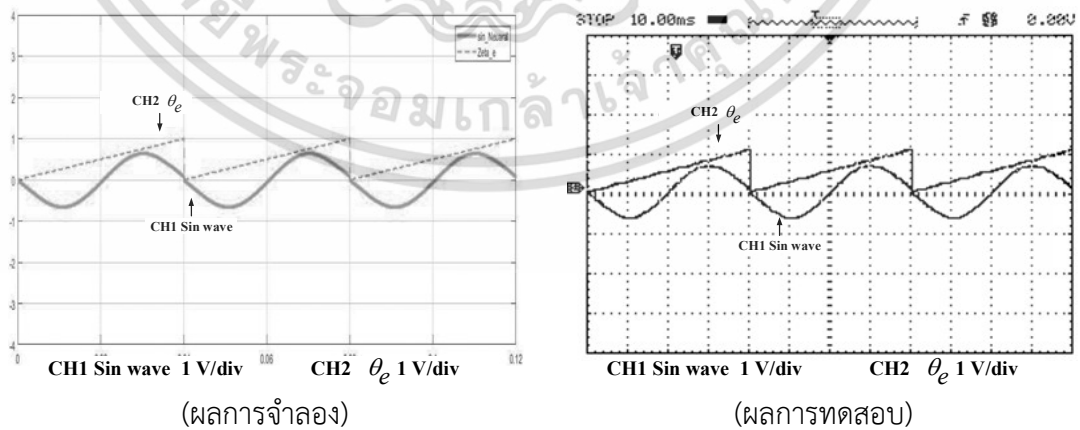
จากรูปที่ 6.7 การทำงานในสถานะนี้สอดคล้องกับสมการ เนื่องจากค่าเริ่มต้นในการทำนายของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นศูนย์



รูปที่ 6.8 สัญญาณไซน์อ้างอิงและ  $\theta_e$  ความถี่สูงค่าที่ 57.4Hz และกรอบอ้างอิงแกน dq คงที่ 1 V



รูปที่ 6.9 สัญญาณไซน์อ้างอิงและ  $\theta_e$  ที่มุมเปลี่ยนแปลง ความถี่ 50Hz กรอบอ้างอิงแกน dq คงที่ 1 V



รูปที่ 6.10 สัญญาณไซน์อ้างอิงและ  $\theta_e$  ค่ากรอบอ้างอิงแกน dq เป็น 0.34V, 0.56V ความถี่คงที่ 25Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.3 จำลองเปรียบเทียบทดสอบการควบคุมความเร็วรอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

### 6.3.1 ผลการตอบสนองทางพลวัตของการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

ในหัวข้อนี้ได้แสดงผลการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ใช้หลักการแบบเวกเตอร์ทางอ้อมเวกเตอร์ที่ควบคุมด้วยโครงข่ายประสาทเทียมและได้ผลการตอบสนองของระบบโดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

กำหนดให้ความเร็วรอบ ( $\omega$ ) ของมอเตอร์หมุนที่ 157.6 rad/s หรือ 1500 rpm

กำหนดค่าฟลักซ์ ( $\lambda$ ) คงที่ เท่ากับ 0.62 Wb

กำหนดแหล่งจ่าย  $V_{dc}$  เท่ากับ 360 V

จ่ายโหลดชั่วขณะให้มอเตอร์ที่ 4 N.m

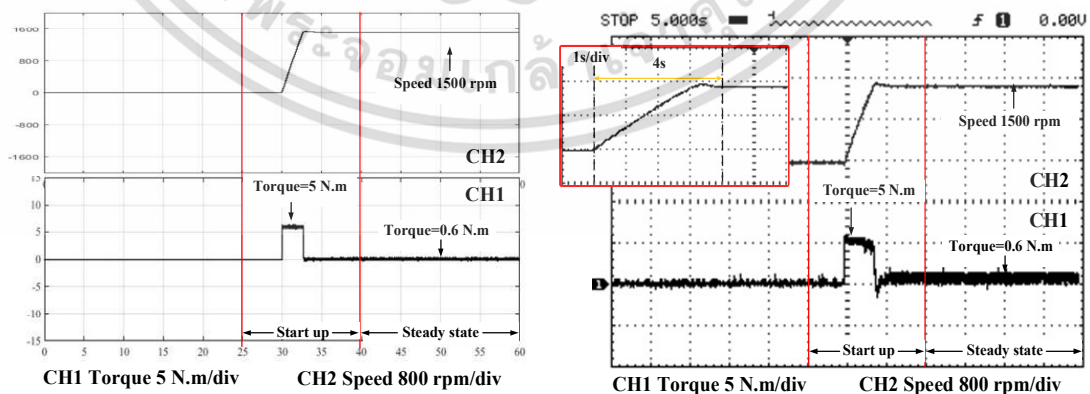
ซึ่งจะทำการแบ่งการทดสอบ 5 สภาวะดังนี้

- เริ่มต้นการหมุนของมอเตอร์
- เพิ่มโหลดและปลดโหลด
- กลับทิศทางหมุนของมอเตอร์
- มอเตอร์หยุดนิ่งเป็นศูนย์
- เปลี่ยนความเร็วรอบความเร็วรอบของมอเตอร์

จากการทดสอบที่กล่าวมาแสดงผลเปรียบเทียบการจำลองที่อยู่ทางด้านซ้ายและผลการทดสอบที่อยู่ทางด้านขวา แสดงได้ดังนี้

- เริ่มต้นการหมุนของมอเตอร์

ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดสอบความเร็วรอบและแรงบิด



(ผลการจำลอง)

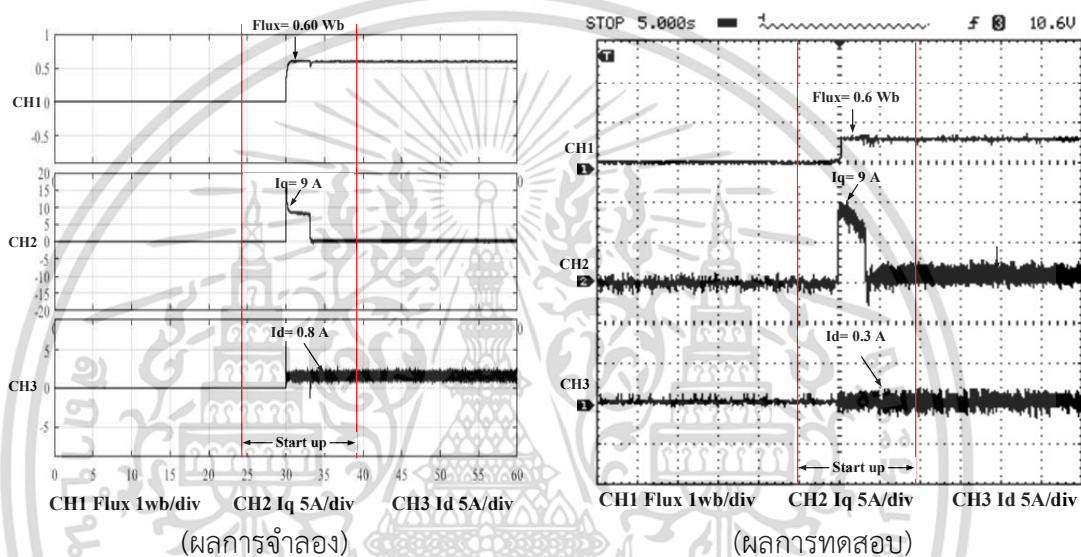
(ผลการทดสอบ)

รูปที่ 6.11 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ ความเร็วรอบ,แรงบิด สภาวะเริ่มต้นการหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากรูปที่ 6.11 เมื่อพิจารณาผลของความเร็วมอเตอร์ที่อยู่ (CH2) จะเห็นว่ามอเตอร์เริ่มสตาร์ท เข้าสู่สภาวะคงที่ 1500 rpm ภายในเวลา 4 s และมีความเร็วเกิน(Over speed)อยู่ที่ 1.5% ต่อมาพิจารณาผลของแรงบิดของมอเตอร์(CH1) เมื่อเริ่มสตาร์ท แรงบิดจะมีค่าที่ 5 N.m และเมื่อความเร็วของมอเตอร์ได้เข้าสู่สภาวะคงที่แรงบิดจะมีค่าเท่ากับ 0 N.m เนื่องจากมอเตอร์ไม่มีภาระโหลด ซึ่งผลจากการจำลองและทดสอบมีการตอบสนองไปในทิศทางเดียวกัน

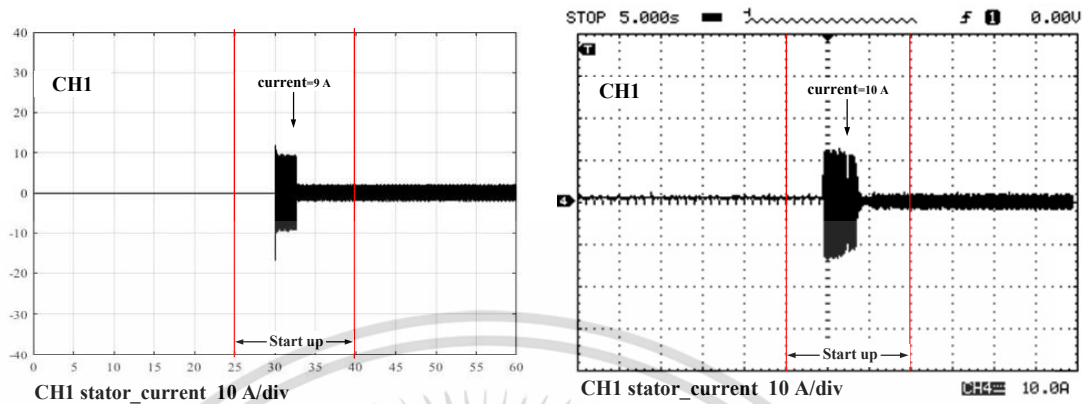
ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดสอบ โรเตอร์ฟลักซ์ค่านวน, กระแสแกน  $q$  และกระแสแกน  $d$



รูปที่ 6.12 จำลองเปรียบเทียบทดสอบโรเตอร์ฟลักซ์ค่านวน, กระแสแกน  $dq$  สภาวะเริ่มต้นหมุน

ผลจากรูปที่ 6.12 เมื่อพิจารณาผลของฟลักซ์(CH1) จะเห็นว่าเริ่มสตาร์ทมอเตอร์ โรเตอร์ฟลักซ์อยู่ที่ 0.62 Wb ตามที่ได้กำหนดฟลักซ์อ้างอิงไว้ ต่อมาพิจารณากระแส  $i_q$  (CH2) พบว่ามีค่า 9 A เนื่องจากมอเตอร์ต้องการแรงบิดเริ่มสตาร์ทที่สูงและเมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์ได้เข้าสู่สภาวะคงที่กระแส  $i_q$  จะมีค่าเท่ากับ 0 A ต่อมาเมื่อพิจารณากระแส  $i_d$  (CH3) จะเห็นว่าเมื่อมอเตอร์เริ่มสตาร์ท ผลการจำลองของกระแส  $i_d$  คงตัวอยู่ที่ 0.8 A เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองจะคงตัวอยู่ที่ 0.3 A

ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดสอบกระแสมอเตอร์



(ผลการจำลอง)

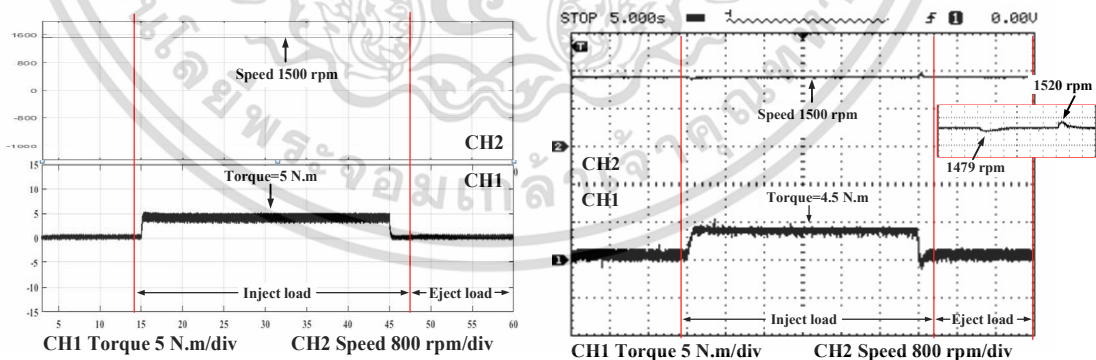
(ผลการทดสอบ)

รูปที่ 6.13 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ กระแสมอเตอร์ สภาวะเริ่มต้นการหมุน

ผลจากรูปที่ 6.13 เมื่อพิจารณาผลของกระแสของมอเตอร์ (CH1) จะเห็นว่าเริ่มสตาร์ทมอเตอร์ ผลของการตอบสนองของกระแสจากการทดลองจะอยู่ที่  $9 A_{max}$  เปรียบเทียบกับผลการทดสอบจะอยู่ที่  $10 A_{max}$  ซึ่งมีความแตกต่างกันอยู่ที่  $1 A_{max}$

-เพิ่มโหลดและปลดโหลด

ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดสอบความเร็วรอบและแรงบิด



(ผลการจำลอง)

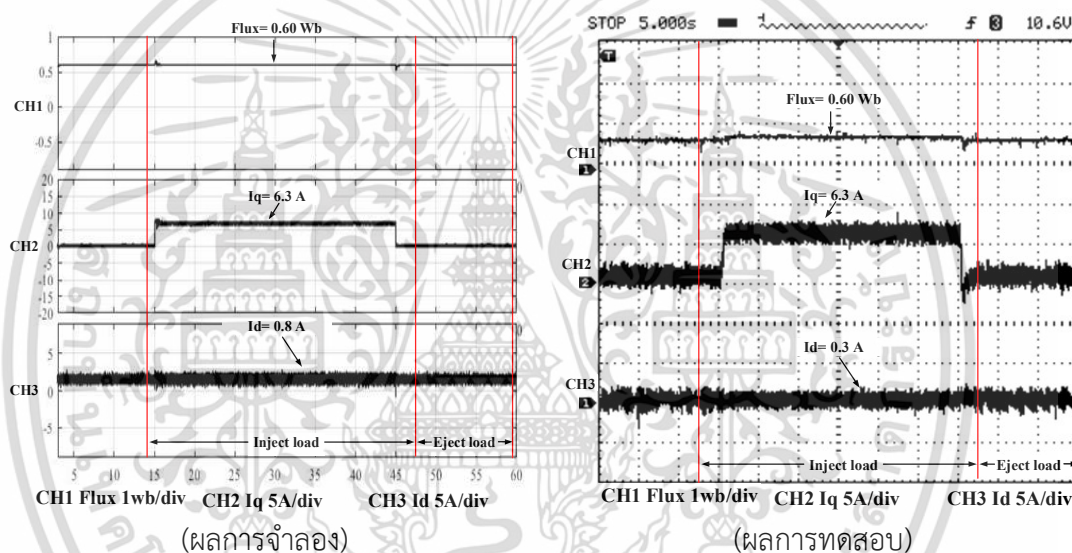
(ผลการทดสอบ)

รูปที่ 6.14 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ ความเร็วรอบ,แรงบิด สภาวะเพิ่มโหลดปลดโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากรูปที่ 6.14 เมื่อพิจารณาผลของความเร็วมอเตอร์ (CH2) จะเห็นว่าในสถานะที่มีการเพิ่มโหลด 4 N.m ความเร็วรอบมีการลดลง 1479 rpm และฟื้นตัวขึ้นมาที่สภาวะคงที่ 1500 rpm เช่นเดิมโดยใช้เวลา 400 ms ต่อมาเมื่อปลดโหลด ออกจากมอเตอร์พบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีลักษณะพุ่งขึ้นที่ 1520 rpm และลดระดับลงมาสู่สภาวะคงที่เช่นเดิมโดยใช้เวลา 200 ms ซึ่งการตอบสนองของแรงบิด (CH2) อยู่ที่ 4.5 N.m เมื่อมีการจ่ายโหลดเพิ่มขึ้นและเมื่อปลดโหลดแรงบิดจะเข้าใกล้ 0 N.m ซึ่งผลจากการจำลองและทดสอบมีการตอบสนองไปในทิศทางเดียวกัน

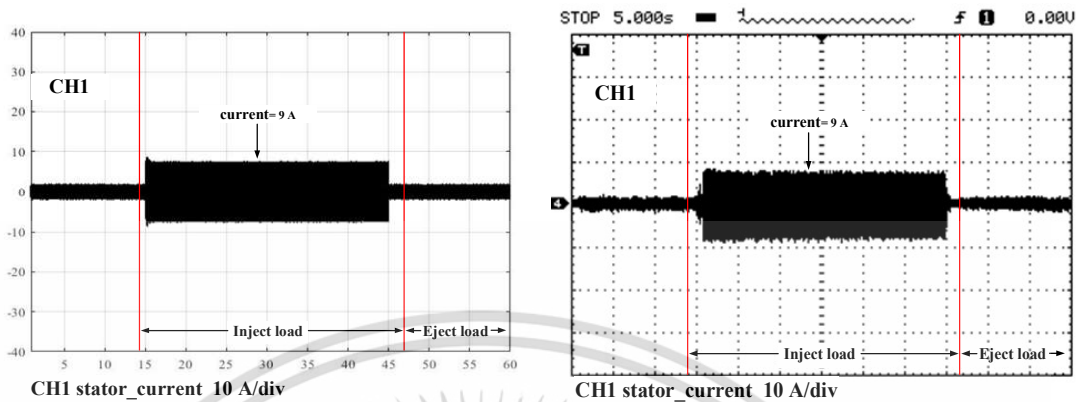
ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดสอบ โรเตอร์ฟลักซ์ค่านวน, กระแสแกน  $q$  และกระแสแกน  $d$



รูปที่ 6.15 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ โรเตอร์ฟลักซ์ค่านวน, กระแสแกน  $dq$  เพิ่มโหลดปลดโหลด

ผลจากรูปที่ 6.15 พิจารณาผลของฟลักซ์ (CH1) จะเห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มโหลดและปลดโหลดให้มอเตอร์ฟลักซ์อยู่ที่ 0.62 Wb คงที่ ต่อมาพิจารณากระแส  $i_q$  พบว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะโหลดพิจารณาจากรูป (CH2) เมื่อมีการเพิ่มโหลดให้มอเตอร์กระแส  $i_q$  จะเพิ่มขึ้นเป็น 6.3 A และปลดโหลดจะมีค่าเข้าใกล้ 0 A ต่อมาพิจารณากระแส  $i_d$  (CH3) พบที่มีการตอบสนองคงที่เมื่อมีการเพิ่มโหลดและปลดโหลดอยู่ที่ 0.8 A เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองจะคงตัวอยู่ที่ 0.3 A

ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดสอบกระแสมอเตอร์



(ผลการจำลอง)

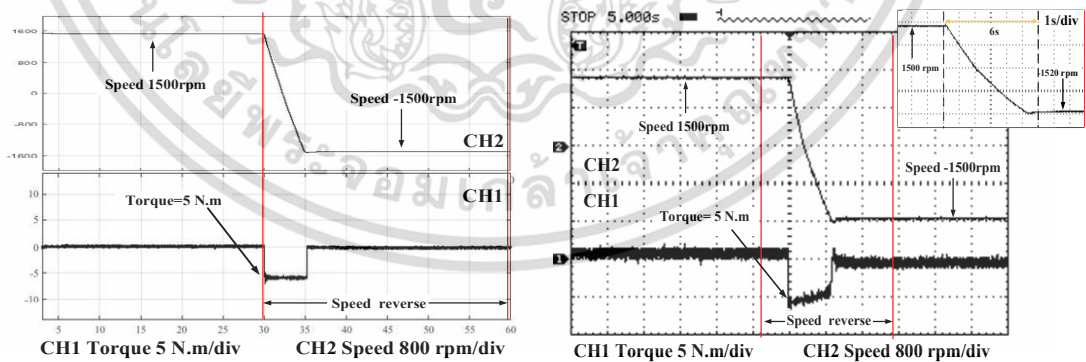
(ผลการทดสอบ)

รูปที่ 6.16 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ กระแสมอเตอร์ เพิ่มโหลดปลดโหลด

ผลจากรูปที่ 6.16 เมื่อพิจารณาผลของกระแสของมอเตอร์ (CH1) จะเห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มโหลดให้มอเตอร์ผลการตอบสนองของกระแสจะอยู่ที่  $9 A_{max}$  และเมื่อปลดโหลดกระแสของมอเตอร์จะอยู่ที่  $0.62 A_{max}$  ซึ่งผลจากการจำลองและทดสอบมีการตอบสนองไปในทิศทางเดียวกัน

-กลับทิศทางหมุนของมอเตอร์

ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดสอบ ความเร็วรอบและแรงบิด



(ผลการจำลอง)

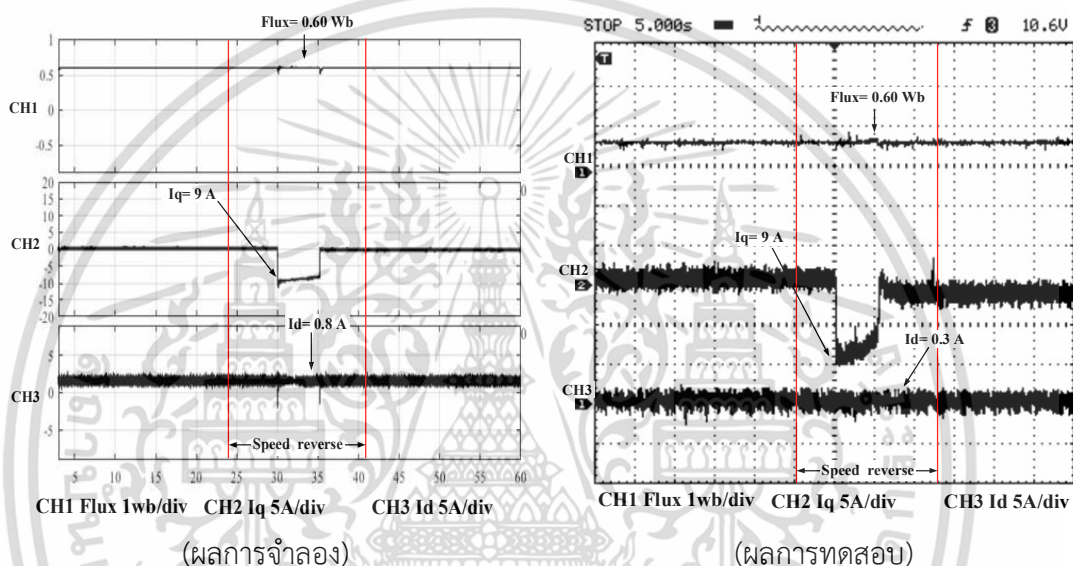
(ผลการทดสอบ)

