การควบคุมแรงบิดและความเร็วด้วยฟัซซี่ลอจิกสำหรับการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่

วิทยานิพนธ์

ของ

วิไลพร เงินบาท

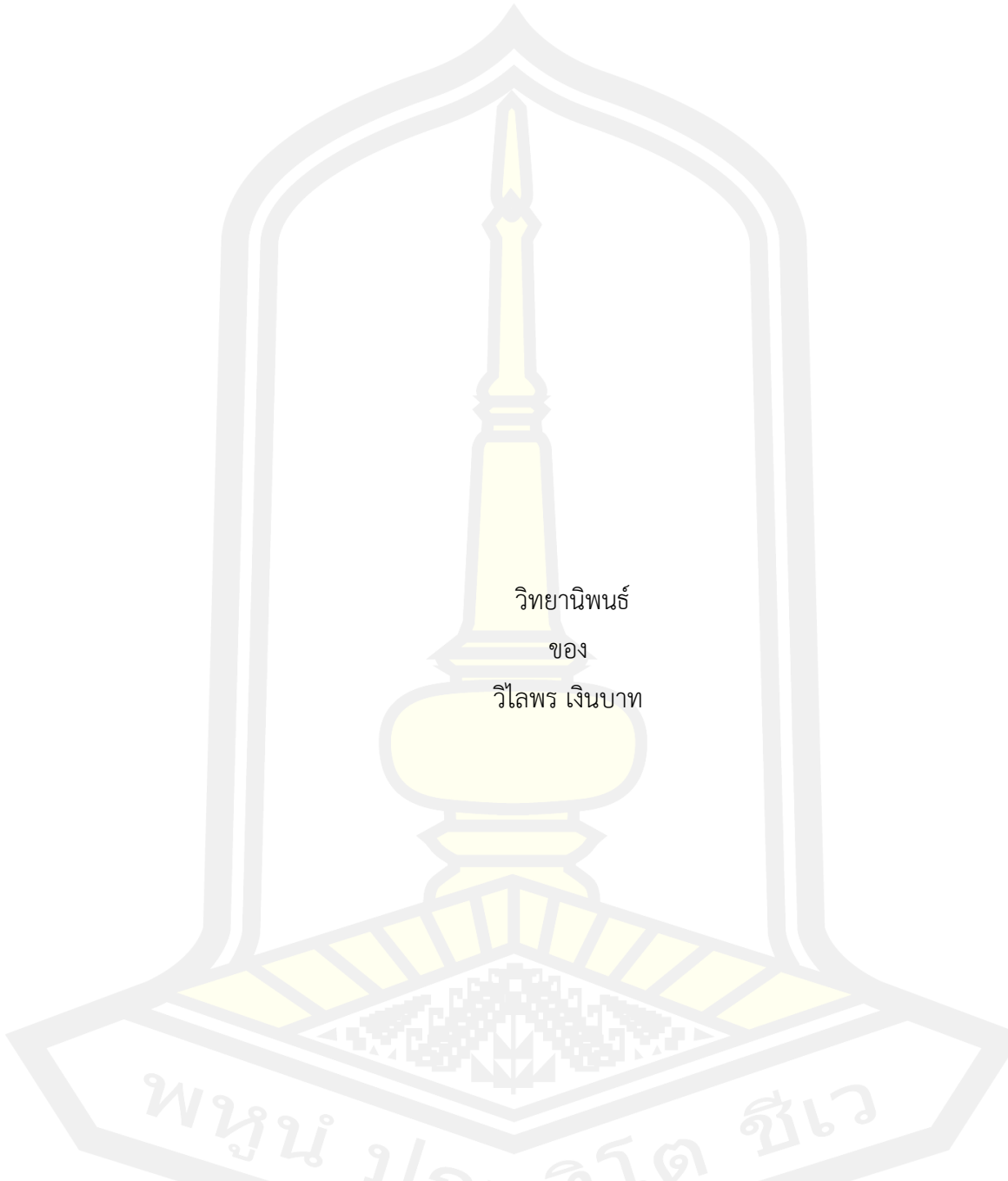
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

เมษายน 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การควบคุมแรงบิดและความเร็วด้วยฟัซซี่ลอจิกสำหรับการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่



วิทยานิพนธ์

ของ

วิไลพร เงินบาท

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

เมษายน 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Torque-Speed Control for Dual Induction Motor Drive using Fuzzy Logic

Wilaiporn Ngernbath

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements

for Doctor of Philosophy (Electrical and Computer Engineering)

April 2022

Copyright of Mahasarakham University

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาววิไลพร เงินบาท แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผศ. ดร. อดิเรก จันตะคุณ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รศ. ดร. ชลธี โพธิ์ทอง)