รูปที่ 6.17 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ ความเร็วรอบ,แรงบิด กลับทิศทางหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากรูปที่ 6.17 เมื่อพิจารณาผลของความเร็วมอเตอร์ (CH2) จะเห็นว่าในสภาวะกลับทิศทางหมุนจาก 1500 rpm เป็น -1500 rpm ใช้เวลาในการกลับทางหมุนเพียง 6 s ซึ่งการตอบสนองของแรงบิด (CH2) จะเปลี่ยนจาก 0 N.m เป็น -5 N.m หลังจากความเร็วของมอเตอร์เข้าสู่ -1500 rpm แรงบิดจะลู่เข้าใกล้ 0 N.m ผลจากการจำลองและทดสอบมีการตอบสนองที่คล้ายกัน โดยผลการทดสอบจะช้ากว่าผลการจำลองที่ 1 s

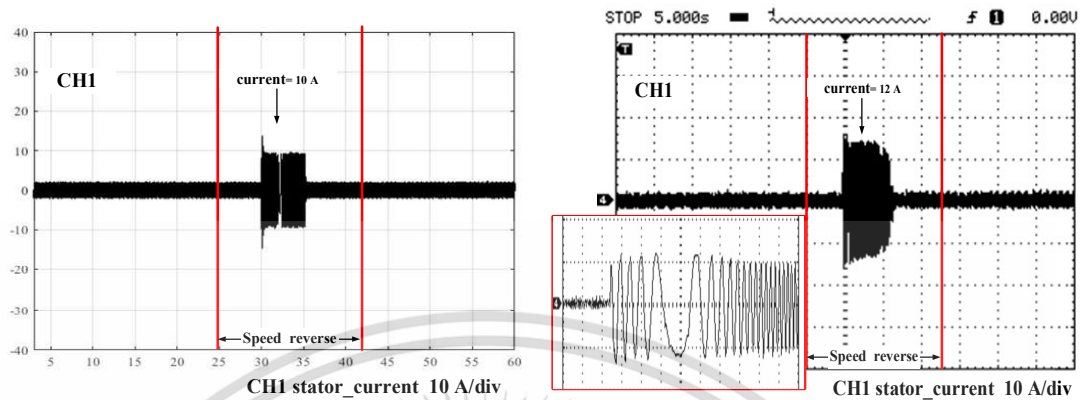
ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดสอบโรเตอร์ฟลักซ์ค่านวน, กระแสแกน  $q$  และกระแสแกน  $d$



รูปที่ 6.18 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ โรเตอร์ฟลักซ์ค่านวน, กระแสแกน  $dq$  กลับทิศทางหมุน

ผลจากรูปที่ 6.18 เมื่อพิจารณาผลของฟลักซ์ (CH1) จะเห็นว่าในสภาวะกลับทางหมุนฟลักซ์อยู่ที่ 0.62 Wb คงที่ ต่อมาพิจารณากระแส  $i_q$  พบว่าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามแรงบิด พิจารณาจากรูป (CH2) เมื่อมอเตอร์กลับทิศทางหมุนกระแส  $i_q$  จะเพิ่มขึ้น -9 A และลดลงมาเข้าใกล้ 0 A เมื่อความเร็วของมอเตอร์อยู่ที่ -1500 rpm ต่อมาพิจารณากระแส  $i_d$  (CH3) พบว่ามีการตอบสนองคงตัวอยู่ที่ 0.8 A เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองจะคงตัวอยู่ที่ 0.3 A

ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดสอบกระแสมอเตอร์



(ผลการจำลอง)

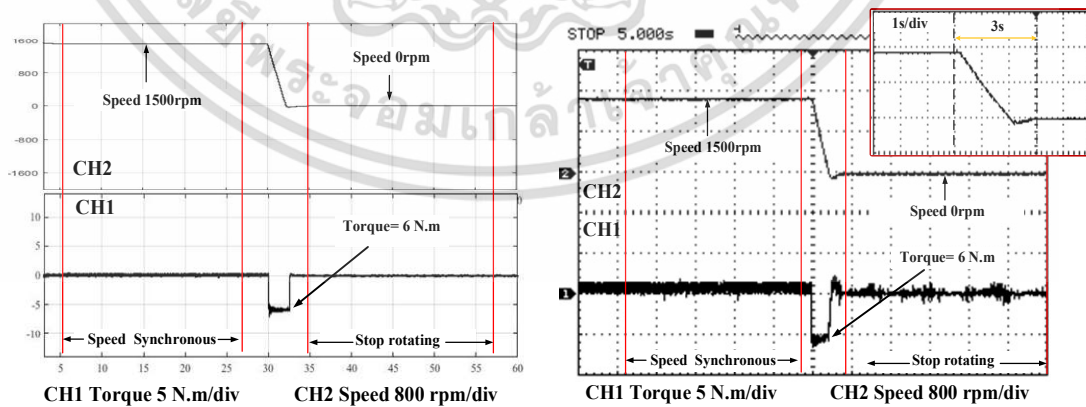
(ผลการทดสอบ)

รูปที่ 6.19 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ กระแสมอเตอร์ กลับทิศทางหมุน

ผลจากรูปที่ 6.19 เมื่อพิจารณาผลของกระแสของมอเตอร์ (CH1) จะเห็นว่าเมื่อมีการกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์ผลการตอบสนองของกระแสความถี่จะลดลงชั่วขณะจากนั้นจะเพิ่มขึ้นจนถึง 50 Hz เช่นเดิม ขนาดพิกัดกระแสขณะที่มอเตอร์กลับทิศทางหมุนจะอยู่ที่  $12 A_{max}$  โดยใช้ระยะเวลา 6 s จากนั้นเมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์เข้าสู่ -1500 rpm กระแสมอเตอร์ลดลงเหลือ  $0.62 A_{max}$  ซึ่งผลจากการจำลองและทดสอบมีการตอบสนองที่คล้ายกัน

-มอเตอร์หยุดนิ่งเป็นศูนย์

ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดสอบความเร็วรอบและแรงบิด



(ผลการจำลอง)

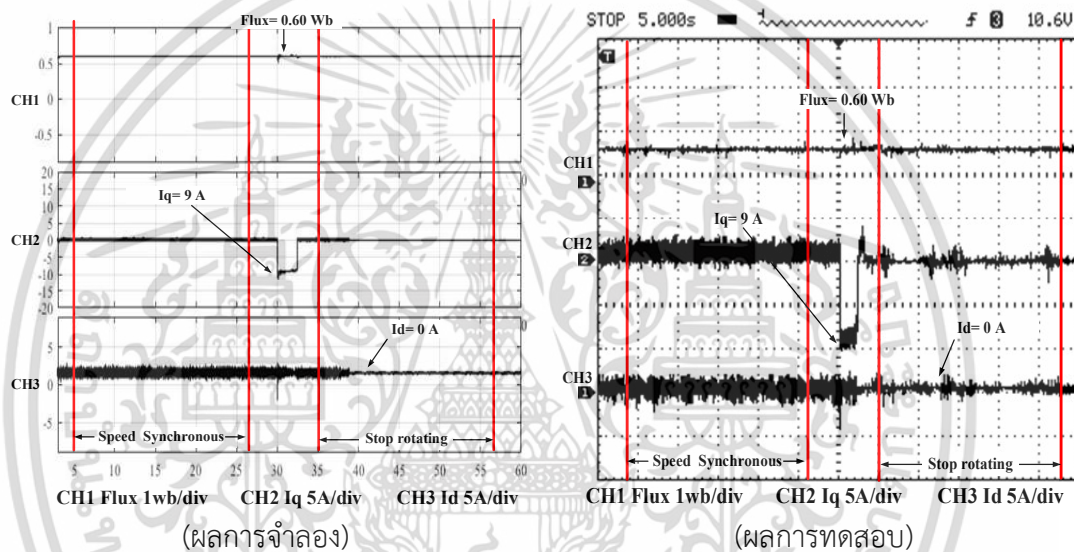
(ผลการทดสอบ)

รูปที่ 6.20 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ ความเร็วรอบ,แรงบิด มอเตอร์หยุดนิ่งเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากรูปที่ 6.20 เมื่อพิจารณาผลของความเร็วมอเตอร์(CH2) จะเห็นว่าในสภาวะเบรกจาก 1500 rpm เป็น 0 rpm ใช้เวลาในการเบรก 2 s ซึ่งการตอบสนองของแรงบิด (CH2) ขณะเบรกเป็น -5 N.m จากนั้นลดลงเข้าใกล้ 0 N.m เมื่อความเร็วเป็น 0 rpm ใช้เวลา 2 s ผลจากการจำลองและทดสอบมีการตอบสนองที่คล้ายกัน โดยผลการทดสอบจะเร็วกว่าผลการจำลองที่ 1 s

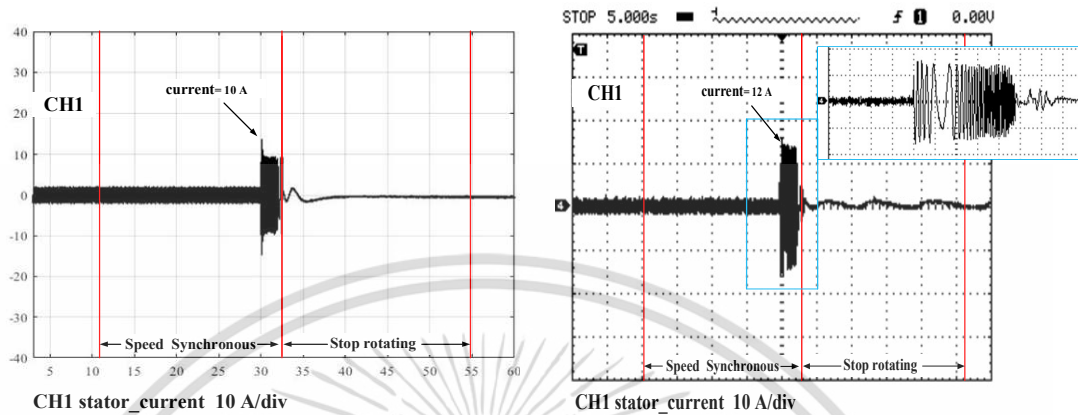
ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดสอบโรเตอร์ฟลักซ์ค่านวน, กระแสแกน  $q$  และกระแสแกน  $d$



รูปที่ 6.21 จำลองเปรียบเทียบทดสอบโรเตอร์ฟลักซ์ค่านวน, กระแสแกน  $dq$  มอเตอร์หยุดนิ่งเป็นศูนย์

ผลจากรูปที่ 6.21 เมื่อพิจารณาผลของฟลักซ์ (CH1) จะเห็นว่าในสภาวะเบรก ฟลักซ์อยู่ที่ 0.62 Wb คงที่ ต่อมาพิจารณากระแส  $i_q$  พบว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงคล้ายแรงบิดพิจารณาจากรูป (CH2) เมื่อมอเตอร์เบรกกระแส  $i_q$  จะเพิ่มขึ้นชั่วขณะ -9 A และลดลงมาเข้าใกล้ 0 A ต่อมาพิจารณากระแส  $i_d$  (CH3) พบที่มีการตอบสนองคงตัวอยู่ที่ 0.8 A เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองจะคงตัวอยู่ที่ 0.3 A

ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดสอบกระแสมอเตอร์



(ผลการจำลอง)

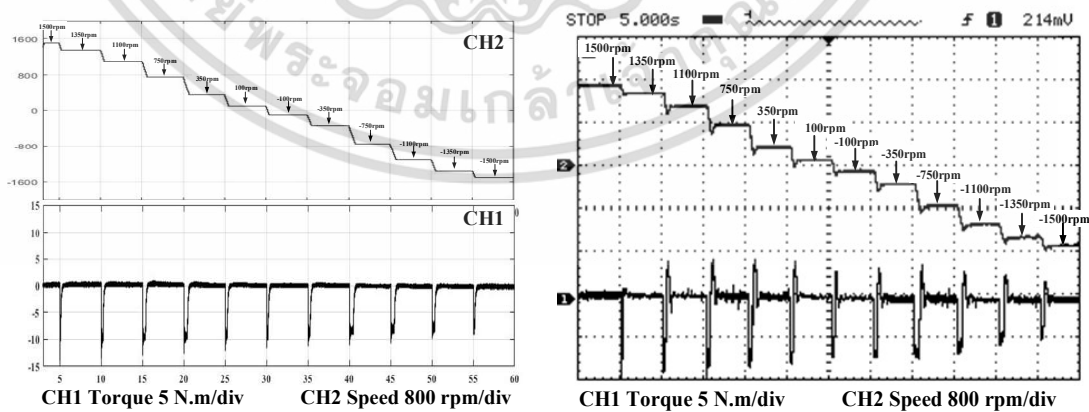
(ผลการทดสอบ)

รูปที่ 6.22 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ กระแสมอเตอร์ สภาวะมอเตอร์หยุดนิ่งเป็นศูนย์

ผลจากรูปที่ 6.22 เมื่อพิจารณาผลของกระแสของมอเตอร์(CH1) จะเห็นว่าเมื่อสั่งเบรกมอเตอร์ ผลการตอบสนองของกระแสจะเปลี่ยนความถี่จาก 50 Hz และลดลงเข้าใกล้ 0 Hz ซึ่งจะใช้เวลา 2.5 s ขนาดพิกัดกระแสช่วงสั่งเบรกจะอยู่ที่  $12 A_{max}$  และลดลงเหลือ  $0 A_{max}$  ซึ่งผลการจำลองและทดสอบมีการตอบสนองที่คล้ายกัน

-เปลี่ยนความเร็วรอบมอเตอร์

ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดสอบ ความเร็วรอบและแรงบิด



(ผลการจำลอง)

(ผลการทดสอบ)

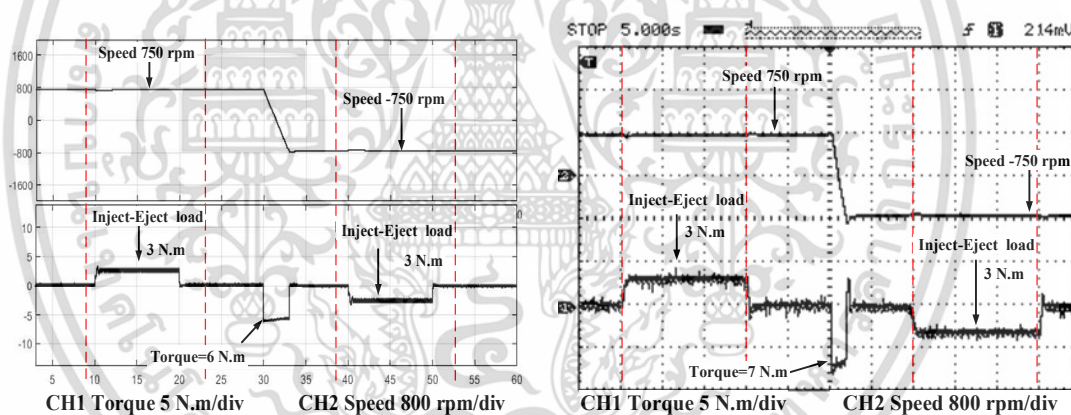
รูปที่ 6.23 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ ความเร็วรอบ,แรงบิด เปลี่ยนความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากรูปที่ 6.23 เป็นการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์แบบฉับพลันตามคำสั่ง โดยมีระดับความเร็วมอเตอร์เริ่มทำงานที่ระดับ 1 ถึงระดับที่ 6 จากนั้นกลับทิศทางหมุนมอเตอร์โดยเริ่มจากระดับที่ 6 ถึงระดับที่ 1 โดยแต่ละระดับจะเป็นความเร็วรอบดังนี้

ระดับที่ 1 ความเร็วรอบ 1500rpm เริ่มทำงาน 0 s กลับทางหมุน 55s  
 ระดับที่ 2 ความเร็วรอบ 1350rpm เริ่มทำงาน 5s กลับทางหมุน 50s  
 ระดับที่ 3 ความเร็วรอบ 1100rpm เริ่มทำงาน 10s กลับทางหมุน 45s  
 ระดับที่ 4 ความเร็วรอบ 750rpm เริ่มทำงาน 15s กลับทางหมุน 40s  
 ระดับที่ 5 ความเร็วรอบ 350rpm เริ่มทำงาน 20s กลับทางหมุน 35s  
 ระดับที่ 6 ความเร็วรอบ 100rpm เริ่มทำงาน 25s กลับทางหมุน 30s

จากการจำลองและทดสอบการตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งสามารถตอบสนองต่อคำสั่งได้ในสภาวะเริ่มทำงานและในสภาวะกลับทางหมุนที่ได้กำหนดไว้ตามลำดับ

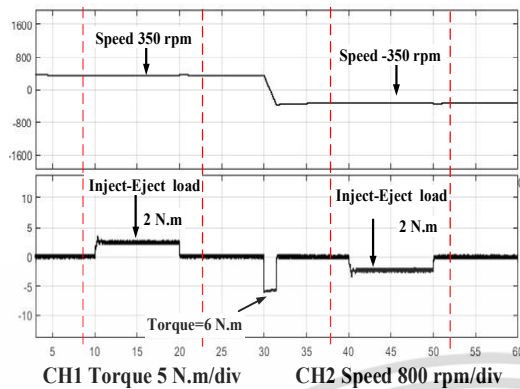


(ผลการจำลอง)

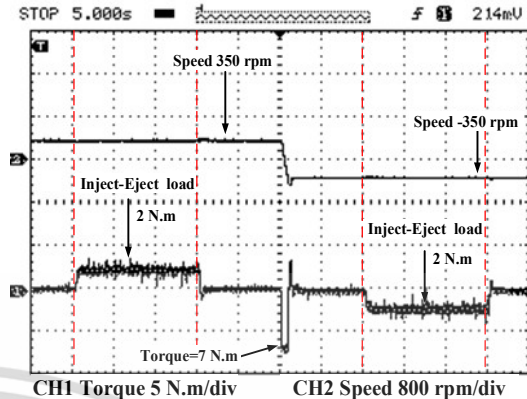
(ผลการทดสอบ)

รูปที่ 6.24 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ ความเร็วรอบ,แรงบิด ที่ความเร็วรอบ 750rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



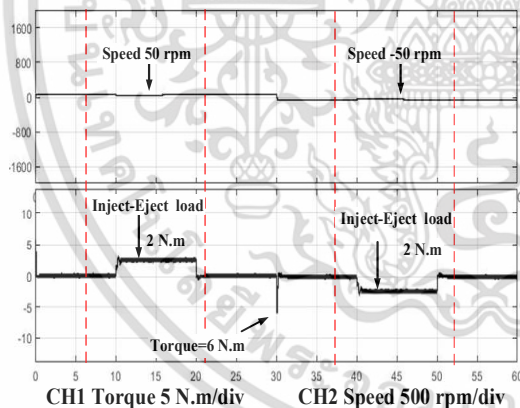
(ผลการจำลอง)



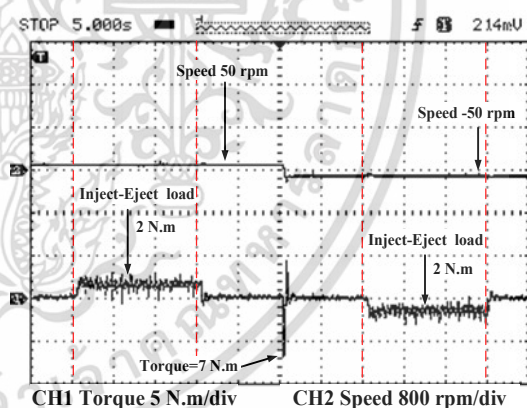
(ผลการทดสอบ)

รูปที่ 6.25 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ ความเร็วรอบ,แรงบิด ที่ความเร็วรอบ 350 rpm

ผลจากรูปที่ 6.25 เป็นการทดสอบการเพิ่มโหลดชั่วขณะในสภาวะความเร็วรอบที่ 350 rpm และกลับทางหมุน ผลการทดสอบความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ได้ ในส่วนของแรงบิดขณะที่มีการเพิ่มโหลดอยู่ที่ 2 N.m สภาวะกลับทางหมุนแรงบิดจะเพิ่มขึ้น 7 N.m จากนั้นลดลงเข้าใกล้ 0 N.m เมื่อความเร็วมอเตอร์เป็น -350rpm



(ผลการจำลอง)



(ผลการทดสอบ)

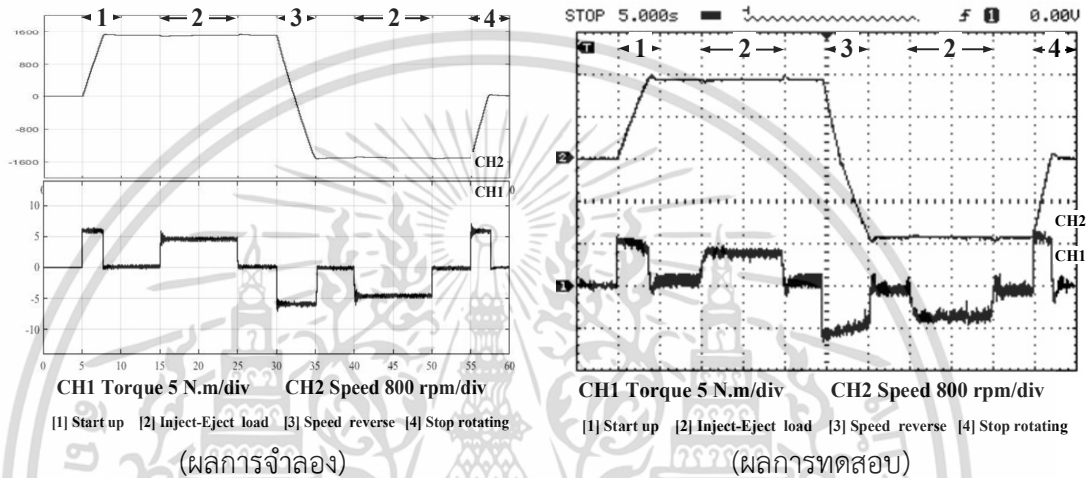
รูปที่ 6.26 จำลองเปรียบเทียบทดสอบ ความเร็วรอบและแรงบิดที่ความเร็วรอบ 50 rpm

ผลจากรูปที่ 6.26 เป็นการทดสอบการเพิ่มโหลดชั่วขณะในสภาวะความเร็วรอบที่ 50 rpm และกลับทางหมุน ผลการทดสอบความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ได้ ในส่วนของแรงบิดขณะที่มีการเพิ่มโหลดอยู่ที่ 2 N.m สภาวะกลับทางหมุนแรงบิดจะเพิ่มขึ้น 7 N.m จากนั้นลดลงเข้าใกล้ 0 N.m เมื่อความเร็วมอเตอร์เป็น -50 rpm

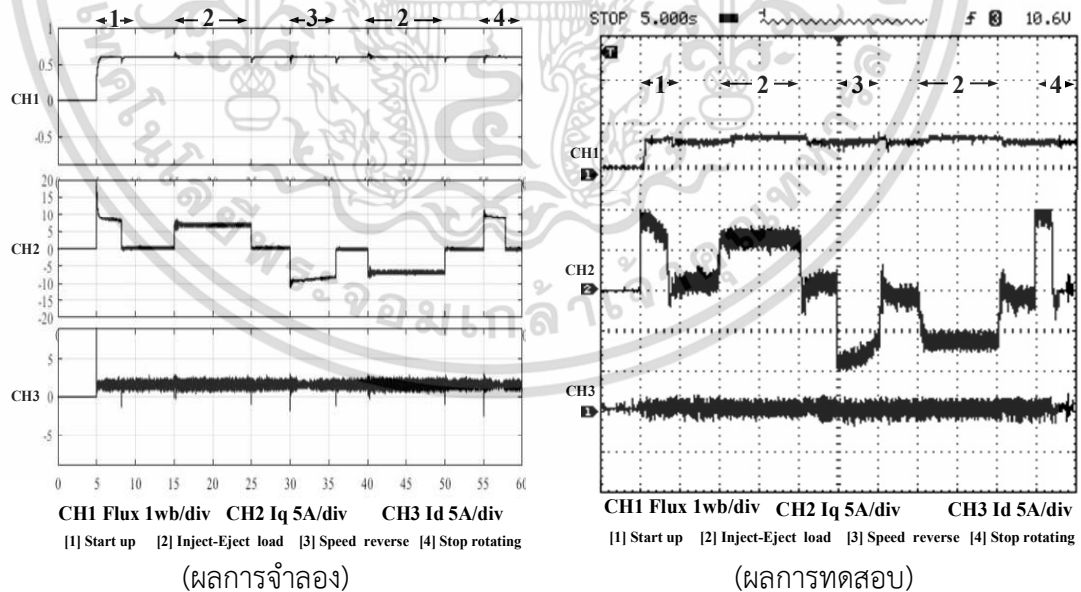
### 6.3.2 ผลการตอบสนองทางพลวัตโดยรวม

จากหัวข้อที่ได้ทำการทดสอบข้างต้นนั้น การจำลองและทดสอบการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสใช้หลักการเวกเตอร์ทางอ้อมผลการตอบสนองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งแสดงสถานะผลทดสอบโดยรวมได้ดังรูปที่ 6.27

ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดสอบ ความเร็วรอบและแรงบิด

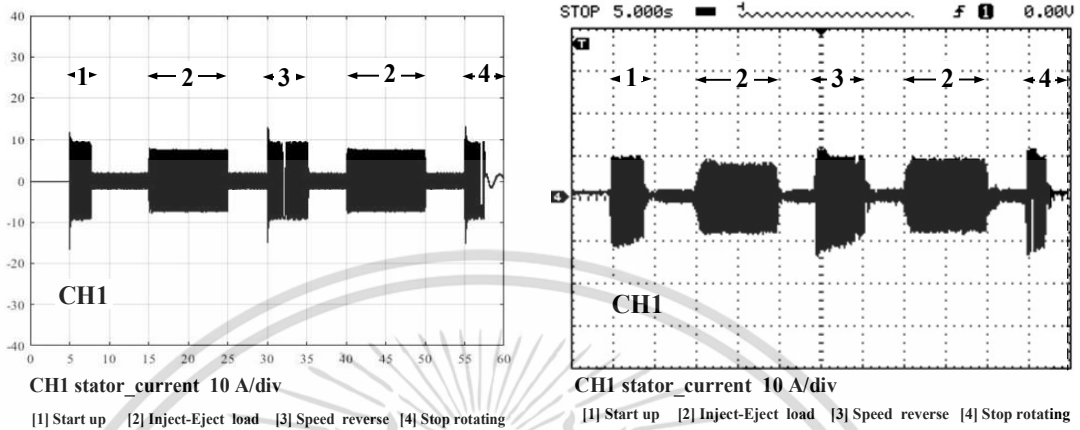


ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดสอบ โรเตอร์ฟลักซ์ค่านวน, กระแสแกน  $q$  และกระแสแกน  $d$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดสอบ กระแสมอเตอร์



(ผลการจำลอง)

(ผลการทดสอบ)

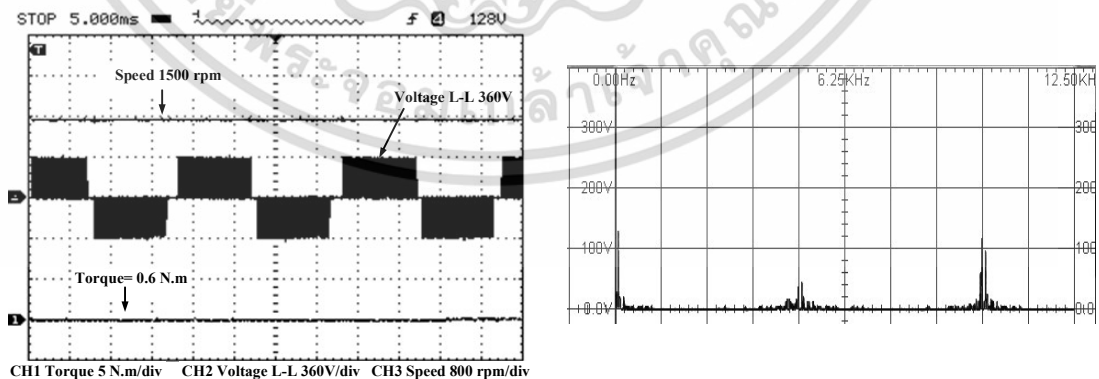
รูปที่ 6.27 ผลการตอบสนองทางพลวัตโดยรวม

เพื่อให้เห็นการตอบสนองในการทำงานที่ดีจึงทำการเปรียบเทียบกับกรควบคุมแบบดั้งเดิม (PI คอนโทรลเลอร์) ใช้หลักการควบคุมเวกเตอร์ทางอ้อมที่มีค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ตัวเดียวกันโดยพิจารณาผลการเปรียบเทียบที่ได้ในหัวข้อที่ 6.4

\*เพิ่มเติม

-แรงดันสภาวะคงที่และเพิ่มภาระทางกล

ผลการทดสอบ แรงดัน L-L และ ฮาร์มอนิกมอเตอร์ ของมอเตอร์



(แรงดัน L-L)

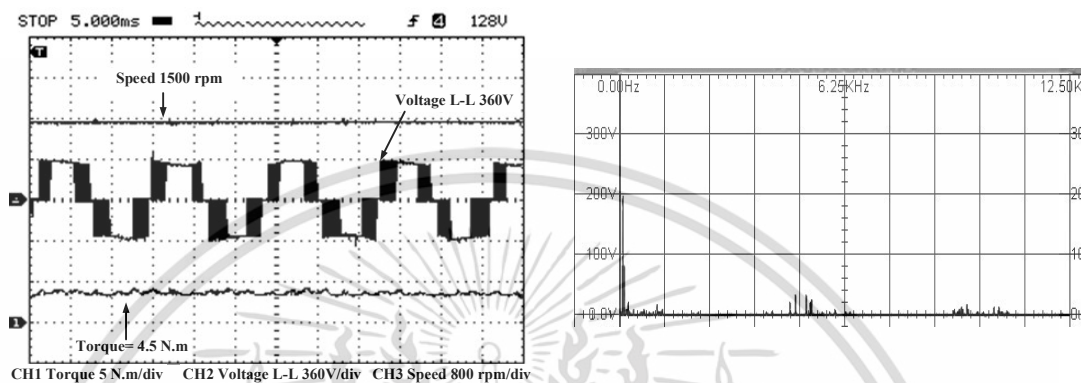
(ฮาร์มอนิกมอเตอร์)

รูปที่ 6.28 องค์ประกอบ L-L ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสความเร็วคงที่ 1500 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแรงดันที่ L-L อยู่ที่ 360 V ในสถานะที่ความเร็วของมอเตอร์คงที่ 1500 rpm แรงบิดที่สถานะคงที่ 0.6 N.m และ ลักษณะของฮาร์มอนิกส์ จะเกิดขึ้นที่ความถี่เริ่มต้น และทุก 25K Hz

ผลการทดสอบแรงดัน L-L และ ฮาร์มอนิกมอเตอร์ ที่มีภาระทางกลเพิ่มขึ้น



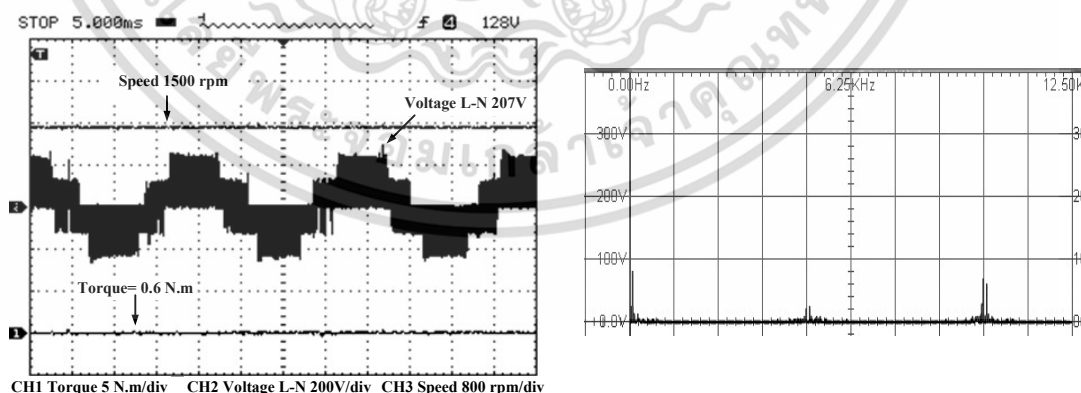
(แรงดัน L-L)

(ฮาร์มอนิกมอเตอร์)

รูปที่ 6.29 องค์ประกอบ L-L ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะเพิ่มโหลด

จากรูปแรงดันที่ L-L อยู่ที่ 360 V ในสถานะที่เพิ่มโหลดขึ้น 4 N.m และความเร็วของมอเตอร์คงที่ 1500 rpm แรงบิดเพิ่มขึ้น 4.5 N.m จะเห็นได้ว่าเกิดแรงดันสวิตซ์เกิน (Over voltage) เนื่องจากการมอดูเลชันเทียบกับสัญญาณพื้นเลื้อยเกินลิมิต เพื่อให้มีการควบคุมความเร็วมอเตอร์ในสถานะที่โหลดสูง ซึ่งจะเกิดฮาร์มอนิกระดับต่ำ อยู่ที่ 3-5-7

ผลการทดสอบ แรงดัน L-N และ ฮาร์มอนิกมอเตอร์ ของมอเตอร์



(แรงดัน L-N)

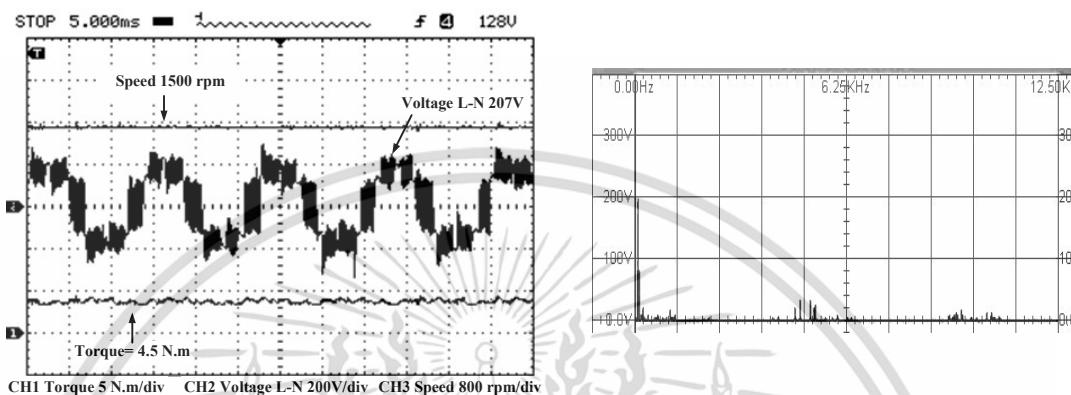
(ฮาร์มอนิกมอเตอร์)

รูปที่ 6.30 องค์ประกอบ L-N ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสความเร็วคงที่ 1500 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแรงดัน L-N อยู่ที่ 207 V ในสถานะที่ความเร็วของมอเตอร์คงที่ 1500 rpm แรงบิดที่สถานะคงที่ 0.6 N.m และ ฮาร์มอนิกมอเตอร์จะเกิดขึ้นที่ความถี่เริ่มต้น และทุก 25K Hz

ผลการทดสอบแรงดัน L-N และ ฮาร์มอนิกมอเตอร์ ที่มีภาระทางกลเพิ่มขึ้น



(แรงดัน L-N)

(ฮาร์มอนิกมอเตอร์)

รูปที่ 6.31 องค์ประกอบ L-N ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะเพิ่มโหลด

จากรูปแรงดันที่ L-N อยู่ที่ 207 V ในสถานะที่เพิ่มโหลดขึ้น 4 N.m และความเร็วของมอเตอร์คงที่ 1500 rpm แรงบิดเพิ่มขึ้น 4.5 N.m จะเห็นได้ว่าเกิดแรงดันสวิตช์เกิน เนื่องจากการมอดูเลชันเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อยเกินขีดจำกัด เพื่อให้มีการควบคุมความเร็วมอเตอร์ในสถานะที่โหลดสูง ซึ่งจะเกิดฮาร์มอนิกระดับต่ำ อยู่ที่ 3-5-7

## 6.4 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบดั้งเดิม PI เปรียบเทียบกับ โครงข่ายประสาทเทียม

ในหัวข้อนี้ได้ผลการทดสอบของการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสใช้หลักการเวกเตอร์ทางอ้อม โดยเปรียบเทียบการควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียมและตัวควบคุมแบบดั้งเดิม Pi คอนโทรลเลอร์ ที่อยู่ในรูปกระแส ออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ใช้แบบซิกโลนิโคเมื่อเทียบตารางจะได้ค่า  $K_p=0.25$  และ  $K_i=0.65$  อ้างอิงจากภาคผนวกที่ (จ) และตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมได้ออกแบบไว้ในบทที่ 5 มีตารางข้อมูลในการฝึกสอนจากภาคผนวกที่ (จ) ซึ่งการทดสอบเทียบมีเงื่อนไขดังนี้

กำหนดให้ความเร็วรอบ ( $\omega$ ) ของมอเตอร์หมุนที่ 157.6 rad/s หรือ 1500 rpm

กำหนดค่าฟลักซ์ ( $\lambda$ ) คงที่ เท่ากับ 0.62 Wb

กำหนดแหล่งจ่าย  $V_{dc}$  เท่ากับ 360 V

จ่ายโหลดชั่วขณะให้มอเตอร์ที่ 4 N.m

กรอบอ้างอิงแกน  $q$  กรอบอ้างอิงแกน  $d$  สูงสุดที่ 1 V

ซึ่งจะทำการแบ่งการทดสอบ 4 สภาวะดังนี้

-เริ่มต้นการหมุนของมอเตอร์

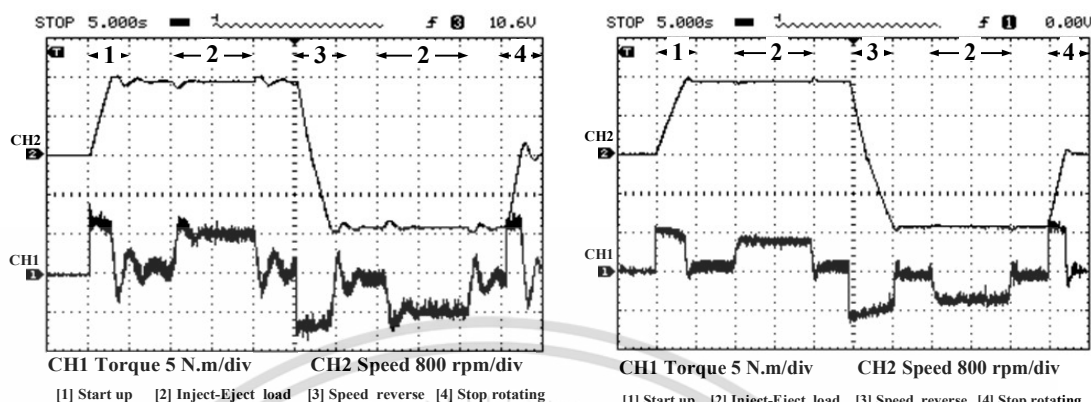
-เพิ่มโหลดและปลดโหลด

-กลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์

-มอเตอร์หยุดนิ่งเป็นศูนย์

จากการทดสอบที่กล่าวมาแสดงผลเปรียบเทียบการจำลองที่อยู่ทางด้านซ้ายและผลการทดสอบที่อยู่ทางด้านขวา แสดงได้ดังนี้

## ผลการทดสอบความเร็วรอบและแรงบิด



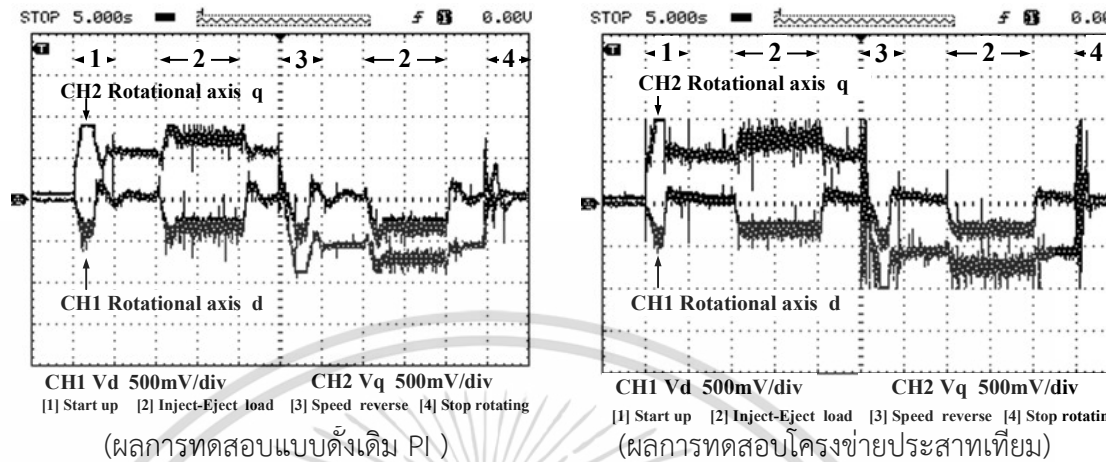
(ผลการทดสอบแบบดั้งเดิม PI )

(ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม)

## รูปที่ 6.32 ผลการทดสอบเปรียบเทียบความเร็วรอบและแรงบิด

ผลจากรูปที่ 6.32 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบของความเร็วรอบมอเตอร์ที่อยู่ (CH2) จะเห็นว่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบดั้งเดิม PI มีการตอบสนองสถานะเริ่มต้นเข้าสู่ความเร็วคงที่ 1500 rpm ใช้เวลา 7 s มีความเร็วเกิน(Over speed)มากกว่า 15% ต่อมาทำการเพิ่มโหลด 4 N.m ความเร็วรอบลดลง 1340 rpm และฟื้นตัวขึ้นมาที่สถานะคงที่ 1500 rpm เช่นเดิมโดยใช้เวลา 2 s และเมื่อปลดโหลดความเร็วรอบของมอเตอร์มีลักษณะแกว่งขึ้นลง ใช้เวลาเข้าสู่สถานะคงที่ 5 s จากนั้นกลับทิศทางหมุนมอเตอร์ใช้เวลา 7 s โดยความเร็วรอบมีการแกว่ง ต่อมาพิจารณาแรงบิด (CH1) มีการตอบสนองที่แกว่งขึ้นลงทั้งสี่สถานะ โดยแรงบิดสูงสุดอยู่ที่ 7 N.m ในสถานะเริ่มหมุนและกลับทิศทางหมุน ในส่วนสถานะเพิ่มโหลดแรงบิดจะอยู่ที่ 5 N.m ซึ่งผลทดสอบเปรียบเทียบตัวควบคุมการตอบสนองความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม PI ช้ากว่าตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียม

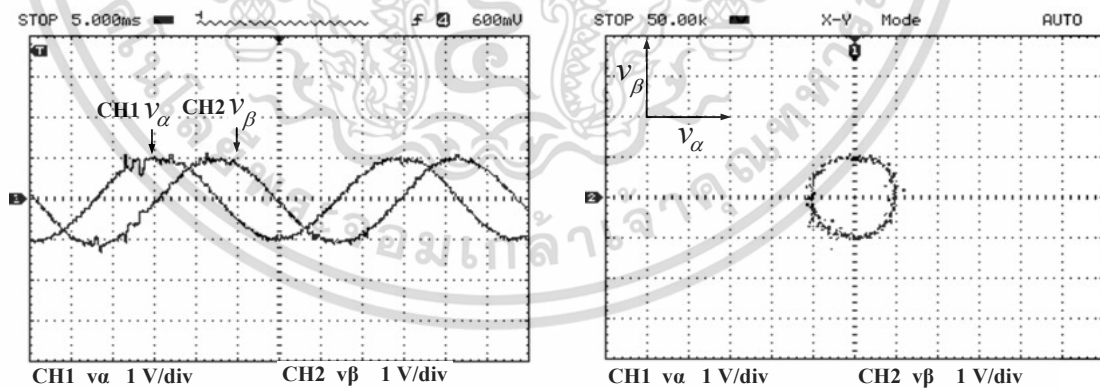
ผลการทดสอบกรอบอ้างอิงแกนหมุน  $d$  กรอบอ้างอิงแกนหมุน  $q$