.....กรรมการ
(ผศ. ดร. นิวัตร์ อังควิศิษฐพันธ์)

.....กรรมการ
(ผศ. ดร. ณัฐวุฒิ สุวรรณทา)

.....กรรมการ
(รศ. ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....	.....
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)	(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง การควบคุมแรงบิดและความเร็วด้วยฟัซซี่ลอจิกสำหรับการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่

ผู้วิจัย วิไลพร เงินบาท

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. ชลธี โพธิ์ทอง

ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต **สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม **ปีที่พิมพ์** 2565

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการการศึกษาและพัฒนาการควบคุมแรงบิดและความเร็วด้วยฟัซซี่ลอจิกสำหรับการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่แบบใหม่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อแบ่งภาระโหลดระหว่างมอเตอร์ ประกอบด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสสองตัวซึ่งมีการควบคุมความเร็วและแรงบิดให้เป็นอิสระต่อกัน ออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่และดำเนินการจัดสร้างชุดทดลองเพื่อเป็นต้นแบบของระบบขับมอเตอร์คู่ แสดงการวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางไฟฟ้ากับความเร็วรอบของระบบโดยสมการจะใช้รูปแบบของปาร์คเพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ ประมาณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการสร้างแบบจำลองของระบบขับเคลื่อน โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลอง สำหรับการควบคุมความเร็วและแรงบิดได้เสนอวิธีการควบคุมมอเตอร์แบบแรงบิดโดยตรงควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิก เพื่อควบคุมความเร็วและแรงบิดของการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีมาประมวลผลการตัดสินใจในการเลือกเวกเตอร์แรงดันแทนแถบฮิตเตอรีซีสของวิธีการควบคุมแรงบิดโดยตรงแบบดั้งเดิม เพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนและยังสามารถลดการกระเพื่อมของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ได้อีกด้วย

คำสำคัญ : มอเตอร์ขับเคลื่อนคู่, ฟัซซีลอจิก, มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส, การควบคุมแรงบิด, การควบคุมความเร็ว

TITLE Torque-Speed Control for Dual Induction Motor Drive using Fuzzy Logic

AUTHOR Wilaiporn Ngernbath

ADVISORS Associate Professor Chonlatee Photong , Ph.D.

DEGREE Doctor of Philosophy **MAJOR** Electrical and Computer Engineering

UNIVERSITY Mahasarakham University **YEAR** 2022

ABSTRACT

This thesis presents torque-speed control for dual induction motor drive using fuzzy logic. This research presents a mathematical model for a coupling set of a novel dual motor drive system for electric vehicles which is designed to support the load sharing between the two motors. The mathematical model presents the relationship between torque and speed of the dual induction motor drive system by using the Park's transformation to simplify the calculations and models in accordance with the identification of relevant parameters of the three phase induction motor for both electrical aspects and mechanical inertia perspectives. Tests were conducted by using the MATLAB program. The direct torque control using Fuzzy Logic to control torque and speed of the dual motor drive system was proposed. Fuzzy Logic Controller was used to select the output voltage vector instead of the conventional method for improving the system performance while reducing the ripple of torque and current of stator.

Keyword : dual motor drive, fuzzy logic, induction motor, torqure control, speed control

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจาก บุคคลต่าง ๆหลายท่านดังนี้ รองศาสตราจารย์ ดร.ชลธี โพธิ์ทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสคอยให้คำชี้แนะ ดูแลเอาใจใส่และแนะนำแนวทางทั้งการเรียนการทำงานและการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ท่านอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ท่านคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำที่ดีเพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์และสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่าน ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้การช่วยเหลือสนับสนุนการวิจัย

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่สนับสนุนทุนการศึกษา และทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2560

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2564

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษา อย่างดียิ่งมาโดยตลอด รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อและทุกข์ใจ ช่วยให้มีพลังเข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาอุปสรรคต่าง ๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

วิไลพร เงินบาท

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพประกอบ ..... ฏ

บทที่ 1 1

บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย 3

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 4

บทที่ 2 5

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล 5

2.1 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 5

2.1.1 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 6

2.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 7

2.1.3 การแปลงของคลาร์ก (Clarke’s Transformation) 9

2.1.4 การแปลงของปาร์ค (Park’s Transformation) 11

2.1.5 การควบคุมแบบอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ (V/F control) 16