รูปที่ 6.33 ผลการทดสอบกรอบอ้างอิงแกนหมุน  $q$  กรอบอ้างอิงแกนหมุน  $d$

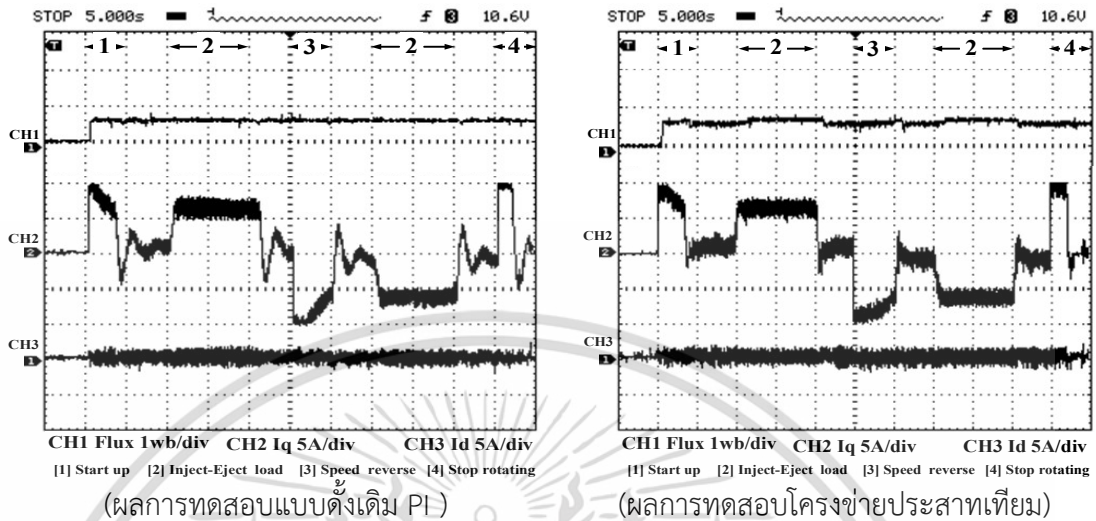
ผลจากรูปที่ 6.33 เมื่อพิจารณากรอบอ้างอิงแกนหมุน  $q$  (CH2) และกรอบอ้างอิงแกนหมุน  $d$  (CH1) ทั้งสี่สภาวะการทดสอบ ตัวควบคุมแบบดั้งเดิม PI มีการแกว่งทั้งสี่การทดสอบและตอบสนองช้ากว่าตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียม และเมื่อนำกรอบอ้างอิงแกนหมุน  $dq$  มาแปลงกลับโดยใช้สมการที่ (2-24) เพื่อคummแอลฟาและเบต้าที่ห่างกัน 90 องศา นำมาพลอต  $XY$  จะได้อยู่ในรูปแบบทรงกลมดังรูปที่ 6.34

ผลการทดสอบแปลงมุมแอลฟาและเบต้า ( $\alpha$ ) และ ( $\beta$ )



รูปที่ 6.34 ผลการทดสอบกรอบอ้างอิงแกนหมุน  $q$  กรอบอ้างอิงแกนหมุน  $d$

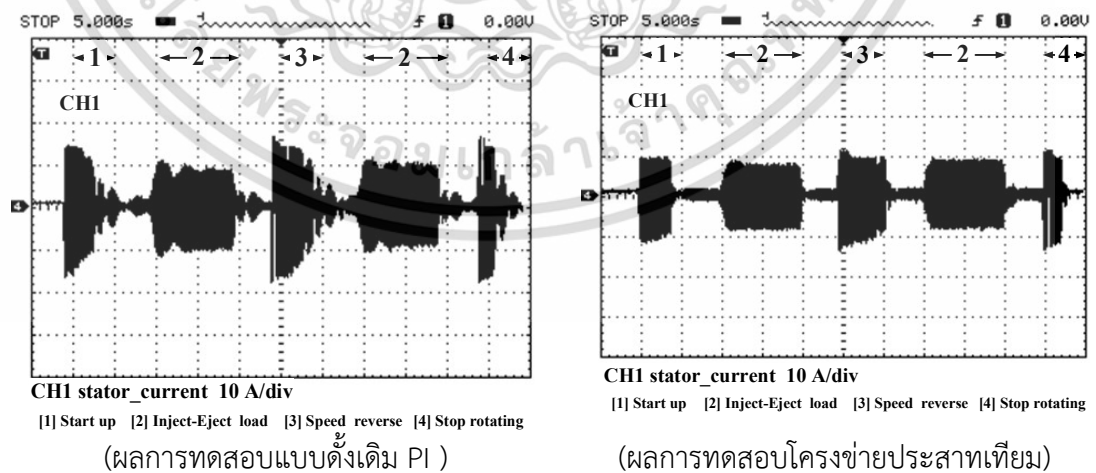
ผลการทดสอบโรเตอร์ฟลักซ์คำนวณ, กระแสแกน  $q$  และกระแสแกน  $d$



รูปที่ 6.35 ผลการทดสอบเปรียบเทียบโรเตอร์ฟลักซ์คำนวณและกระแสแกน  $dq$

ผลจากรูปที่ 6.35 พิจารณาผลของฟลักซ์ (CH1) จะเห็นว่าทั้งสี่สภาวะการทดสอบโรเตอร์ฟลักซ์อยู่ที่ 0.62 Wb คงที่ทั้งสองตัวควบคุม ต่อมาพิจารณากระแส  $i_q$  (CH2) พบว่าทั้งสองตัวควบคุมมีค่าสูงสุดที่ 9 A แต่กระแสที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบดั้งเดิม PI มีการแกว่งก่อนที่กระแสจะเข้าใกล้ 0 A ต่อมาเมื่อพิจารณากระแส  $i_d$  (CH3) จะเห็นว่าทั้งสี่สภาวะการทดสอบผลการจำลองของกระแส  $i_d$  คงตัวอยู่ที่ 0.3 A ทั้งสองตัวควบคุม

ผลการทดสอบกระแสมอเตอร์



รูปที่ 6.36 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกระแสมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากรูปที่ 6.36 เมื่อพิจารณาผลของกระแสของมอเตอร์ (CH1) จะเห็นว่าทั้งสี่สภาวะการทดสอบผลของการตอบสนองของกระแส ในส่วนของการควบคุมแบบดั้งเดิม PI กระแสสูงสุดจะอยู่ที่  $12 A_{\text{max}}$  และมีการแกว่งแสดงใน (ผลการทดสอบแบบดั้งเดิม PI) การควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียมจะมีกระแสสูงสุดที่  $10 A_{\text{max}}$  แสดงใน(ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.5 สรุปผลการทดสอบ

สรุปผลการทดสอบ แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ การจำลองเปรียบเทียบการทดสอบ และการเปรียบเทียบตัวควบคุมระหว่างตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมและตัวควบคุมแบบดั้งเดิม PI

**ส่วนแรก** เปรียบเทียบการจำลองและทดสอบทางพลวัตของตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียม จะเห็นว่ามีความสอดคล้องเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

**ส่วนที่สอง** เป็นการเปรียบเทียบตัวควบคุมระหว่างตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมและตัวควบคุมแบบดั้งเดิม PI ซึ่งตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมมีการตอบสนองได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบดั้งเดิม PI โดยตัวควบคุมแบบดั้งเดิม PI มีการแกว่งและเข้าค่าการตอบสนองที่ช้า

โครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยนี้ได้ใช้เป็นแบบป้อนไปข้างหน้าโดยใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม เป็นการทำนายชุดข้อมูลที่ได้รับการฝึกสอนเพื่อปรับค่าเวทในแต่ละโหนดเพื่อหาเอาต์พุตที่เหมาะสมในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยประมวลผลค่าควบคุมที่เหมาะสมคือค่าแรงบิดอ้างอิงและกรอบอ้างอิงแกน  $q$  กรอบอ้างอิงแกน  $d$  โดยมีข้อดีและข้อเสียดังนี้

### ข้อดี

- 1 การจัดจํารูปแบบที่ ไม่มีความแน่นอน การเลียนแบบฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์
- 2 การประมาณค่าฟังก์ชันหรือความสัมพันธ์ ที่มีอินพุตและเอาต์พุต การประมาณค่าแรงดัน  $dq$  ในการสร้างสัญญาณไซน์มอดูเลชันในการประมาณค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณ
- 3 มีการปรับตัวเองได้ตามสภาวะแวดล้อม การปรับตัวค่านค่าของความเร็รรอบให้คงที่
- 4 จัดหมวดหมู่จําแนกแยกแยะได้ จําแนกเอาต์พุตที่ใช้ข้อมูลอินพุตรวมกันในรูปการควบคุมกระแสได้
- 5 การทำนายการเปลี่ยนแปลงค่าในอนาคต โดยการทำนายค่าแรงบิดอ้างอิงและกรอบอ้างอิงแกน  $q$  กรอบอ้างอิงแกน  $d$  ที่เหมาะสมกับความเร็รรอบของมอเตอร์

### ข้อเสีย

- 1 การจัดการข้อมูลที่ถูกต้อง เหมาะสมและสัมพันธ์กันระหว่างข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต เช่น ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็รรอบและแรงบิดอ้างอิง ซึ่งจะไม่สามารถนำข้อมูลอินพุตอื่น มาใช้ในการทำนายเอาต์พุตที่เป็นแรงบิดได้ หรือ กรอบอ้างอิงแกน  $q$  กรอบอ้างอิงแกน  $d$  ได้
- 2 ไม่สามารถกำหนดหาอัตราส่วนของโหนดที่เหมาะสมกับจำนวนของ Hidden Layer ได้ โดยค่าโหนดที่เหมาะสมจะได้อาจจากการทดสอบซ้ำๆ
- 3 ข้อมูลระหว่างอินพุตและเอาต์พุตที่ใช้ในการฝึกสอนใช้เวลานานและทำซ้ำหลายรอบ เพื่อที่จะให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดเข้าใกล้ 1 มากที่สุด

4 ขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เพียงพอในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมมีความยุ่งยากซึ่งจำเป็นได้จาก sensors, data loggers, microcontroller เป็นต้น

5 ข้อมูลที่นอกเหนือจากการฝึกสอนโครงข่ายนั้น ตัวโครงข่ายประสาทเทียม ไม่สามารถทำนายได้ซึ่งจะถูกกำหนดด้วยขอบเขตข้อมูลที่สูงสุดและต่ำสุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงสรุปผลการดำเนินงานรวมถึงการวิเคราะห์ ผลการจำลองและผลทดสอบการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม ที่ได้นำเสนอ และในส่วนสุดท้ายเป็นส่วนขอเสนอแนะแนวทางการพัฒนา รวมถึงการประยุกต์ใช้งานในงานวิจัยอื่นๆ

#### 7.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ ได้ออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมพื้นฐาน Artificial Neural Networks (ANN) แบบโครงข่ายไปข้างหน้า (feed-forward network) เป็นชนิดโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi-Layer) ฝึกสอนแบบซูปเปอร์ไวส์ (Supervised Training) ที่มีการรู้แบบแพร่กลับ (Backpropagation Learning) ทำการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม ที่ควบคุมรอบอ้างอิงแกน  $d$  และแกน  $q$  ในรูปกระแส และทำนายแรงบิดอ้างอิงที่อยู่ในรูปความเร็วอีกทั้งออกแบบการสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงสามเฟส ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบการตอบสนองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยมีเงื่อนไขและลำดับการทดสอบดังนี้ กำหนดให้ความเร็วรอบของมอเตอร์หมุนที่ 157.6 rad/s หรือ 1500 rpm คงค่าฟลักซ์แม่เหล็กไว้ 0.62 Wb ที่มีแหล่งแหล่งจ่าย  $V_{dc}$  เท่ากับ 360 V และทดสอบจ่ายโหลดให้มอเตอร์ที่ 4 N.m ซึ่งลำดับการการทดสอบ จะมี 5 สถานะนั้นคือ เริ่มต้นการหมุนของมอเตอร์ จากนั้นเพิ่มโหลดและปลดโหลด ต่อมาจะเป็นการกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์และมอเตอร์หยุดนิ่งเป็นศูนย์และสุดท้ายเปลี่ยนความเร็วรอบความเร็วรอบของมอเตอร์แบบทันที ซึ่งทั้งหมดนี้ จะทำการเปรียบเทียบกับการทำงานของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม PI จากการศึกษาและได้ลงมือปฏิบัติงานวิจัยดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบพื้นฐาน (ANN) ที่ได้นำเสนอนั้นเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบง่ายเหมาะกับการประยุกต์ใช้กับชุดข้อมูลที่เป็น 1D หรือข้อมูลเชิงตัวเลข ซึ่งมีความเหมาะสมกับงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในด้านการเลียนแบบฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์อีกทั้งการประมาณค่าฟังก์ชันหรือความสัมพันธ์ที่มีอินพุตและเอาต์พุตมากกว่าหนึ่งเงื่อนไขและการปรับตัวค่าน้ำ

- 2 การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมมาควบคุมรอบอ้างอิงแกน  $d q$  และแรงบิดอ้างอิง สามารถทำการฝึกสอนตัวโครงข่ายให้มีเสถียรภาพของระบบ และจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink พบว่าตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมนั้น สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้
- 3 ชุดต้นแบบวงจรกำลัง ชุดอินเวอร์เตอร์สามเฟส IPM Module เบอร์ PM25RSB120 พิกัดแรงดันที่ 1200V พิกัดกระแส 25A พร้อมกับ ชุดตรวจจับกระแส และ เอ็นโค้ดเตอร์ สามารถทำงานร่วมกับการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28379D เพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม ใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมที่ออกแบบไว้ได้อย่างถูกต้อง
- 4 ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความสอดคล้องและถูกต้องกับการทดสอบการทำงานจริงที่ได้ออกแบบไว้
- 5 ผลจำลองเปรียบเทียบผลทดสอบการควบคุมความเร็วรอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียม มอเตอร์เริ่มสตาร์ทที่ 1500 rpm มีความเร็วเกิน(Over speed) อยู่ที่ 1.5% และแรงบิดสูงสุด 5 N.m ส่วนการเพิ่มโหลด 4 N.m ความเร็วรอบมอเตอร์ลดระดับลงและฟื้นตัวขึ้นมาที่สถานะเช่นเดิม เมื่อปลดโหลดความเร็วรอบของมอเตอร์มีลักษณะพุ่งขึ้นจากนั้นลดลงสู่สถานะคงที่ เมื่อสั่งมอเตอร์เปลี่ยนความเร็วต่างๆฉบับพลา้น ,กลับทิศทางหมุนและหยุดหมุน การตอบสนองสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับผลการจำลอง
- 6 ผลตอบสนองทางพลวัตควบคุมแบบดั้งเดิม PI เปรียบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม ผลทดสอบเปรียบเทียบตัวควบคุมการตอบสนองความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ของ ตัวควบคุมแบบดั้งเดิม PI ซ้ำกว่าตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมทั้งสี่สถานะการทดสอบ เนื่องด้วยค่าพารามิเตอร์ไม่เหมาะสมกับเกณฑ์  $K_p$  และ  $K_i$
- 7 โครงข่ายประสาทเทียมสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงสามเฟสในการแปลงแกนหมุนอ้างอิงสองเฟสให้อยู่ในแกนอ้างอิงสามเฟสหรืออินเวอร์สแบบปาร์ค-คลาร์ก ผลตอบสนองการทำงาน ของตัวควบคุมทำงานได้ดี

## เปรียบเทียบการควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียมกับการควบคุมแบบดั้งเดิม PI

โครงข่ายประสาทเทียมเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบดั้งเดิมโดยโครงข่ายประสาทเทียมมีข้อดีคือในการเรียนรู้แบบอัตโนมัติ จัดการกับข้อมูลที่ซับซ้อนและไม่เชิงเส้นมีความยืดหยุ่นในการปรับแต่งที่หลากหลายในโครงสร้างรวมถึงการทำนายที่มีประสิทธิภาพสูงและมีประสิทธิภาพในการปรับตัวโดยอัตโนมัติทำให้มันเป็นตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพมากกว่าแบบ ดั้งเดิม PI (Proportional-Integral) Controller

- 1 ความสามารถในการเรียนรู้แบบอัตโนมัติ (Automatic Learning)  
โครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้โดยอัตโนมัติจากข้อมูลที่ให้มา โดยไม่ต้องการระบุพารามิเตอร์ที่ต้องปรับเพื่อให้มีประสิทธิภาพ เช่น การปรับค่า  $K_p, K_i$  ใน PI Controller ต้องการการทดลองและปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อให้ค่า  $K_p, K_i$  ที่เหมาะสม ในขณะที่โครงข่ายประสาทเทียม สามารถปรับตัวเองได้ในรูปแบบที่อัตโนมัติ โดยไม่ต้องการความช่วยเหลือเพิ่มเติม
- 2 ความสามารถในการจัดการกับข้อมูลที่ซับซ้อนและไม่เชิงเส้น  
โครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้และทำนายข้อมูลที่มีความซับซ้อนและมีลักษณะที่ไม่เชิงเส้นได้ดี เช่น ในการประมาณฟังก์ชันที่ซับซ้อนหรือการจำลองข้อมูลที่เปรียบเสมือนสมองของมนุษย์ได้
- 3 ความยืดหยุ่นในการปรับแต่งที่หลากหลายในโครงสร้าง  
โครงข่ายประสาทเทียมมีความยืดหยุ่นในการสร้างโมเดลที่ซับซ้อนมากขึ้น เพราะสามารถปรับปรุงโมเดลได้ตลอดเวลา โดยการเพิ่มหรือลดจำนวนชั้นซ่อนหรือจำนวนโหนดภายในชั้นซ่อนได้ตามความต้องการ ในขณะที่ แบบดั้งเดิม PI มีข้อจำกัดในการปรับตัวที่ไม่ยืดหยุ่น
- 4 การทำนายที่มีประสิทธิภาพสูง  
โครงข่ายประสาทเทียมมีความสามารถในการทำนายข้อมูลที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสามารถเรียนรู้และจัดการกับความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนได้ ซึ่งทำให้มีความแม่นยำในการทำนายที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ แบบดั้งเดิม PI ในบางกรณีที่มีข้อมูลที่ซับซ้อนมาก
- 5 ประสิทธิภาพในการปรับตัวโดยอัตโนมัติ  
โครงข่ายประสาทเทียมสามารถปรับค่าน้ำหนักและการเรียนรู้ได้อัตโนมัติโดยไม่ต้องการความช่วยเหลือจากมนุษย์ ซึ่งทำให้มีความสะดวกสบายและประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีกว่าแบบดั้งเดิม PI

## 7.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัยต่อ

- 1 สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่เป็นชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส อัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสมเราไม่สามารถหาค่าที่เหมาะสมและแน่นอนได้เพียงแต่รู้ขอบเขตที่มากและน้อยที่สุดเท่านั้น จึงต้องอาศัยการประมาณการ ดังนั้นแนวทางการพัฒนาควรเลือกอัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสม
- 2 ชุดควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมนี้ที่เป็นส่วนของซอฟต์แวร์เนื่องจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์และกระบวนการที่ซับซ้อน แนวทางพัฒนาประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการเรียนรู้กระบวนการทำงานของเวกเตอร์ทางอ้อมทั้งหมด และนำไปประยุกต์ใช้กับเทคนิคการควบคุมแบบต่างๆ
- 3 ส่วนของภาคกำลังควรทำการทดสอบที่แรงดันตามพิกัดของมอเตอร์โดยนำวงจรคอนเวอร์เตอร์มาช่วยในการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อลดฮาร์มอนิกสในสถานะเพิ่มโหลดอีกทั้งเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเนื่องจากฮาร์มอนิกสลดลง
- 4 ในกรณีกลับทางหมุนของมอเตอร์หรือเบรก ควรมีการนำพลังงานที่สูญเสียกลับไปที่ชาร์จแบตเตอรี่โดยต้องมีการควบคุมแรงดันและกระแส
- 5 พัฒนาต่อในการนำไปใช้กับมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือชนิดมอเตอร์อื่นๆนอกเหนือจากมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

จากข้อเสนอแนะที่กล่าวมาในงานวิจัยนี้ใช้เพียงรากฐานของโครงข่ายประสาทเทียม เนื่องด้วยโครงข่ายประสาทเทียมนั้นมีหลากหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับการใช้งานดังนั้นควรเลือกโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม ในส่วนเทคนิคการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมมีความซับซ้อนมีแนวทางพัฒนาให้โครงข่ายประสาทเทียมเลียนแบบกระบวนการของเวกเตอร์ทางอ้อมในการขับเคลื่อนมอเตอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือชนิดมอเตอร์อื่นๆนอกเหนือจากมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และพลังงานที่เกิดขึ้นในสถานะกลับทิศทางหมุนและเบรก การสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นควรนำพลังงานในส่วนนี้กลับไปใช้ให้คุ้มค่าที่สุด

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Bimal K. Bose “Neural Network Applications in Power Electronics and Motor Drives-An Introduction and Perspective” IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 54, NO. 1, FEBRUARY 2007
- [2] Suman Maiti, Vimlesh Verma, Chandan Chakraborty and Yoichi Hori “An Adaptive Speed Sensorless Induction Motor Drive with Artificial Neural Network for Stability Enhancement” IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS, VOL. 8, NO. 4, NOVEMBER 2012
- [3] E. S. Abdin, G. A. Ghoneem, H. M. M. Diab, and S. A. Deraz “Efficiency Optimization of a Vector Controlled Induction Motor Drive Using an Artificial Neural Network” IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE Cat. No.03CH37468)
- [4] Yang Yi, D. Mahinda Vilathgamuwa and M. Azizur Rahman “Implementation of an Artificial-Neural-Network-Based Real-Time Adaptive Controller for an Interior Permanent-Magnet Motor Drive” IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 39, NO. 1, JANUARY/FEBRUARY 2003
- [5] Xingang Fu and Shuhui Li “A Novel Neural Network Vector Control Technique for Induction Motor Drive” IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 30, NO. 4, DECEMBER 2015
- [6] B. Karanayil, M. F. Rahman and C. Grantham “Rotor Resistance Identification using Artificial Neural Networks for an Indirect Vector Controlled Induction Motor Drive” IECON'01: The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society

- [7] Shuhui Li, Hoyun Won, Xingang Fu “Neural-Network Vector Controller for Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives: Simulated and Hardware-Validated Results” IEEE TRANSACTIONS ON CYBERNETICS, VOL. 50, NO. 7, JULY 2020
- [8] Mustafa Mohamadian, Ed Nowicki, Farhad Ashrafzadeh, “A Novel Neural Network Controller and Its Efficient DSP Implementation for Vector-Controlled Induction Motor Drives” IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 39, NO. 6, NOVEMBER/DECEMBER 2003
- [9] A. Miloudi, Y. Miloud ,A. Miloudi, Y. Miloud “A Neural Network Based Speed Control Design Strategy of an Indirect Vector Controlled Induction Machine Drive” Paper accepted for presentation at 2003 IEEE Bologna PowerTech Conference, June 23-26, Bologna, Italy
- [10] กฤษ เฉยไสย และ ประยงค์ เสาร์แก้ว “การหาค่าพารามิเตอร์เพื่อจำลองการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส”การประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 25-26 มกราคม 2549
- [11] สุชาติ จันทร์จรมานิตย์ “ระบบควบคุม Control Systems” สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
- [12] รศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย “Electrical Machines II” สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มกราคม 2558
- [13] ผศ.ดร. กองพัน อารีรักษ์ “การออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์ Optimal Controller Design for Three-Phase Induction Motor Drive System Using Artificial Intelligence Techniques” สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมษายน 2557