2.1.6 การควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector control) หรือ การควบคุมแบบฟิลด์ออเรียนเต็ดทางอ้อม (Field-Oriented Control: FOC) 17
2.2 การประยุกต์ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 20
2.2.1 การขับเคลื่อนมอเตอร์หนี่ยวนำคู่ 22
2.3 การควบคุมแบบฟัซซี่ (Fuzzy Logic Control) 22
2.3.1 องค์ประกอบของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก 23
2.3.2 การออกแบบระบบควบคุมแบบฟัซซี่ 25
2.3.3 การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิก 29
2.3.4 เทคนิคการดิฟัซซิฟิเคชัน 30
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 32
บทที่ 3 44
วิธีดำเนินการวิจัย 44
3.1 การวิเคราะห์สมการของการขับของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ 44
3.1.1 การวิเคราะห์สมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส 44
3.1.2 ระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ 49
3.2 การออกแบบการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่แบบควบคุมแรงบิดโดยตรง 53
3.2.1 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage-source inverter: VSI) 55
3.2.2 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสแบบควบคุมแรงบิดโดยตรง 58
3.3 การออกแบบการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่แบบควบคุมแรงบิดโดยตรงควบคุมด้วยฟัซซี่ลอจิก 63
3.3.1 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสแบบควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฟัซซีลอจิก [54] 64
3.4 วิธีการทดสอบ 68
3.4.1 ทดสอบคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส 68

3.4.2 ทดสอบคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ 68
3.4.3 ทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก 68
3.5 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย 69
3.5.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส 69
3.5.2 เซ็นเซอร์วัดกระแส (current sensor) 69
3.5.3 มัลติมิเตอร์ดิจิทัล (Digital Multimeters) 70
3.5.4 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) 71
3.4.5 อุปกรณ์เข้ารหัส (หรือ เอ็นโคดเดอร์) รุ่น E6B2-CWZ1X 72
3.5.6 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน รุ่น MIKROE-3126 73
3.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ 74
บทที่ 4 75
ผลการวิจัยและอภิปราย 75
4.1 การจำลองผลของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ 75
4.1.1 การจำลองผลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 75
4.1.2 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของการขับของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ 82
4.1.3 ชุดตรวจจับความเร็วมอเตอร์ด้วยเอ็นโคดเตอร์ 86
4.1.4 สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ 97
4.2 จำลองสถาณการณ์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ 106
4.3 จำลองสถาณการณ์การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่แบบควบคุมแรงบิดโดยตรง 113
4.4 การทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมของการขับของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกด้วยการจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB 122
บทที่ 5 135
สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 135

5.1 สรุปผล..... 135
5.2 อภิปรายผล..... 135
5.3 ข้อเสนอแนะ..... 136
บรรณานุกรม..... 137
ประวัติผู้เขียน..... 144

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 กฎฟัซซี่ 28
ตาราง 2 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ 51
ตาราง 3 รูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์สามเฟส 56
ตาราง 4 รูปแบบการสวิตช์ในกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ 57
ตาราง 5 การเลือกสวิตช์เวกเตอร์แรงดัน 62
ตาราง 6 กฎฟัซซีของลูปการควบคุมแรงบิดและฟลักซ์ 67
ตาราง 7 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์โดยใช้ตัวอย่างพารามิเตอร์ของมอเตอร์ใน MATLAB ขนาด 5 แรงม้า 79
ตาราง 8 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ 82
ตาราง 9 ค่าความต้าน 82
ตาราง 10 ผลการทดสอบแบบไร้โหลด 83
ตาราง 11 ผลการทดสอบแบบยึดโรเตอร์ 83
ตาราง 12 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ 85
ตาราง 13 ผลการทดสอบวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน 90
ตาราง 14 ค่าพารามิเตอร์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ 101

สารบัญภาพประกอบ

หน้า

ภาพประกอบ 1 ระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5

ภาพประกอบ 2 โครงสร้างของสเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 6

ภาพประกอบ 3 ภาพตัดขวางของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 8

ภาพประกอบ 4 การแปลงปริมาณ abc ให้อยู่บนแกน $\alpha\beta$ 10

ภาพประกอบ 5 การแปลงปริมาณ abc ให้อยู่บนแกน dq 11

ภาพประกอบ 6 แผนภาพการควบคุมแบบอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ (V/F control) [31]..... 16

ภาพประกอบ 7 โครงสร้างการควบคุมแสดงแบบการควบคุมแบบฟิลด์ออเรียนเต็ดทางอ้อม (Field-Oriented Control: FOC) 18

ภาพประกอบ 8 โครงสร้างการควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct Torque Control) 19

ภาพประกอบ 9 โครงสร้างพื้นฐานของระบบขับเคลื่อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส [30]..... 21

ภาพประกอบ 10 องค์ประกอบของรถยนต์พลังงานไฟฟ้าแบบมอเตอร์เดียว [30] 22

ภาพประกอบ 11 องค์ประกอบของรถยนต์พลังงานไฟฟ้าแบบมอเตอร์คู่ [30]..... 22

ภาพประกอบ 12 ความแตกต่างของความเป็นสมาชิกระหว่างเซตธรรมดากับฟัซซี่เซต..... 24

ภาพประกอบ 13 โครงสร้างพื้นฐานของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ [40] 24