- [14] รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชั้นเงิน/วุฒิปล ธาราธิ์เรษฐ “หนังสืออิเล็กทรอนิกส์กำลัง Power Electronics” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำนักพิมพ์ ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ.พรินตติ้ง เมษายน 2550
- [15] Itthiphan Sakunwanthanasak “A Current Sensorless Indirect Vector Control using Fuzzy-pi Controller for dual Induction motor driving Single load” ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING KING MONGKUT’SOF INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG 2016
- [16] b. k. bose. modern power electronics and ac drives. prentice-hall, 2002.
- [17] Chvaporn Bumroongphuck “Soft Starting and Performance Evaluation of a Modified Three-Phase Induction Motor Fed by a Single-Phase PWM AC Chopper” ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING KING MONGKUT’SOF INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG 2017
- [18] ผศ.ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว “ปัญญาเชิงคำนวณ computational intelligence”สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า สำนักงานวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [19] Likit Choosub “A Three-phase Shunt Active Power Filter Based on Neural Networks and Digital Processor” ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING KING MONGKUT’SOF INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG 2004
- [20] Panupan Moungsri, Yutana Jewajinda and Chaiwut Choorak “Artificial Neural Network Based Speed Control of Carrier-Based SVPWM Inverter Fed Induction Motor” 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) Oct 31-Nov 3, 2021, | Hybrid, Korea
- [21] MathWorks Neural Network Toolbox User’s Guide, 2018a

- [22] B. K. Bose, Power Electronics and Motor Drive – Advances and Trends. Burlington, MA: Elsevier, 2006.
- [23] M. N. Cirstea, A. Dinu, J. G. Khor, and M. McCormick, Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems. Burlington, MA: Elsevier, 2002.
- [24] K. J. Hunt et al., “Neural networks for control systems – A survey,” Automatic a, vol. 28, pp. 1083–1112, 1992
- [25] B. Burton, R. G. Harley, and T. G. Habetler, “The application and hardware implementation of continuously online trained feedforward neural networks for fast adaptive control and prediction in power electronic systems,” in Proc. Conf. Rec. IEEE FEPPCON III, South Africa, Jul. 1998, pp. 215–224.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

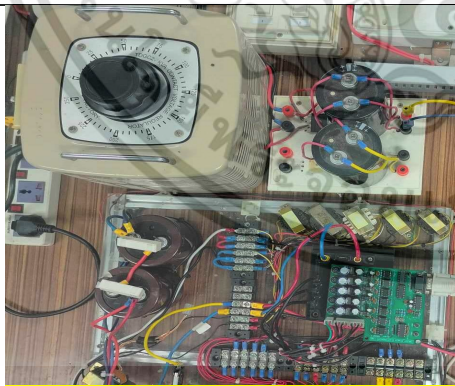


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



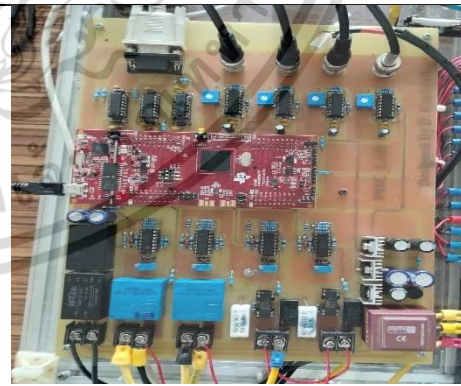
ชุดต้นแบบในงานวิจัย

ภาคกำลัง



ชุดต้นแบบส่วนของภาคกำลัง

ภาคควบคุม



ชุดต้นแบบส่วนของภาคควบคุม

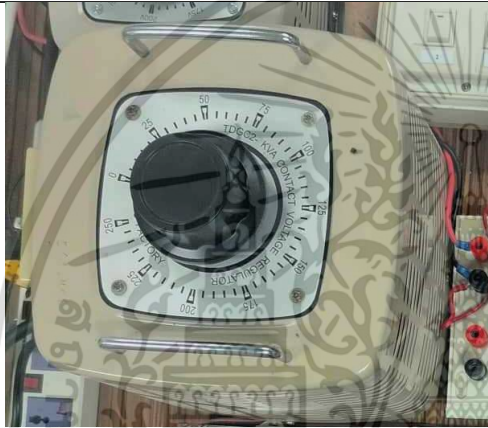
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสตรง



วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส AC



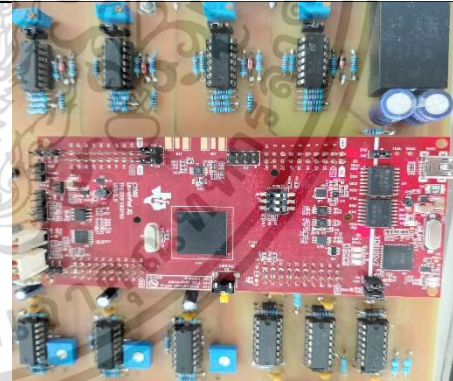
หม้อแปลงแยกกราด์นของแหล่งจ่ายไฟตรง



เอ็นโค้ดเดอร์ตรวจจับความเร็วรอบ



ไดโอดเรียงกระแส



ไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28379D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IPM Module เบอร์ PM25RSB120



Asus Expert Book Standard SET



มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส



ชุดโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือ	รายละเอียด
	Differential Voltage Probe PICO TECHNOLOGY รุ่น TA044
	Oscilloscope Rigol รุ่น DS1104B
	Current Probe TEKTRONIC รุ่น A622
	Digital Multimeter TECPEL รุ่น DMM 8007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 <p>© Artisan Technology Group</p>	<p>Power Analyzer Yokogawa รุ่น PZ 4000</p>
	<p>Clip Probes รุ่น P6000 For DC 100MHz x1 x10 600V</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14  
The 14th Electrical Engineering Network 2022

# EENET 2022

25-27 MAY 2022 · Hilton Phuket Arcadia Resort & Spa, Phuket

## CONFERENCE TOPICS

1. Electrical Power (PW)
2. Electronics, Circuit and Communication (EC)
3. Power Electronics (PE)
4. Computer and Information Technology (CP)
5. Control Systems and Instrumentation (CT)
6. Digital Signal Processing (DS)
7. Energy and Energy Saving (ES)
8. Innovation and Invention (IN)
9. General Electrical Engineering (GN)
10. Special Session on Electrical Engineering (SS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14

14<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2022 (EENET 2022)



### การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเวกเตอร์คอนโทรลโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม Controlling induction motor speed of vector control method using neural networks.

นิคม ก้านจักร, เดิมชาติ มานพ, วิจิตร กิณเรศ, อัครกิตติ ไชยธนกุลรัตน์, ตักดาภูมิ บุญด้วง

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ

59/1 หมู่ 14 ถนนสุขุมวิท ตำบลบางปลา อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ 10540

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10520

E-mail: 64601080@kmitl.ac.th, kmchaler@kmitl.ac.th, vijitki@kmitl.ac.th, chaitanaku@gmail.com, sakdawut\_bo@rmutto.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยโครงข่ายประสาทเทียมควบคุมความเร็วให้คงที่โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม วิธีการที่ได้นำเสนอจะประกอบด้วยการควบคุมเวกเตอร์ทางอ้อมแบบวงปิดจะควบคุมอยู่ในรูปของความถี่รอบเพื่อสร้างแรงบิดอ้างอิงด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ที่ความเร็วรอบกำหนดในสภาวะเริ่มต้นการหมุนของมอเตอร์, สภาวะภาระโหลดและกลับทางหมุน เพื่อให้เห็นประสิทธิภาพของการควบคุม ในงานวิจัยนี้ได้จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อยืนยันผลการจำลองของการควบคุมด้วยโครงข่ายประสาทเทียมที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ โดยจะเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอ

คำสำคัญ: มอเตอร์เหนี่ยวนำ, การควบคุมความเร็วรอบ, โครงข่ายประสาทเทียม, การควบคุมแบบพีไอ, การควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม

#### Abstract

This paper presents the control of induction motor speed with a neural network, which stabilizes the speed using an indirect vector control technique. The proposed method consists of a closed-loop indirect vector control in a loop of motor speed to generate a reference torque with a neural network, at nominal speed in motor starting state, load state and reverse rotation to see the effectiveness of the control. In this research, working with the program MATLAB/Simulink. To confirm the simulation results of the neural network control that controls the motor speed at the specified constant speed, it is compared with the PI controller.

Keywords: induction motor, speed control, neural network, PI controller, Indirect vector control

#### 1. บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในอุตสาหกรรมมีกลไกเรียกว่ากลไกการขับเคลื่อนของอุตสาหกรรมเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง มีความน่าเชื่อถือสูงและการบำรุงรักษาน้อย อย่างไรก็ตามการใช้งานของมอเตอร์ที่มีการเสื่อมสภาพลงเพื่อจะลดการเสื่อมสภาพของมอเตอร์จึงต้องใช้เทคนิคที่ดีในการควบคุมมอเตอร์ในการใช้งาน

การควบคุมมอเตอร์แบบวงปิด จะคล้ายกับการควบคุมมอเตอร์ DC แบบแยกกระตุ่นซึ่งจะควบคุมแรงบิดและฟลักซ์โดยตรงจากกระแสของมอเตอร์เพื่อนำมาแปลงแกน d-q โดยกระแสสเตเตอร์หรือสนามแม่เหล็กในแนวแกน d จะควบคุมความเข้มของสนามแม่เหล็กให้มีค่าคงที่เมื่อต้องการเปลี่ยนแปลงความเร็วหรือแรงบิดให้เปลี่ยนแปลงประกอบในแนวแกน q โดยควบคุมกระแสรีโเตอร์ ในส่วนโครงข่ายประสาทเทียมจะไปควบคุมในรูปของความถี่รอบ โดยกำหนดค่าแรงบิดอ้างอิงเพื่อนำไปสร้างแรงดันแกน d และแรงดันแกน q สำหรับแปรเปลี่ยนกลับให้อยู่ในรูปแบบแรงดันไฟสามเฟส (abc) เพื่อนำไปใช้สำหรับการสร้างสัญญาณ PWM (pulsewidth modulation) ด้วยเทคนิค (space vector pulsewidth modulation) SVPWM ในการสวิตช์อินเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งได้รับการใช้งานอย่างกว้างขวางเนื่องจากการสูญเสียของสวิตซ์ต่ำ และประสิทธิภาพพร้อมอนิกที่ดีในการสวิตช์

งานวิจัยได้นำเสนอเกี่ยวกับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมจะแสดงให้เห็นถึงการควบคุมแบบวงเปิดและการควบคุมแบบวงปิดในรูปความเร็วของเวกเตอร์แบบทางอ้อมและได้ทำการเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบ PI เพื่อดูพฤติกรรมการตอบสนองของความเร็วรอบ, แรงดัน (Vd, Vq) และแรงบิดของมอเตอร์ในสภาวะเริ่มต้นการหมุนของมอเตอร์, สภาวะมอเตอร์มีโหลดที่กำหนดและสภาวะกลับทางหมุนของมอเตอร์ ซึ่งจะกล่าวถึงการออกแบบในแต่ละหัวข้อต่อไปนี้

**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14

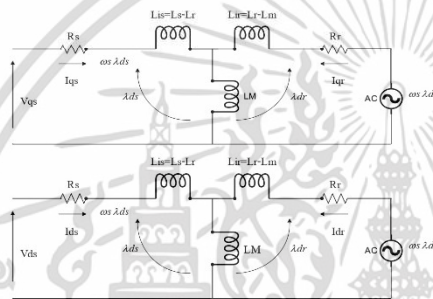
14<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2022 (EENET 2022)



**2. องค์ประกอบของงานวิจัยที่น่าสนใจ**

**2.1 การควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม**

การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบเวกเตอร์ จะต้องแปลงปริมาณสามเฟสให้อยู่บนแกน d-q เพราะการควบคุมจะใช้หลักการเดียวกันกับมอเตอร์กระแสตรงรูปแบบสมการของมอเตอร์สามเฟสจะถูกแปลงให้อยู่บนแกน d-q แสดงสมการ (1-4) แรงดันที่ขดลวด สเตเตอร์และ โรเตอร์สมการ (5-8) ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดขดลวด สเตเตอร์และ โรเตอร์และสมการ (9) แรงบิดของมอเตอร์ที่ถูกแปลงมาอยู่บนแกน d-q ในวงจรสมมูล d-q ได้ดังนี้



รูปที่ 1 วงจรสมมูล d-q

โดยแรงดันในแกน d-q ในพจน์ต่อไปนี้เป็น

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} \tag{1}$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} \tag{2}$$

$$0 = R_r i_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} - \omega_r \lambda_{dr} \tag{3}$$

$$0 = R_r i_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} - \omega_r \lambda_{qr} \tag{4}$$

และฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดขดลวดสเตเตอร์และ โรเตอร์ในพจน์ต่อไปนี้เป็น

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \tag{5}$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \tag{6}$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{ds} + L_m i_{ds} \tag{7}$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qs} + L_m i_{qs} \tag{8}$$

แรงบิดของมอเตอร์ดังสมการต่อไปนี้

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) \tilde{\lambda}_m \times \tilde{I}_r, \quad T_e - T_L = \left( \frac{2}{P} \right) J \frac{d\omega_r}{dt} \tag{9}$$

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\lambda_{dm}^i i_{qs} - \lambda_{qm}^i i_{ds})$$

การหมุนในแกน d ที่มีความเร็วเชิงโคไซน์ซึ่งจะอยู่ บนแกนของฟลักซ์เชื่อมโยงขดลวด โรเตอร์และองค์ประกอบแกน q ของฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดโรเตอร์จะมีค่าเป็น 0 สมการที่ (10)

$$\lambda_{qr} = 0, \lambda_{dr} = \lambda_r \tag{10}$$

กระแสโรเตอร์บนแกน q ในสมการที่ (11)

$$\lambda_r = \frac{\lambda_r}{L_m} i_{qs} \tag{11}$$

เพื่อให้ได้แรงบิดทางไฟฟ้าที่ต้องการเพื่อควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมจะได้ตามสมการที่ (12)

$$T_e = K_T i_{ds}^* i_{qs} \quad \text{เมื่อ} \quad K_T = \frac{3 p L_m^2}{2 L_r} \tag{12}$$

จะเห็นว่าความควบคุมแรงบิดของมอเตอร์จะถูกควบคุมด้วยกระแส ( $i_{qs}$ ) เป็นหลักและในส่วนของ การควบคุมฟลักซ์จะถูกควบคุมด้วยกระแส ( $i_{ds}$ ) จะมีค่าแปรตามกระแส ( $i_{qs}^*$ ) และ ( $i_{ds}^*$ ) เร็วมากเนื่องจากมีค่าแบบเสถียรที่ของค่าควบคุมที่สูง จะได้ค่าสลิปสมการที่ (13)

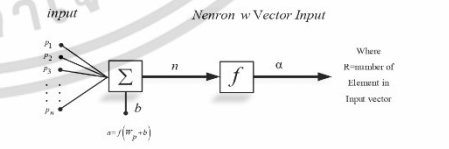
$$\omega_{sl} = \frac{i_{qs}^*}{\tau_r i_{ds}^*} \quad \text{เมื่อ} \quad \tau_r = \frac{L_r}{R_r} \tag{13}$$

การควบคุมเวกเตอร์แบบทางอ้อม จะใช้มุมในการหมุนที่ความเร็วเชิงโคไซน์  $\theta_e$  ดังสมการที่ (14) เนื่องจากต้องใช้นุมดังกล่าวสำหรับแปลงแกน (abc) ให้อยู่บนแกน (d-q) ซึ่งแกน d จะควบคุมฟลักซ์และแกน q จะควบคุมแรงบิด

$$\theta_e = \int \omega_e dt = \int (\omega_{sl} + \omega_r) dt = \int \left( \omega_r + \frac{i_{qs}^*}{\tau_r i_{ds}^*} \right) dt \tag{14}$$

**2.2 การควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียม**

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) เป็นการคำนวณเลียนแบบการทำงานของระบบสมองมนุษย์เพื่อใช้ในการพยากรณ์ข้อมูล โครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วยเซลล์ประสาท (Neural) ซึ่งจำลองมาจากการทำงานของระบบสมองมนุษย์ โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function, f) ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight, w) และค่าไบแอส (Bias, b) เป็นเครื่องมือจำลองคุณสมบัติของเซลล์ประสาทในรูปที่ (2)



รูปที่ 2 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมแบบขั้นเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14

14<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2022 (EENET 2022)



การจัดรูปแบบข้อมูลสำหรับการฝึกสอน (Training) และทดสอบ (Testing) จากจำนวนปัจจัยนำเข้า (Input) 1 ปัจจัยผลลัพธ์เป้าหมาย (Output) 1 ค่า โดยมีข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์จำนวน 64 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองแบบบ็อกซ์ เบนท์เคนกำหนดจำนวนรอบในการวนซ้ำ (Epoch)=100 โดยแปลงข้อมูลให้มีค่าระหว่าง 0-1 โดยใช้สมการที่ (15)

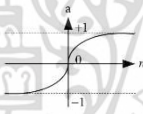
$$X = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (15)$$

เมื่อทำการฝึกสอนและทดสอบและได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมแล้วข้อมูลที่ได้จะต้องถูกแปลงค่ากลับเป็นค่าจริงจากสมการที่ (16)

$$X = \left[ X_i (X_{\max} - X_{\min}) + X_{\min} \right] \quad (16)$$

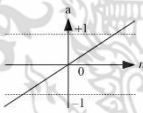
ในส่วนฟังก์ชันปรับการเรียนรู้ในงานวิจัยได้ใช้ ฟังก์ชันแทนซิกมอยด์ (tan-sigmoid) ในส่วนชั้นนำขาเข้า (Input Layer) และชั้นซ่อน (Hidden Layer) ส่วนชั้นผลลัพธ์ (Output layer) จะใช้ฟังก์ชันเพียวรีน (purelin) เพื่อที่จะได้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดน้อยที่สุด (Mean Square Error, MSE) และมีประสิทธิภาพในการทำนายที่แม่นยำ สำหรับฟังก์ชันการถ่ายโอนในแต่ละชั้นในรูปที่ (3) และ(4) ในสมการที่ (17) และ (18)

$$a = \text{Tansig}(n) = \frac{2}{1 + e^{-2n}} - 1 \quad (17)$$



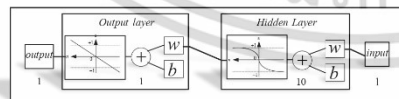
รูปที่ (3) ฟังก์ชันแทนซิกมอยด์ (tan-sigmoid)

$$a = \text{Purclin}(n) \quad (18)$$



รูปที่ (4) ฟังก์ชันเพียวรีน (purelin)

โดยโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าแรงบิดจะแบ่งได้เป็น 1-10-1 ประกอบด้วยจำนวนนิวรอนในชั้นอินพุต 1 นิวรอน คือความเร็วตั้งแต่ 1500-0-(-1500) จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน 10 นิวรอน และจำนวนนิวรอนในชั้นแอสทูล 1 นิวรอน คือแรงบิดตั้งแต่ 30-0-(-30) โครงสร้างนี้จะอยู่ในรูปที่ (5)



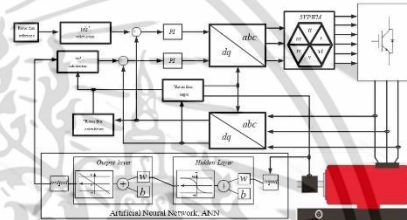
รูปที่ (5) โครงข่ายประสาทเทียมของกรทำนายค่าแรงบิด

การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมพิจารณาจาก ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดค่าตั้งสองและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ดังในสมการ (19) และ (20) โดยที่ ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนค่าตั้งสอง (MSE)

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - A_i)^2}{N} \quad (19)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - A_i)^2}{\sum_{i=1}^N (T_i - A)^2} \quad (20)$$

โดยองค์ประกอบของงานวิจัยจากที่กล่าวมาข้างต้นได้เขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ (6)



รูปที่ (6) บล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเวกเตอร์คอนโทรล โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

จากบล็อกไดอะแกรมการควบคุมเวกเตอร์แบบทางอ้อมนั้นจะเป็นการนำโครงข่ายประสาทเทียมควบคุมในรูปของความถี่รอบเพื่อไปสร้างเป็นแรงบิดในส่วนของอุปกรณ์แต่ละเป็นกรควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI ที่แทน  $v_d$  และ  $v_q$  เพื่อนำไปสร้างสัญญาณ SVPWM ไปขับสวิตซ์อินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์โดยค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในตารางที่ (1)

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบงานที่นำเสนอ

พารามิเตอร์		ขนาด
ความเหนี่ยวนำสเตเตอร์	$L_s$	0.005839 H
ความเหนี่ยวนำโรเตอร์	$L_r$	0.005839 H
ความต้านทานสเตเตอร์	$R_s$	1.405 ohm
ความต้านทานโรเตอร์	$R_r$	1.395 ohm
โมเมนต์ความเฉื่อย	$J$	0.0131 kg·m <sup>2</sup>
ความเร็วรอบ	$N$	1500 rpm
ความเหนี่ยวนำรวม	$L_m$	0.1722 H
กำลัง	$P_n$	4k VA
ขั้ว	$P$	2
ความถี่	$F$	50 Hz
แรงดัน L-L	$V$	400 Vrms
ค่าความเสียดทาน	$B$	0.002985 N.m.s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14

14<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2022 (EENET 2022)

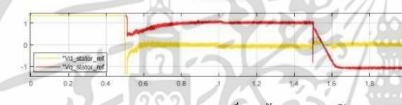
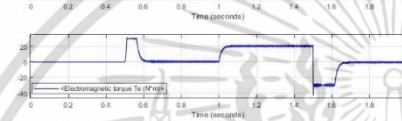
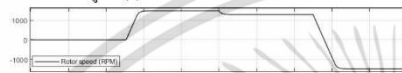


### 3. ผลการจำลองและทดสอบระบบที่นำเสนอ

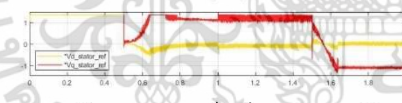
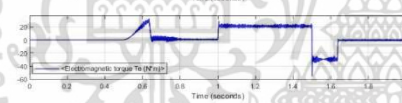
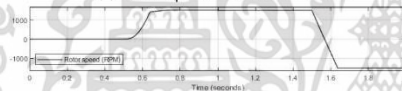
#### 3.1 ผลการจำลองการควบคุมเวกเตอร์ทางอ้อมที่มี

##### ตัวควบคุมแบบ PI เปรียบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม

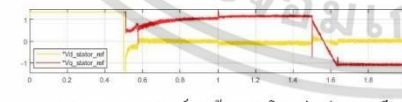
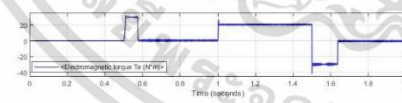
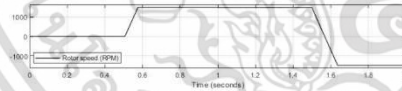
เพื่อยืนยันการจำลองของระบบ ได้กำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 1500 rpm ในสภาวะเริ่มต้นการหมุนเป็นเวลา (0.5s), สภาวะขณะโหลดที่ 20 Nm. ที่เวลา (1s) และสภาวะกลับทางหมุนเป็นเวลา (1.5s) ตามลำดับจากรูปที่ (7)



(ก) การควบคุมเวกเตอร์ทางอ้อมแบบวงเปิด



(ข) การควบคุมเวกเตอร์ทางอ้อมแบบตัวควบคุม PI



(ค) การควบคุมเวกเตอร์ทางอ้อมแบบโครงข่ายประสาทเทียม

รูปที่ 7 ผลการจำลองการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมจากโปรแกรม MATLAB/Simulink

#### 3.2 ผลการจำลองของการควบคุมเวกเตอร์ทางอ้อมที่นำเสนอ

ผลการจำลองการควบคุมเวกเตอร์แบบทางอ้อมแบบวงเปิดในสภาวะโหลดไม่สามารถควบคุมความเร็วได้ตามรูป (ก) แบบวงเปิดที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PI เปรียบเทียบกับ โครงข่ายประสาทเทียม โดยจะได้ผลการจำลองแบบควบคุมแบบ PI นั้นในสภาวะเริ่มต้นการหมุนความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีการตอบสนองช้าแต่ข้อดีที่ความเร็ว 1500 rpm ที่ค่า Kp และ Ki คงที่ซึ่งได้มาจากการหาค่า PI แบบ ซิกเลอร์นิโคล (Ziegler Nichols) และในสภาวะโหลดและกลับทางหมุนสามารถควบคุมความเร็วได้ตามรูป (ข) ซึ่งต่างจากการควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่สามารถควบคุมความเร็วได้ 1500 rpm ในสภาวะเริ่มต้นการหมุน, สภาวะ โหลดและกลับทางหมุนดังรูป (ค)

### 4 สรุป

จากผลการจำลองการควบคุมเวกเตอร์ทางอ้อมแบบควบคุมด้วย PI เปรียบเทียบกับ โครงข่ายประสาทเทียม กรณีการควบคุมแบบ PI มีความซับซ้อนในการคำนวณซึ่งการควบคุมจำเป็นต้องหาค่า Kp และ Ki ที่ระดับต้องการซึ่งต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ของระบบเพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุม เมื่อค่าพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้การตอบสนองของระบบการควบคุมมีประสิทธิภาพลดลง ในส่วนของโครงข่ายประสาทเทียมจะเป็นการเก็บข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่เพิ่มเป็นเงื่อนไขในการฝึกสอนของโครงข่ายในการทำนายเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นไม่คำนึงถึงค่าพารามิเตอร์แต่จะคำนึงถึงค่าความแม่นยำของข้อมูลและการฝึกสอนของโครงข่าย ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมสามารถควบคุมความเร็วสภาวะเริ่มต้นการหมุน, สภาวะ โหลดและกลับทางหมุนได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดี

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Hyung-Min Ryu, Jang-Iwan Kim, Student and Seung-Ki Sul, "Analysis of Multiphase Space Vector Pulse-Width Modulation Based on Multiple d-q Spaces Concept", IEEE Transactions on Power electronics, Vol. 20, no. 6, November 2005.
- [2] Hanan Mikhael D. Habbi, Hussein Jafli Ajeel, Inaam Ibrahim Ali, "Speed Control of Induction Motor using PI and V/F Scalar Vector Controllers", International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 151 – No.7, October 2016.
- [3] Prachya Peasura, "Artificial Neural Network Modeling for Prediction of Tensile Strength in Pressure Vessel Welding with Steel ASTM A537 Class 1", TNI Journal of Engineering and Technology Vol.7 No.2 July - December 2019.



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15  
The 15th Electrical Engineering Network 2023  
1-3 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรมฟอร์จูน ริเวอร์วิว นครพนม

# EENET 2023 CALL FOR PAPERS

ยานยนต์ไฟฟ้าและรถไฟฟ้าระบบรางอนาคตการเดินทางใหม่ของประเทศไทย  
Next Generation of Electric Vehicles and Railway Transit in Thailand

Submission Deadline **27th January, 2023**

## สาขาบทความวิจัย

- ✓ 1. Electrical Power (PW)  
ไฟฟ้ากำลัง
- ✓ 2. Electronics, Circuit and Communication (EC)  
อิเล็กทรอนิกส์ วงจรและสื่อสาร
- ✓ 3. Power Electronics (PE)  
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
- ✓ 4. Computer and Information Technology (CP)  
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ
- ✓ 5. Control Systems and Instrumentation (CT)  
ระบบควบคุมและการวัด
- ✓ 6. Digital Signal Processing (DS)  
ระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล
- ✓ 7. Energy and Conservation of Energy (ES)  
พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน
- ✓ 8. Innovation and Invention (IN)  
นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์
- ✓ 9. General Electrical Engineering (GN)  
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า
- ✓ 10. Special Session on Electric Vehicles and Railway Transit (SS)  
หัวข้อพิเศษทางยานยนต์และรถไฟฟ้าระบบราง

## กำหนดการสำคัญ

1. ~~27 มกราคม 2566~~ **ขยายรับบทความถึง 5 มีนาคม 2566**  
หมดเขตรับบทความ
2. ~~24 กุมภาพันธ์ 2566~~ **20 มีนาคม 2566**  
ประกาศผลการพิจารณาบทความ
3. ~~17 มีนาคม 2566~~ **26 มีนาคม 2566**  
หมดเขตรับบทความฉบับสมบูรณ์
4. 21 เมษายน 2566  
วันสุดท้ายของการลงทะเบียนล่วงหน้า
5. 1-3 พฤษภาคม 2566  
วันประชุมวิชาการ EENET 2023

## การส่งบทความ



Info & Submission



eenet2023.fit.rmuti.ac.th

## คณะกรรมการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

- |                              |                  |                            |                     |
|------------------------------|------------------|----------------------------|---------------------|
| 1.ศ.ดร.อุเทน คำนำน           | ประธานกรรมการ    | 8.ศ.ดร.สายชล ชุดเจริญ      | กรรมการ             |
| 2.ศ.ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญดี | รองประธานกรรมการ | 9.ศ.ดร.วราณี ศรีสงคราบ     | กรรมการ             |
| 3.ศ.ดร.สันติ หวังนิพนธ์      | กรรมการ          | 10.ศ.ดร.เอกวิทย์ หายีวงษ์  | กรรมการ             |
| 4.ศ.ดร.บุญอึ้ง ปะลังกลาง     | กรรมการ          | 11.ศ.ดร.วุฒิชัย ส่างขาม    | กรรมการ             |
| 5.ศ.ดร.เดลิน ปิยรัตน์        | กรรมการ          | 12.ศ.ดร.สิริชัย บุญปัทมกัน | กรรมการ             |
| 6.ศ.ดร.ศักดิ์ระวี ระวังกุล   | กรรมการ          | 13.ศ.ดร.ประสิทธิ์ กองสูง   | กรรมการและเลขานุการ |
| 7.ศ.ดร.พิทักษ์ บุญบุญ        | กรรมการ          |                            |                     |

## คณะกรรมการ IEEE-PES

- ศ.ดร.นพพร สิปรีชานนท์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- นายสมชาย หอมกลิ่นแก้ว รองผู้อำนวยการไฟฟ้านครหลวง
- ศ.ดร.อุทัยพิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ศ.ดร.นเรศเรขู พินนเดย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ศ.ดร.ธนพงษ์ สุวรรณศรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- ศ.ดร.ดร.สุพร สิริสำราญบุกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- ศ.ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ดร.ประดิษฐ์พงษ์ สุขสิริวารกุล Hitachi ABB Power Grids (Thailand)

**Faculty of Industry and Technology, Sakon Nakhon, RMUTI**  
042-772-391

จัดโดย สมาคมไฟฟ้าและพลังงานไอกริปเปิลอี (ประเทศไทย) (IEEE PES - Thailand)  
ร่วมกับ เครือข่ายวิชาการด้านวิศวกรรมไฟฟ้า (EENET) และ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี บทร.อีสาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



การควบคุมความเร็วรอบอาศัยเทคนิคแบบผสมโครงข่ายประสาทเทียมและอินทิกรัลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม

Hybrid Neural Network and Integra Technique based Speed Control of Three-Phase Induction Motor using Indirect-Vector Control

นิคม ก้านจักร<sup>1</sup>, เติมชาติ มาหาฬ<sup>1</sup>, วิจิตร กิจฉะว<sup>1</sup>, สักดาวุฒิ บุญคุ้ม<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10520

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตบูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี

131 หมู่ 10 ถนนบารามราวสุร ตำบลพลวง อำเภอเขาคิชฌกูฏ จังหวัดจันทบุรี 22210

E-mail: 64601080@kmitl.ac.th, kmchaler@kmitl.ac.th, vijit.ki@kmitl.ac.th, sakdawut\_bo@mmu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส อาศัยหลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมที่ใช้วิธีการแบบผสมโครงข่ายประสาทเทียมและอินทิกรัล เพื่อประมวลผลค่าแรงบิดอ้างอิงสำหรับวงรอบนอกความเร็วรอบแบบวงเปิด ได้มีการสร้างชุดค้นแบบและทดสอบโดยมีเงื่อนไขการทดสอบประกอบด้วยสภาวะเริ่มต้นหมุน, สภาวะที่มีโหลด, ความเร็วอ้างอิงต่างๆ และสภาวะกลับทางหมุน นอกจากนี้มีการจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองและทดสอบ พบว่าผลเป็นที่น่าพอใจสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสได้

คำสำคัญ: การควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมมอเตอร์, ไซบริค นิวรอนเน็ตเวิร์กและอินทิกรัล, ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส, การควบคุมความเร็วรอบ

Abstract

This paper presents speed control of a three-phase induction motor. Based on indirect vector control using hybrid neural network and integral method. In order to calculate the reference torque for closed-loop speed control. Prototypes was built and tested with various conditions including initial start-up, loading, several speed reference and reverse conditions. In addition, MATLAB/Simulink program is used to simulate the system to compare with test results. The results are satisfactory, and the speed the three-phase induction motor can be controlled.

Keywords: Indirect vector control, Hybrid Neural Network and Integra, Three-Phase induction motor, speed control

1. บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในอุตสาหกรรมเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะเห็นได้ชัดว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีราคาสูงและต้องการบำรุงรักษาเปลืองอย่างต่อเนือง ในส่วนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีการบำรุงรักษาน้อยอย่างไรก็ตามการใช้งานของมอเตอร์ที่มีการเสื่อมสภาพไปเพื่อชะลอการเสื่อมสภาพของมอเตอร์จึงต้องใช้เทคนิคที่ดีในการควบคุมมอเตอร์ในการทำงาน

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอกประกอบด้วยขดลวดสเตเตอร์ (Stator) ซึ่งมีขดลวดสามเฟสที่อยู่นบนร่องของสเตเตอร์ โดยวางเรียงห่างกันทำมุม 120° และยังมีส่วนประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือขดลวดโรเตอร์ (Rotor) โดยที่มันอยู่บนแท่งคานำแบบกรงกระรอก ถูกกั้นกลางด้วยฉนวนและที่ปลายทั้งสองข้างจะเชื่อมเข้าด้วยกันกับวงแหวนทำให้อุปกรณ์ทั้งสองข้างกับกรงกระรอกการทำงานของมันจะเหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสผสมคูลเข้าที่ไปขดลวดสเตเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนกระแสจากออกมาในช่องว่างอากาศ (air gap) โดยมีขนาดและ หมุนรอบ โรเตอร์ด้วยความเร็วที่เรียกว่าความเร็วจริง ไครน์ต (synchronous speed) การควบคุมมอเตอร์แบบทางอ้อม จะคล้ายกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบแยกกระแสซึ่งจะควบคุมแรงบิดและ ฟลักซ์โดยตรงจากกระแสของมอเตอร์ เพื่อปรับค่าแรงบิด d-q โดยกระแสสเตเตอร์หรือสนามแม่เหล็กในแนวแกน d จะควบคุมความเข้มของสนามแม่เหล็กให้มีค่าคงที่เมื่อต้องการเปลี่ยนแปลงความเร็วหรือแรงบิดให้เปลี่ยนองค์ประกอบในแนวแกน q โดยควบคุมกระแสที่โรเตอร์

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม โดยใช้ไซบริค โครงข่ายประสาทเทียมและอินทิกรัล มารวมกับเอาต์พุตของตัวโครงข่ายประสาทเทียมแสดงให้เห็นถึงการควบคุมแบบวงเปิดในรูปความเร็วของมอเตอร์แบบทางอ้อมและได้ทำการเปรียบเทียบกับชุดค้นแบบในการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมการตอบสนองของความเร็วรอบมอเตอร์, กระแสมอเตอร์ และแรงบิดของมอเตอร์ในสภาวะเริ่มต้นการหมุนของมอเตอร์, สภาวะมอเตอร์มีโหลดที่กำหนด, สภาวะกลับทางหมุนของมอเตอร์และกำหนดความเร็วอ้างอิง ซึ่งจะกล่าวถึงการออกแบบในรายละเอียดต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



**2. องค์ประกอบของงานวิจัยที่น่าสนใจ**

**2.1 การควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม**

เทคนิคการควบคุมแบบเวกเตอร์ต้องแปลงกรอบอ้างอิงสามเฟสให้อยู่ในกรอบอ้างอิง d-q โดยการควบคุมจะใช้หลักการเดียวกับมอเตอร์กระแสตรง รูปแบบสมการของมอเตอร์สามเฟสจะถูกแปลงให้อยู่ในแกน d-q สมการที่ (1-4) แรงดันที่ขดลวด สเตเตอร์และโรเตอร์ สมการที่ (5-8) ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดขดลวด สเตเตอร์และโรเตอร์ และสมการที่ (9) แรงบิดของมอเตอร์ที่ถูกแปลงมาอยู่บนแกน d-q

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} \tag{1}$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} \tag{2}$$

$$0 = R_r i_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} - \omega_r \lambda_{dr} \tag{3}$$

$$0 = R_r i_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} - \omega_r \lambda_{qr} \tag{4}$$

และฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ในพจน์ต่อไปนี้เป็น

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \tag{5}$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \tag{6}$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{ds} + L_m i_{ds} \tag{7}$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qs} + L_m i_{qs} \tag{8}$$

แรงบิดของมอเตอร์ดึงสมการต่อไปนี้เป็น

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) \lambda_m \times I_r, \quad T_e - T_L = \left( \frac{2}{P} \right) J \frac{d\omega_r}{dt} \tag{9}$$

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\lambda_{dm} i_{qs} - \lambda_{qm} i_{ds}) \tag{10}$$

แรงบิดทางไฟฟ้าที่ต้องการเพื่อควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม จะได้ตามสมการที่ (12)

$$T_e = K_T i_{ds} i_{qs} \quad \text{เมื่อ} \quad K_T = \frac{3 p L_m^2}{2 L_r} \tag{10}$$

การควบคุมแรงบิดของมอเตอร์จะควบคุมด้วยกระแส ( $i_{qs}^*$ ) เป็นหลักและในส่วนของารควบคุมฟลักซ์จะถูกควบคุมด้วยกระแส ( $i_{ds}^*$ ) ซึ่งจะมีค่าแปรตามกระแส ( $i_{qs}^*$ ) และ ( $i_{ds}^*$ ) ที่เร็วเนื่องจากมีค่า

แนบคืดที่ของการควบคุมที่สูง

การควบคุมเวกเตอร์แบบทางอ้อมจะใช้มุมในการหมุนที่ความเร็วเชิงโคไซน์  $\theta_c$  ดังสมการที่ (11) เนื่องจากต้องใช้มมดังกล่าวเพื่อ

หาตำแหน่งสำหรับการแปลงแกน (abc) ให้อยู่บนแกน (d-q) ซึ่งแกน d จะควบคุม ฟลักซ์และแกน q จะควบคุมแรงบิดและในการแปลงแกน (d-q) กลับเป็นแกน (abc) ใช้มุมในการหมุนที่ความเร็วเชิงโคไซน์เช่นกัน

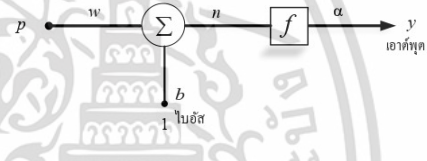
$$\theta_c = \int \omega_c dt = \int (\omega_{sl} + \omega_r) dt = \int \left( \omega_r + \frac{i_{qs}^*}{\tau_r i_{ds}^*} \right) dt \tag{11}$$

โดยความเร็วเชิงมุมสลิม  $\omega_{sl}$  ได้จากสมการที่ (12)

$$\omega_{sl} = \frac{i_{qs}^*}{\tau_r i_{ds}^*} \quad \text{เมื่อ} \quad \tau_r = \frac{L_r}{R_r} \tag{12}$$

**2.2 การควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียม**

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) ในงานวิจัยนี้เป็นการใช้นิวรอนแบบอินพุตเดียวแสดงดังรูปที่ 1 อินพุต x ถูกคูณด้วยน้ำหนักประสา (weight) W โดยมีไบอัส b (bias หรือ ออฟเซต-ออฟเซต) เป็นเสมือนอินพุตหนึ่งที่มีค่าน้ำหนักประสาคงที่กับ 1 อินพุตทั้งสองรวม (sum) ได้เอาต์พุตเป็น n ซึ่งจะเป็นอินพุตของฟังก์ชันถ่ายโอน f (transfer function หรือ activation function) และได้เอาต์พุตของนิวรอนคือ y



รูปที่ 1 นิวรอนอินพุตเดียว

เอาต์พุตของนิวรอนสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (13)

$$y = f(wp) + b \tag{13}$$

เอาต์พุตของนิวรอนจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันถ่ายโอน w และ b จะสามารถปรับค่าได้ นั่นคือเป็นพารามิเตอร์ของนิวรอน โดยปกติแล้วฟังก์ชันถ่ายโอนจะถูกออกแบบเลือกโดยผู้ใช้งานและพารามิเตอร์ w และ b จะถูกปรับค่าจากกฎการเรียนรู้

**2.3 ฟังก์ชันถ่ายโอน**

ฟังก์ชันถ่ายโอนทำหน้าที่รวมค่าเชิงตัวเลขเอาต์พุตของนิวรอน แล้วทำการตัดสินใจว่าจะส่งสัญญาณเอาต์พุตออกไปรูปแบบใด ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถเป็นได้ทั้งแบบเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นก็ได้ ในส่วนฟังก์ชันปรับการเรียนรู้ในงานวิจัยได้ใช้ ฟังก์ชันแทนซิกมอยด์ (tansigmoid) ในส่วน ชั้นนำเข้า (Input Layer) และ ชั้นซ่อน (Hidden Layer) ส่วน ชั้นผลลัพธ์ (Output layer) จะใช้ฟังก์ชันเพียวรีน (purelin) เพื่อที่จะได้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดน้อยที่สุด (Mean Square Error, MSE) และมีประสิทธิภาพในการทำงานที่แม่นยำ สำหรับฟังก์ชันการถ่ายโอนในแต่ละชั้นในรูปที่ (2) และ (3) ในสมการที่ (14) และ (15)

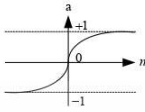
$$a = \text{Tansig}(n) = \frac{2}{1 + e^{-2n}} - 1 \tag{14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

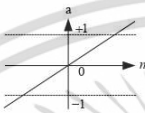
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



รูปที่ 2 ฟังก์ชันแทนซิกมอยด์(tan-sigmoid)

$$a = \text{Purelin}(n)$$



รูปที่ 3 ฟังก์ชันเพียวลิน (purelin)

โดยโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าแรงบิดจะแบ่งได้เป็น 1-10-1 ประกอบด้วยจำนวนนิวรอนในชั้นอินพุต 1 นิวรอน คือความเร็วรอบตั้งแต่ 1500-0 (-1500) จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน 10 นิวรอน และจำนวนนิวรอนในชั้นเอาต์พุต 1 นิวรอน คือแรงบิด ตั้งแต่ 30-0 (-30) ดังตารางที่ (1)

ตารางที่ (1) ข้อมูลโครงข่ายประสาทเทียม

อินพุตนิวรอน(ความเร็วรอบ)	เอาต์พุตนิวรอน(แรงบิดอ้างอิง)
1500	0
1400	-100
1300	-200
1200	-300
1100	-400
1000	-500
900	-600
800	-700
700	-800
600	-900
500	-1000
400	-1100
300	-1200
200	-1300
100	-1400
0	-1500

การจัดรูปแบบข้อมูลสำหรับการศึกษา (Training) และทดสอบ (Testing) จากจำนวนปัจจัยนำเข้า (Input) 1 ปัจจัยผลลัพธ์เป้าหมาย (Output) 1 ค่า โดยมีข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์จำนวน 31 ข้อมูลที่ได้

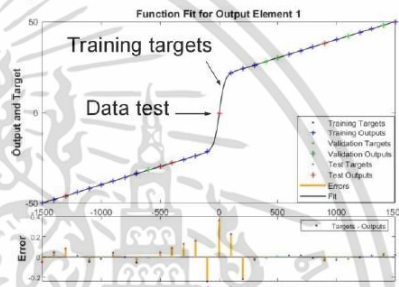
กำหนดจำนวนรอบในการวนซ้ำ (Epoch)=1000 โดยแปลงข้อมูลให้มีความระหว่าง 0-1 โดยใช้สมการที่ (16)

$$X = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (16)$$

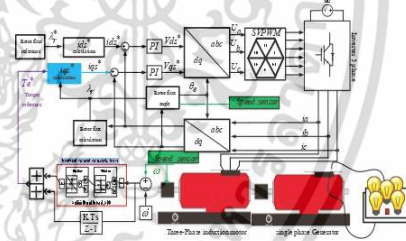
เมื่อทำการฝึกสอนและทดสอบและได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมแล้วข้อมูลที่ได้จะต้องถูกแปลงค่ากลับเป็นค่าจริงจากสมการที่ (17)

$$X = [X_i (X_{\max} - X_{\min}) + X_{\min}] \quad (17)$$

สามารถแสดงกราฟข้อมูลในการฝึกสอนของโครงข่ายโครงข่ายได้ดังรูปที่ (4)



รูปที่ 4 กราฟข้อมูลการฝึกสอนของโครงข่ายโครงข่ายโครงข่ายงานวิจัยจากที่กล่าวข้างต้น สามารถเขียนเป็นไคอะแกรมในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ไคอะแกรมการควบคุมความเร็วรอบโดยอาศัยเทคนิคไฮบริด นิวรอนเน็ตเวิร์กและอินทิกรัลใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม ไคอะแกรมจะแบ่งออกเป็นสองบล็อกคือบล็อกความเร็วและบล็อกกระแสในการควบคุมเวกเตอร์แบบทางอ้อมจะเป็นการนำโครงข่ายประสาทเทียมรวมกับอินทิกรัลประมวลผลการฟื้นฟูแรงบิดอ้างอิงในสภาวะขณะโหลด โดยอินพุตของโครงข่ายคือเงื่อนไขความเร็วรอบคิดผลของมอเตอร์ที่กล่าวมาจะเป็นในส่วนบล็อกความเร็วรอบ ในส่วนของแรงบิดอ้างอิงจะถูกนำไปประมวลผลเป็น (i<sub>qs</sub><sup>\*</sup>)

บล็อกกระแสจะควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI โดยนำค่า (Id) (Iq) อ้างอิงให้ตัวควบคุมประมวลผลเป็นแรงดันแกน vd และVq เพื่อนำไปสร้างสัญญาณ SVPWM ไปขับสวิตช์อินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์ เพื่อยืนยันความถูกต้องได้ทดสอบกับชุดต้นแบบ

### บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

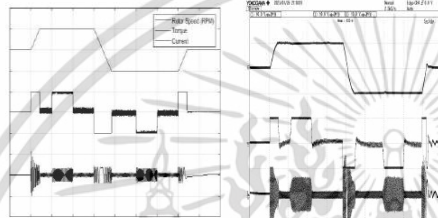
15<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



### 3. ผลการจำลองเปรียบเทียบกับชุดต้นแบบที่นำเสนอ

เพื่อยืนยันผลการจำลองของระบบ ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับชุดต้นแบบ โดยกำหนดสถานการณ์ต่อไปนี้ ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 1500 rpm ในสภาวะเริ่มต้นการหมุน, สภาวะขณะโหลดที่ 10 Nm, สภาวะกลับทางหมุนที่ -1500 rpm และกำหนดความเร็วอ้างอิงตามลำดับ

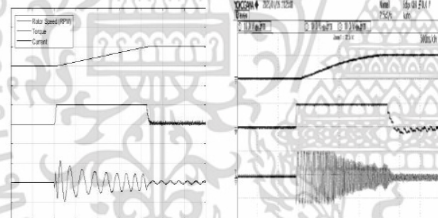
CH1 Rotor speed 1500 rpm/div CH2 Torque 10 Nm/div CH3 Current 10A/div



ผลการจำลอง ผลการทดสอบ

รูปที่ 6 หลักการการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางซ้อนที่มีวิธีการ ไรบรีด โคร่งข่ายประสาทิยม

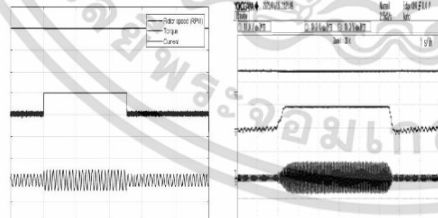
CH1 Rotor speed 1500 rpm/div CH2 Torque 10 Nm/div CH3 Current 10A/div



ผลการจำลอง ผลการทดสอบ

รูปที่ 7 สภาวะเริ่มต้นการหมุนของมอเตอร์

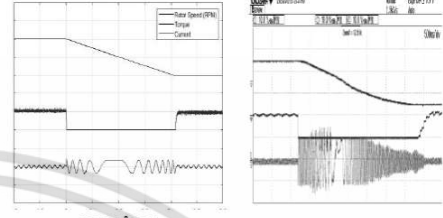
CH1 Rotor speed 1500 rpm/div CH2 Torque 10 Nm/div CH3 Current 10A/div



ผลการจำลอง ผลการทดสอบ

รูปที่ 8 สภาวะขณะ โหลดที่ 10 Nm.

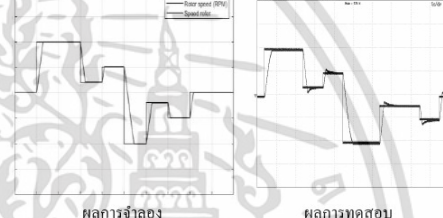
CH1 Rotor speed 1500 rpm/div CH2 Torque 10 Nm/div CH3 Current 10A/div



ผลการจำลอง ผลการทดสอบ

รูปที่ 9 สภาวะกลับทางหมุนของมอเตอร์จาก 1500 rpm เป็น -1500 rpm

CH1 Rotor speed 750 rpm/div CH2 Speed refer 750 rpm/div



ผลการจำลอง ผลการทดสอบ

รูปที่ 10 มอเตอร์เปลี่ยนแปลงความเร็วอ้างอิง

300rpm, 750rpm, 1500rpm, -1500 rpm, -750rpm, -300rpm

### 4 สรุป

สรุปผลจากการจำลองและการทดสอบกับชุดต้นแบบการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการเวกเตอร์คอนโทรลโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม พบว่าการตอบสนองของการควบคุมที่มีสมรรถนะที่ดีซึ่งสังเกตได้จาก การตอบสนองของความเร็วรอบมอเตอร์

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Hyung-Min Ryu, Jang-Hwan Kim, Student and Seung-Ki Sul, "Analysis of Multiphase Space Vector Pulse-Width Modulation Based on Multiple  $d-q$  Spaces Concept", IEEE Transactions on Power electronics, Vol. 20, no. 6, November 2005.
- [2] Prachya Peasura, "Artificial Neural Network Modeling for Prediction of Tensile Strength in Pressure Vessel Welding with Steel ASTM A537 Class 1", TNI Journal of Engineering and Technology Vol.7 No.2 July - December 2019.
- [3] นิคม ก้านจักร. (2565). การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสโดยอาศัยหลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางซ้อนที่มีวิธีการแบบโครงข่ายประสาทเทียม การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14 (น.129-132)สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

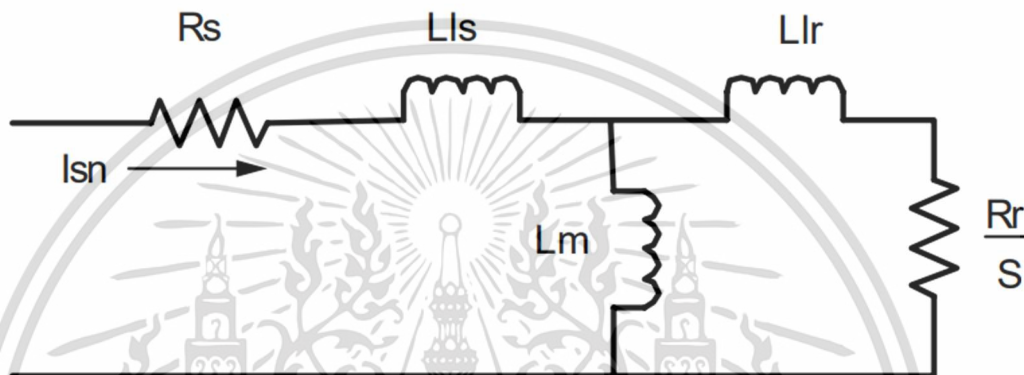
### ค่าทดสอบพารามิเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น SF-JR ขนาด 3 $\phi$

พารามิเตอร์ต่างๆ	สัญลักษณ์	ปริมาณค่าต่างๆ
พิกัดกำลังไฟฟ้า	$P_M$	2 HP (1.5 KW)
พิกัดแรงดันไฟฟ้า	$V_s$	220/380 V (rms)
พิกัดความถี่	$f$	50 Hz
พิกัดกระแสไฟฟ้า	$I_s$	3.5/6.5 A (rms)
พิกัดความเร็วของมอเตอร์ (ความเร็วทางกลศาสตร์)	$n_{rat}$	1450 (rpm)
จำนวนขั้วแม่เหล็ก	$P$	4 wyes
ค่าความเฉื่อยมอเตอร์	$J_{eq}$	0.001644 kg.m <sup>2</sup>
ความต้านทานตัวพันขดลวดที่สเตเตอร์	$R_s$	4.5 $\Omega$
ความต้านทานตัวพันขดลวดที่โรเตอร์	$R_r$	3.738 $\Omega$
ความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่สเตเตอร์	$L_{ls}$	15.917 H (50Hz)
ความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่โรเตอร์	$L_{lr}$	15.917 H (50Hz)
ความเหนี่ยวนำสร้างแม่เหล็กพร้อม	$L_m$	0.388 H (50Hz)
พิกัดฟลักซ์	$\lambda$	0.623 Wb

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1 การหาค่าพารามิเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 1 วงจรเสมือนมอเตอร์

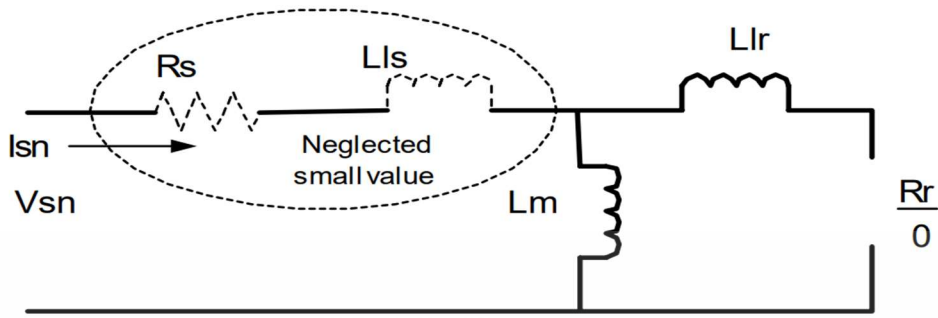
พิจารณาแรงดันและกระแสเฟสจากวงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ทำงานอยู่ในสถานะต่อไปนี

### 1.1 สถานะหยุดนิ่งของมอเตอร์

ซึ่งสถานะนี้จะสามารถหาค่าความต้านทานสเตเตอร์ได้จากการวัดค่าความต้านทานจากขดลวดสเตเตอร์

### 1.2 สถานะมอเตอร์ทำงานโดยไม่มีภาระโหลด

สถานะนี้ทำการหมุนมอเตอร์ที่ความเร็วสูงสุด ซึ่งทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ขดลวดสเตเตอร์น้อยมากเมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำร่วมจึงไม่นำมาพิจารณาร่วม แสดงวงจรเสมือนดังรูป



รูปที่ 2 วงจรเสมือนมอเตอร์ในสภาวะไม่มีโหลด

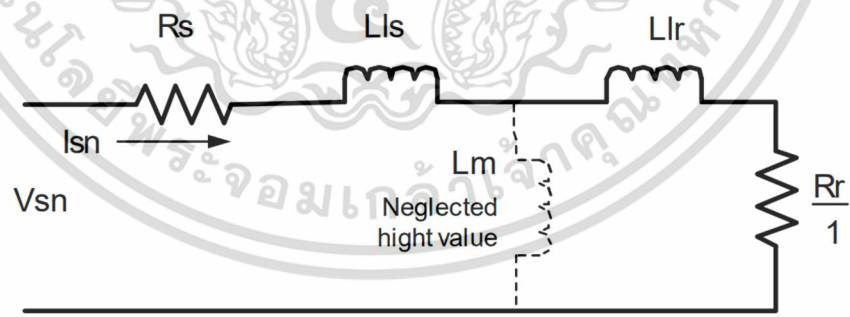
ค่าความเหนี่ยวนำรวมคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$L_m \frac{V_s}{I_s 2\pi f} \tag{1}$$

โดยที่  $f$  คือ ความถี่ที่จ่ายให้กับขดลวด

### 1.3 สภาวะมอเตอร์ทำงานโดยล้อยโรเตอร์

เมื่อทำการล้อยโรเตอร์ไม่ให้หมุนในขณะที่มอเตอร์ทำงานค่าสลิปมอเตอร์จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำรวมจะมีค่ามากเมื่อเทียบกับอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์และสเตเตอร์ จึงไม่นำพิจารณาไว้ในวงจร แสดงวงจรเสมือนดังรูป



รูปที่ 3 วงจรเสมือนมอเตอร์ทำงานในสภาวะล้อยโรเตอร์ไม่ให้หมุน

จากรูปที่  $R_{eq} = \frac{V_s}{I_s} \cos \theta$  (2)

$$X_{eq} = \frac{V_s}{I_s} \sin \theta$$
 (3)

โดยที่  $\theta$  มุมระหว่าง V และ I

$$R_{eq} = R_s + R_r$$
 (4)

ดังนั้นค่าความต้านทานโรเตอร์คำนวณจากสมการ

$$R_{eq} = R_s - R_r$$
 (5)

ค่าความเหนี่ยวนำในวงจร

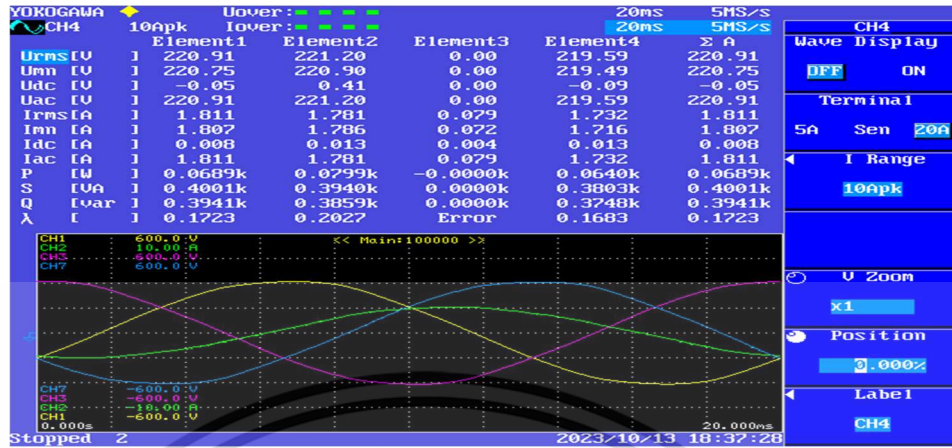
$$L_{eq} = \frac{X_{eq}}{2\pi f}$$
 (6)

โดยทั่วไปจะประมาณค่าความเหนี่ยวนำรั่วสเตเตอร์เท่ากับค่าความเหนี่ยวนำรั่วโรเตอร์

$$L_{ls} = L_{lr} = \frac{L_{eq}}{2}$$
 (7)

## 2 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากหลักการที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อนำไปทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น SF-JR ขนาด  $3\phi$  , 2 Hp , 4 pole , 380 V , 3.5 A , 50 Hz , 1450 rpm



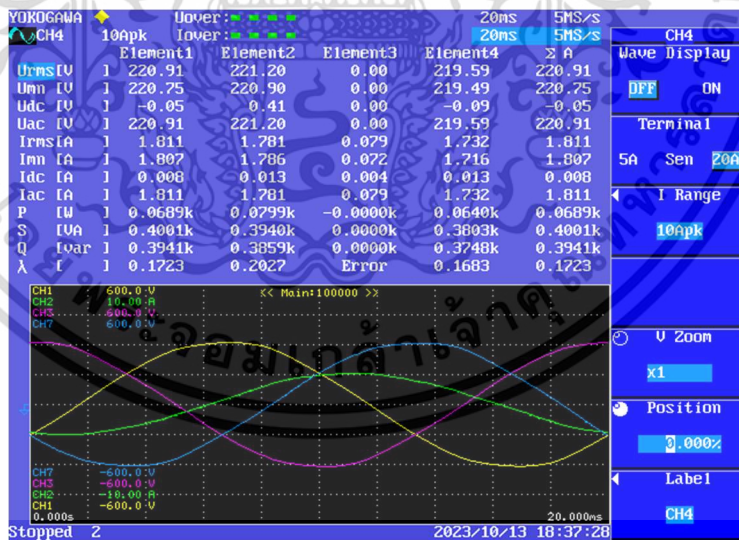
รูปที่ 4 พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในงานวิจัย

### 2.1 ทดสอบมอเตอร์หยุดนิ่ง

วัดค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ เท่ากับ  $R_s = 4.5 \Omega$

### 2.2 ทดสอบมอเตอร์สภาวะทำงานที่ไม่มีโหลด

แสดงการวัดค่าแรงดันและกระแสเฟสของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์ทำงานที่สภาวะไม่มีโหลด



รูปที่ 5 พารามิเตอร์แรงดันและกระแสของมอเตอร์ที่สภาวะไม่มีโหลด

$$V_s = 220.910 \text{ V}_{rms}, I_s = 1.811 \text{ A}, f = 50.000 \text{ Hz}, \text{p.f} = 0.1723, \theta = 80.004$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 1

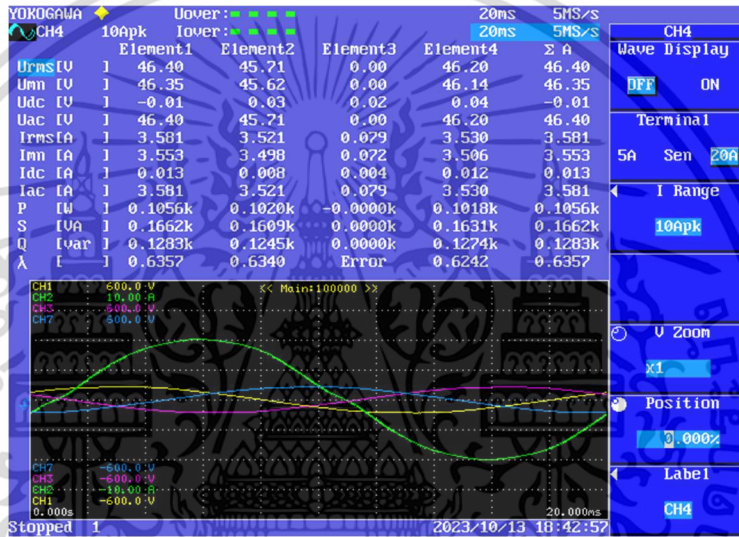
จะได้

$$L_m = \frac{220.91}{(1.811)(2\pi)(50)} = 0.388H \quad (8)$$

### 2.3 การทดสอบสภาวะมอเตอร์ทำงานโดยลือโครเตอร์

แสดงการวัดค่าแรงดันและกระแสเฟสของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์ทำงานโดยลือโครเตอร์ไม่ให้

หมุน



รูปที่ 6 พารามิเตอร์แรงดันและกระแสมอเตอร์ทำงานโดยลือโครเตอร์ไม่ให้หมุน

$$V_s = 46.400 \text{ V}_{rms}, I_s = 3.581 \text{ A}, f = 50.000\text{Hz}, \text{p.f} = 0.6357, \theta = 50.522$$

จากสมการที่ 2

$$R_{eq} = \frac{46.40}{3.581} \cos(50.522) = 8.238 \Omega \quad (9)$$

จากสมการที่ 5

$$R_r = 8.238 - 4.5 = 3.738 \Omega \quad (10)$$

จากสมการที่ 3

$$X_{eq} = \frac{46.40}{3.581} \sin(50.522) = 10.001 \Omega \quad (11)$$

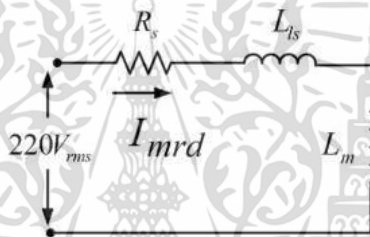
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 6 และ 7

$$L_{eq} = \frac{10.001}{2\pi(50)} = 31.834 \text{ mH} \quad (12)$$

$$L_{ls} = L_{lr} = \frac{31.834}{2} = 15.917 \text{ mH} \quad (13)$$

ขนาดพิกัดพิกซ์ของมอเตอร์ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 7 วงจรสมมูลขนาดพิกัดโรเตอร์พิกซ์

จากวงจรสมมูลเมื่อพิจารณา กระแส  $I_{mrd}$  จะได้

$$I_{mrd} = \frac{220}{\sqrt{R_s^2 + X_s^2}} \text{ A} \quad (14)$$

โดย  $R_s = 4.5 \ \Omega$  จากนั้นหา  $X_s$  ได้จากสมการที่

$$X_s = 2\pi f(L_{ls} + L_m) \Omega \quad (15)$$

จะได้

$$X_s = 2\pi \times 50(15.917 + 0.388) = 126.890 \Omega \quad (16)$$

จากนั้นแทนสมการที่ (16) ลงไปในสมการที่ (17) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{mrd} = \frac{144.337}{\sqrt{4.5^2 + 126.890^2}} = 1.136A \quad (17)$$

จากนั้นพิจารณา

$$|I_{mrd}| = \sqrt{I_{sq}^2 + I_{sd}^2} A \quad (18)$$

เมื่อ  $I_{sq} = 0A$  จะได้  $I_{sd}^* = \sqrt{2}I_{mrd}$

จะได้

$$I_{sd}^* = \sqrt{2} \times 1.136 = 1.607A \quad (19)$$

ดังนั้นแทนค่า  $I_{sd}^*$  ลงในสมการที่ (20)

$$\lambda_r = I_{sd}^* L_m \quad (20)$$

จะได้เป็น

$$\lambda_r = I_{sd}^* L_m = 1.607 \times 0.388 = 0.623Wb \quad (21)$$



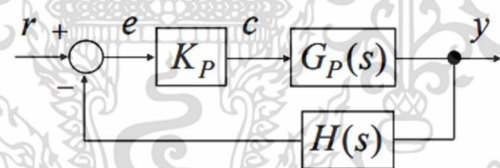
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 1 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

ตัวควบคุมแบบพีไอดี เป็นตัวควบคุมที่พบบ่อยมากที่สุดในงานอุตสาหกรรมทั่วไป เพราะเป็นตัวควบคุมที่ใช้งานง่าย การปรับค่าเกนอาศัยหลักการที่ไม่ได้ซับซ้อนมาก แต่ให้ผลตอบสนองเป็นที่ยอมรับได้สามารถปรับแต่งการควบคุมได้ง่ายเมื่อต้องการระบบควบคุมแบบพีไอดีมีตัวควบคุมย่อย 3 ตัว คือ 1) ตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือตัวควบคุมพี 2) ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมไอ และ 3) ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมดีในการควบคุมระบบทั่วไปมักใช้งานตัวควบคุมร่วมกัน เช่น การควบคุมแบบพีไอ การควบคุมแบบพีดี และการควบคุมแบบพีไอดี โดยงานวิจัยนี้จะยกตัวอย่างเป็นการควบคุมแบบพีไอ ซึ่งรายละเอียดการทำงานของตัวควบคุมมีดังนี้

## 1.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือตัวควบคุมแบบพี ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุมแล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการขยายสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าวด้วยค่าเกนของตัวควบคุม บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังรูปที่ 5



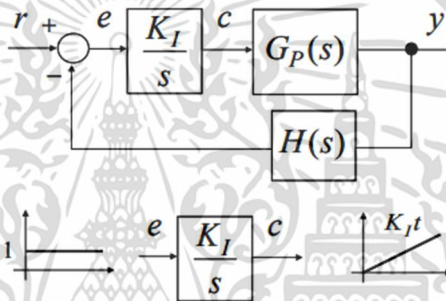
รูปที่ 1 ตัวควบคุมแบบพี

จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ การปรับค่าเกนให้สูงขึ้นจะมีผลทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น ปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในการนำไปใช้งานก็คือ ถ้านำไปใช้กับระบบ ชนิด 0 (System type 0) ตัวควบคุมแบบนี้จะไม่สามารถขจัดค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวได้ แต่ก็สามารถทำให้ค่าความผิดพลาดดังกล่าวมีค่าน้อยลงได้ด้วยการปรับค่าเกนให้สูง ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว การปรับค่าเกนให้สูงมากขนาดไหนเอาต์พุตที่ออกจริงๆ จากตัวควบคุมมักมีค่าจำกัด และการปรับเกนให้มีค่าสูงสำหรับระบบที่มีอันดับสูง อาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์ เช่น การปรับ

เกณฑ์ให้สูงขึ้นสำหรับระบบอันดับสอง ผลที่ตามมาคือค่าพุงเกินก็จะสูงขึ้นตามด้วย ซึ่งอาจจะเป็นอันตรายต่อระบบได้

### 1.2 ตัวควบคุมแบบปริพันธ์

ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมแบบไอ ตัวควบคุมแบบนี้จะนำสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการอินทิเกรตสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าวแล้วคูณด้วยค่าเกนของตัวควบคุม บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังรูปที่ 2

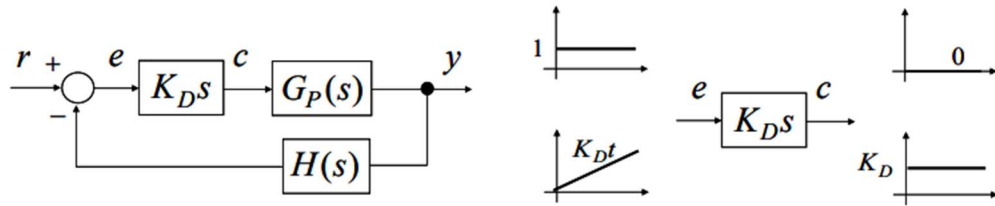


รูปที่ 2 ตัวควบคุมแบบไอ

จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ นำไปใช้กับระบบชนิด 0 (System type 0) ตัวควบคุมแบบนี้จะสามารถกำจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้ ข้อด้อยที่อาจเกิดขึ้นในการนำไปใช้งานก็คือ ตัวควบคุมแบบนี้ไม่สามารถลดผลของการพุงเกินของผลตอบสนองได้ และการปรับเกณฑ์ให้มีค่าสูงอาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์ เช่นการปรับเกณฑ์ให้สูงขึ้นอาจจะมีผลทำให้ผลตอบสนองของระบบเกิดการแกว่งตัวได้

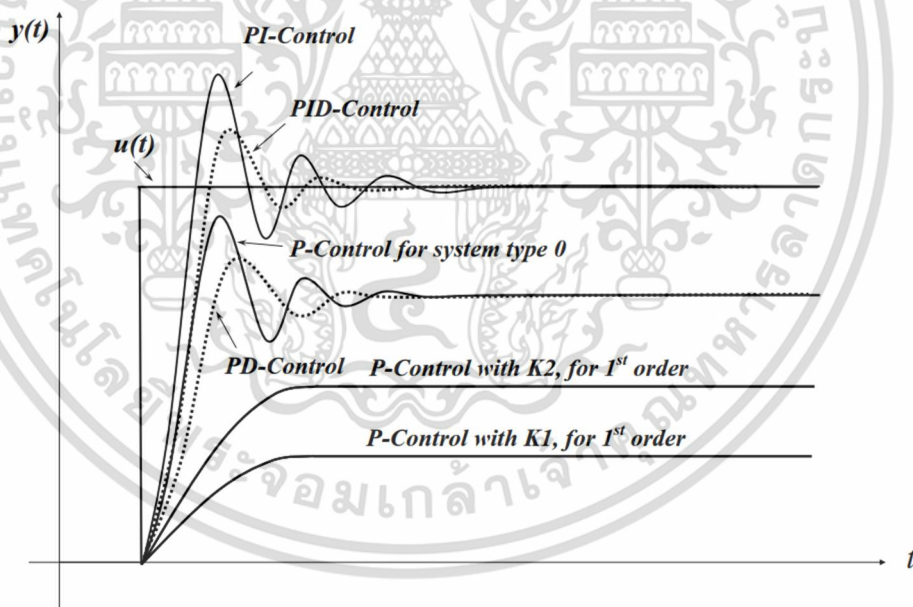
### 1.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์หรือตัวควบคุมแบบดี ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณความผิดพลาดระหว่าง สัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการอนุพันธ์สัญญาณความผิดพลาดดังกล่าว แล้วคูณด้วยค่าเกนของตัวควบคุม บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตัวควบคุมแบบดี

จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ ตัวควบคุมแบบนี้ใช้สำหรับลดผลของการพุ่งเกินของผลตอบสนองได้ ลดผลตอบสนองที่มีการเปลี่ยนแปลงไปมาได้ แต่ต้องปรับค่าเกณฑ์ให้เหมาะสมด้วยไม่เช่นนั้น อาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่พึงประสงค์ ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในการนำเอาตัวควบคุมนี้ไปใช้งานก็คือ ตัวควบคุมแบบนี้จะไม่สามารถนำไปใช้กับระบบที่มีสัญญาณรบกวนได้เพราะตัวควบคุมนี้จะขยายสัญญาณรบกวนทำให้ระบบทำงานเพี้ยนได้ ตัวอย่างผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดของระบบต่างๆ ด้วยการใช้งานระบบ ควบคุมพีไอดีในลักษณะต่างๆกัน เป็นดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลตอบสนองจากการนำเอาตัวควบคุมพีไอดีแบบต่างๆ ไปใช้กับระบบหลายๆแบบ

จากรูปที่ 4 จะเห็นว่า ถ้าหากนำตัวควบคุมแบบพีไอไปใช้กับระบบที่เป็นอันดับหนึ่ง ผลตอบสนองที่ได้จะมีค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว ซึ่งสามารถลดผลกระทบได้ด้วยการเพิ่มค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมให้สูงขึ้น สำหรับการนำไปใช้กับระบบที่มีอันดับสูงกวานั้น และเป็นระบบชนิด 0 ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวก็ยังคงมีค่าอยู่ และการลดผลกระทบด้วยการปรับค่าเกณฑ์ของตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมพีให้สูงขึ้น อาจส่งผลให้การพุ่งเกินมีค่าสูงขึ้นได้ถ้าหากใช้ตัวควบคุมร่วมกันระหว่าง พี กับ ไอ หรือตัวควบคุมแบบพีไอกับระบบนี้แล้ว ตัวควบคุมแบบไอ จะช่วยขจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว แต่ผลตอบสนองที่ได้จะยังมีค่าพุ่งเกินเหมือนเดิม ถ้าหากใช้ตัวควบคุมร่วมกันระหว่าง พี กับ ดี หรือตัวควบคุมแบบ พีดี กับระบบนี้แล้ว การพุ่งเกินของผลตอบสนองก็จะลดลง แต่ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวก็ยังคงอยู่ ดังนั้นถ้าหากใช้ตัวควบคุมร่วมกันระหว่าง พี ไอ และ ดี ด้วยการปรับค่าเกณฑ์ให้เหมาะสมกับระบบนั้น ๆ ก็จะได้ผลตอบสนองแบบหน่วงต่ำกว่า วิกฤตที่มีค่าพุ่งเกินเหมาะสมกับระบบนั้น ๆ

#### 1.4 การทดสอบหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบพีไอดี

จากรูปที่ 4 จะเห็นว่า การที่จะได้ผลตอบสนองที่เหมาะสมของตัวควบคุมแต่ละแบบนั้นขึ้นอยู่กับอันดับ และชนิดของระบบเป็นสำคัญ และระบบแต่ละระบบมีค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมต่าง ๆ กันออกไป ทั้งนี้ยังต้องรวมไปถึงข้อกำหนดคุณลักษณะในการออกแบบด้วย เพื่อให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่ผู้ใช้และผู้ออกแบบพึงพอใจ

การให้ได้มาซึ่งค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับระบบทั่ว ๆ ไปที่อาจจะมีอันดับสูงเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยากในที่นี่จะนำเสนอวิธีการทดสอบระบบเพื่อหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่เป็นที่ยอมรับด้วยกันอยู่ 2 วิธีคือ

- 1) วิธีการของซีเกลอร์-นิโคล (Ziegler-Nichols Compensation)
- 2) วิธีการของเชน-ฮรอน-เรสวิก หรือซีเฮสอาร์ (Chien-Hrones-Reswick or CHR)

#### 1.5 การทดสอบด้วยวิธีการของซีเกลอร์นิโคล

การทดสอบวิธีนี้มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่1) ต่อระบบควบคุมเป็นแบบวงรอบปิดด้วยตัวควบคุมแบบพีด้วยการป้อนกลับแบบหนึ่งหน่วย

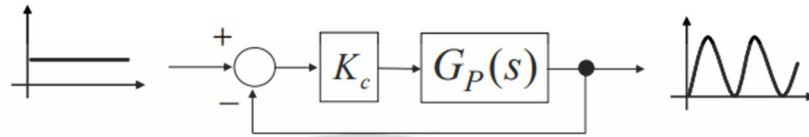
ขั้นตอนที่2) ทดสอบระบบด้วยสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได

ขั้นตอนที่3) ปรับค่าเกณฑ์ให้สูงขึ้นจนกระทั่งเกิดผลตอบสนองแบบไม่มีการหน่วง (Undamped) ดังรูปที่

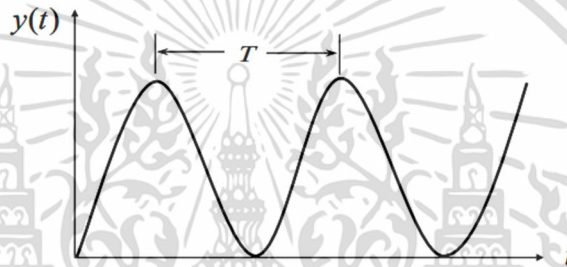
5 และรูปที่ 6

ขั้นตอนที่4) บันทึกค่าเกน (  $K_c$  )และคาบเวลาของการแกว่ง ตัว (  $T$  )

ขั้นตอนที่5) นำค่าเกนและคาบเวลาของการแกว่ง ตัวที่ได้ไปเข้าสู่สูตรเพื่อหาค่าเกนที่ เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมแต่ละแบบ



รูปที่ 5 การทดสอบระบบด้วยวิธีการของซีเกลอร์นิโคล



รูปที่ 6 ลักษณะของผลตอบสนองที่ได้

นำค่าเกนและคาบเวลาของการแกว่งมาเข้าสู่สูตรเพื่อหาค่าเกนที่เหมาะสมของระบบ ควบคุมพีไอดี ตามฟังก์ชันถ่ายโอนนี้

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

หรือ

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

โดยที่

$$K_I = \frac{K_p}{T_i}, K_D = K_p T_d$$

ค่าเกนที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมแต่ละแบบเป็นดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมตามวิธีการของซีเกลอร์นิกโคล

	$K_P$	$K_I$	$K_D$
<i>P – Control</i>	$0.5K_c$		
<i>PI – Control</i>	$0.45K_c$	$0.45K_c / 0.83T$	
<i>PID – Control</i>	$0.6K_c$	$0.6K_c / 0.5T$	$0.6K_c / 0.125T$

### 1.6 การทดสอบระบบด้วยวิธีการของซีเกลอร์นิกโคล

#### ลูปรอบความเร็วรอบ

จากทฤษฎีของซีเกลอร์นิกโคลจึงได้ทำการออกแบบการควบคุมแบบ PI ในลูปรอบความเร็วรอบ โดยการวิเคราะห์คำนวณหาความหาค่าความสัมพันธ์ของ  $K_P$  และ  $K_I$  โดยนำมาเปรียบเทียบกับ ตารางที่ 1 ค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมตามวิธีการของซีเกลอร์นิกโคลโดยค่าพารามิเตอร์เท่ากับ  $K_c = 0.55$   
 $T = 0.46$

	$K_P$	$K_I$	$K_D$
<i>PI – Control</i>	$(0.45 \times 0.55)$ $= 0.25$	$(0.45 \times 0.55) / (0.83 \times 0.46)$ $= 0.65$	

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับตารางของซีเกลอร์นิกโคลแล้วจะได้ค่า  $K_P$  คือ 0.25 และ  $K_I$  คือ 0.65

#### ลูปรอบกระแส

จากทฤษฎีของซีเกลอร์นิกโคลจึงได้ทำการออกแบบการควบคุมแบบ PI ในลูปรอบกระแสโดยการวิเคราะห์คำนวณหาความหาค่าความสัมพันธ์ของ  $K_P$  และ  $K_I$  โดยนำมาเปรียบเทียบกับตารางที่ 1 ค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมตามวิธีการของซีเกลอร์นิกโคลโดยค่าพารามิเตอร์เท่ากับ  $K_c = 2.22$   
 $T = 0.061$

	$K_P$	$K_I$	$K_D$
<i>PI – Control</i>	$(0.45 \times 2.22)$ $= 1$	$(0.45 \times 2.22) / (0.83 \times 0.061)$ $= 20$	

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับตารางของซีเกลอร์นิกอลแล้วจะได้ค่า  $K_p$  คือ 1 และ  $K_i$  คือ 20  
เนื่องจากใช้พารามิเตอร์ของมอเตอร์เดียวกันในการหาค่า ดังนั้นตัวควบคุม PI ในแกนดีและแกนควจึง  
ใช้ค่าเกนของค่า  $K_p$  และ  $K_i$  เหมือนกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางข้อมูลของโครงข่ายประสาทเทียม

### การออกแบบตัวควบคุมของรูปความเร็ว

ตารางที่ 2 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์

ข้อมูลอินพุต	ข้อมูลเอาต์พุต
ความเร็วรอบเอเรอะ	แรงบิดอ้างอิง
3.094	3.094
2.887	2.887
2.681	2.681
2.475	2.475
2.269	2.268
2.062	2.062
1.856	1.856
1.650	1.650
1.443	1.443
1.237	1.237
1.031	1.031
0.825	0.825
0.618	0.618
0.412	0.412
0.206	0.206
0	0
-0.206	-0.206
-0.412	-0.412
-0.618	-0.618
-0.825	-0.825
-1.031	-1.031
-1.237	-1.237
-1.443	-1.443
-1.650	-1.650
-1.856	-1.856
-2.062	-2.062
-2.269	-2.268
-2.475	-2.475
-2.681	-2.681
-2.887	-2.887
-3.094	-3.094

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

ข้อมูลอินพุต	ข้อมูลเอาต์พุต
ความเร็วรอบเอวเระ (red)	แรงบิดอ้างอิง (N.m)
157.05	75
146.58	70
136.11	65
125.64	60
115.17	55
104.7	50
94.23	45
83.76	40
73.29	35
62.82	30
52.35	25
41.88	20
31.41	15
20.94	10
10.47	5
0	0
-10.47	-5
-20.94	-10
-31.41	-15
-41.88	-20
-52.35	-25
-62.82	-30
-73.29	-35
-83.76	-40
-94.23	-45
-104.7	-50
-115.17	-55
-125.64	-60
-136.11	-65
-146.58	-70
-157.05	-75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบตัวควบคุมของลูกระแสบนแกน $d$

ตารางที่ 4 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตกระแสบนแกน  $d$  ที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์

อินพุตโครงข่าย		เอาต์พุตโครงข่าย
$I_{d_{ero}}$	$T_e^*$	กรอบอ้างอิงแกนหมุน $d$
3.300	3.094	0
3.080	2.887	0.235
2.860	2.681	0.471
2.640	2.475	0.707
2.420	2.268	0.942
2.200	2.062	1.178
1.980	1.856	1.414
1.760	1.650	1.650
1.540	1.443	1.885
1.320	1.237	2.121
1.100	1.031	2.357
0.880	0.825	2.593
0.660	0.618	2.828
0.440	0.412	3.064
0.220	0.206	3.300
0	0	0
-0.220	-0.206	-3.300
-0.440	-0.412	-3.064
-0.660	-0.618	-2.828
-0.880	-0.825	-2.593
-1.100	-1.031	-2.357
-1.320	-1.237	-2.121
-1.540	-1.443	-1.885
-1.760	-1.650	-1.650
-1.980	-1.856	-1.414
-2.200	-2.062	-1.178
-2.420	-2.268	-0.942
-2.640	-2.475	-0.707
-2.860	-2.681	-0.471
-3.080	-2.887	-0.235
-3.300	-3.094	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตกระแสบนแกน  $d$  ที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

อินพุตโครงข่าย		เอาต์พุตโครงข่าย
$I_{d_{ero}}$ (A)	$T_e^*$ (N.m)	กรอบอ้างอิงแกนหมุน $d$ (V)
3	75	0
2.8	70	0.1
2.6	65	0.2
2.4	60	0.3
2.2	55	0.4
2	50	0.5
1.8	45	0.6
1.6	40	0.7
1.4	35	0.8
1.2	30	0.9
1	25	1
0.8	20	1.1
0.6	15	1.2
0.4	10	1.3
0.2	5	1.4
0	0	0
-0.2	-5	-1.4
-0.4	-10	-1.3
-0.6	-15	-1.2
-0.8	-20	-1.1
-1	-25	-1
-1.2	-30	-0.9
-1.4	-35	-0.8
-1.6	-40	-0.7
-1.8	-45	-0.6
-2	-50	-0.5
-2.2	-55	-0.4
-2.4	-60	-0.3
-2.6	-65	-0.2
-2.8	-70	-0.1
-3	-75	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบตัวควบคุมของลูกระแสบนแกน $q$

ตารางที่ 6 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตกระแสบนแกน  $q$  ที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์

อินพุตโครงข่าย		เอาต์พุตโครงข่าย
$I_{q_{erro}}$	$T_e^*$	กรอบอ้างอิงแกนหมุน $q$
3.300	3.094	3.300
3.080	2.887	3.064
2.860	2.681	2.828
2.640	2.475	2.593
2.420	2.268	2.357
2.200	2.062	2.121
1.980	1.856	1.885
1.760	1.650	1.650
1.540	1.443	1.414
1.320	1.237	1.178
1.100	1.031	0.942
0.880	0.825	0.707
0.660	0.618	0.471
0.440	0.412	0.235
0.220	0.206	0.117
0	0	0
-0.220	-0.206	-0.117
-0.440	-0.412	-0.235
-0.660	-0.618	-0.471
-0.880	-0.825	-0.707
-1.100	-1.031	-0.942
-1.320	-1.237	-1.178
-1.540	-1.443	-1.414
-1.760	-1.650	-1.650
-1.980	-1.856	-1.885
-2.200	-2.062	-2.121
-2.420	-2.268	-2.357
-2.640	-2.475	-2.593
-2.860	-2.681	-2.828
-3.080	-2.887	-3.064
-3.300	-3.094	-3.300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตกระแสบนแกน  $q$  ที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

อินพุตโครงข่าย		เอาต์พุตโครงข่าย
$I_{q_{erro}}$ (A)	$T_e^*$ (N.m)	กรอบอ้างอิงแกนหมุน $q$ (V)
30	75	1.4
28	70	1.3
26	65	1.2
24	60	1.1
22	55	1
20	50	0.9
18	45	0.8
16	40	0.7
14	35	0.6
12	30	0.5
10	25	0.4
8	20	0.3
6	15	0.2
4	10	0.1
2	5	0.05
0	0	0
-2	-5	-0.05
-4	-10	-0.1
-6	-15	-0.2
-8	-20	-0.3
-10	-25	-0.4
-12	-30	-0.5
-14	-35	-0.6
-16	-40	-0.7
-18	-45	-0.8
-20	-50	-0.9
-22	-55	-1
-24	-60	-1.1
-26	-65	-1.2
-28	-70	-1.3
-30	-75	-1.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



**ชื่อ-นามสกุล** นายนิคม ก้านจักร

**วัน เดือน ปี เกิด** 07 พฤศจิกายน 2540 จังหวัด ร้อยเอ็ด

**ที่อยู่** 14 ประชานิเวศน์ 3 ซอย 13/1 แขวงท่าทราย อำเภอเมืองนนทบุรี 11000

**ประวัติการศึกษา** สำเร็จประถมศึกษา โรงเรียนบ้านโพนสะอาด อําเภอยางชุมน้อย จังหวัดร้อยเอ็ด  
สำเร็จมัธยมศึกษา โรงเรียนเหล่าหลวงประชานุสรณ์ อําเภอยางชุมน้อย จังหวัดร้อยเอ็ด  
สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรีสมุทรปราการ

**ผลงานวิจัย** นิคม ก้านจักร, เฉลิมชาติ มานพ, วิจิตร กิจมเรศ, อัครกิตติ์ ไชยชนกุลวัฒน์, ศักดา วุฒิ บุญคุ้ม การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีเวกเตอร์คอนโทรลโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม การประชุมวิชาการโครงข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14 14th Conference of Electrical Engineering Network 2022 (EENET 2022)  
นิคม ก้านจักร, เฉลิมชาติ มานพ, วิจิตร กิจมเรศ, ศักดา วุฒิ บุญคุ้ม การควบคุมความเร็วรอบอาศัยเทคนิคแบบผสมโครงข่ายประสาทเทียมและอินทิกรัลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม การประชุมวิชาการโครงข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15 15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้