ภาพประกอบ 14 (ก) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุต (ข) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต 27

ภาพประกอบ 15 รูปแบบฟังก์ชันความเป็นสมาชิก [43] 29

ภาพประกอบ 16 การรวมกฎแบบ Sugeno [42]..... 30

ภาพประกอบ 17 การอนุมานกฎฟัซซี่แบบ Sugeno [42]..... 32

ภาพประกอบ 18 แผนภาพการควบคุมแบบอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ (V/F control) [4]..... 33

ภาพประกอบ 19 แผนภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบ V/F โดยการชดเชยแรงดันที่สเตเตอร์ [6]..... 33

ภาพประกอบ 20 แผนภาพบล็อกของการประมาณค่าความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส [45]34

ภาพประกอบ 21 แผนภาพบโครงสร้างของ Sensorless Direct Field-Oriented Control [9].... 35

ภาพประกอบ 22 แผนภาพบโครงสร้างของ New model-reference adaptive system; MARS [46]..... 35

ภาพประกอบ 23 แสดงโครงสร้างเปรียบเทียบการควบคุมแบบ ก) ฟิลด์ออเรียนเต็ดทางอ้อม (Field-Oriented Control: FOC) ข) การควบคุมแบบเวกเตอร์ทางตรง (Direct Torque Control : DTC) [13]..... 36

ภาพประกอบ 24 ก) แสดงโครงสร้างการควบคุม DTC-SVM [47] 37

ภาพประกอบ 25 การควบคุม DTC-base induction motor drive [48]..... 38

ภาพประกอบ 26 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบ DTC เพื่อลดการสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำ [20] 39

ภาพประกอบ 27 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบ DTC โดยใช้อัลกอริธึม MLV [49]..... 40

ภาพประกอบ 28 ระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าโดยใช้ล้อมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำสองแบบแยกกัน [18] 41

ภาพประกอบ 29 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ [19]..... 42

ภาพประกอบ 30 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสต่อแบบวาย (Y)..... 44

ภาพประกอบ 31 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบแยกเฟส 45

ภาพประกอบ 32 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่..... 50

ภาพประกอบ 33 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่..... 51

ภาพประกอบ 34 โครงสร้างของระบบควบคุมของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ 53

ภาพประกอบ 35 โครงสร้างของการควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ 54

ภาพประกอบ 36 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI) [3] 55

ภาพประกอบ 37 สถานะสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส..... 56

ภาพประกอบ 38 การวางสถานะบนระนาบ Vector Space [56]..... 57

ภาพประกอบ 39 การควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส [4]..... 58

ภาพประกอบ 40 เวกเตอร์ของฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์และเวกเตอร์กระแสสเตเตอร์ 59
ภาพประกอบ 41 การควบคุมฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส 60
ภาพประกอบ 42 โครงสร้างของระบบควบคุมของการขับของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ 64
ภาพประกอบ 43 โครงสร้างการควบคุมแรงบิดโดยตรงควบคุมด้วยฟัซซี่ลอจิก [54]..... 65
ภาพประกอบ 44 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความผิดพลาดของสเตเตอร์ฟลักซ์ $(e\psi)$ 66
ภาพประกอบ 45 ความผิดพลาดของแรงบิด (eT_e) 66
ภาพประกอบ 46 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกตำแหน่งเซกเตอร์ (θ) 66
ภาพประกอบ 47 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในส่วนของเอาต์พุตของลูปการการควบคุมควบคุมฟลักซ์และแรงบิด 67
ภาพประกอบ 48 มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส [57]..... 69
ภาพประกอบ 49 เซ็นเซอร์วัดกระแสเบอร์ ACS712-20A [58] 70
ภาพประกอบ 50 มัลติมิเตอร์ดิจิทัล (Digital Multimeter) [59] 71
ภาพประกอบ 51 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) [60] 72
ภาพประกอบ 52 เอ็นโคดเตอร์ OMRON รุ่น E6B2-CWZ1X 73
ภาพประกอบ 53 โครงสร้างภายในของเอ็นโคดเตอร์ OMRON รุ่น E6B2-CWZ1X 73
ภาพประกอบ 54 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน รุ่น MIKROE-3126 74
ภาพประกอบ 55 กระแสที่สเตเตอร์บนแกน α 76
ภาพประกอบ 56 กระแสที่สเตเตอร์บนแกน β 76
ภาพประกอบ 57 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดโรเตอร์บนแกน α 77
ภาพประกอบ 58 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดโรเตอร์บนแกน β 77
ภาพประกอบ 59 ชุดบล็อกของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 78
ภาพประกอบ 60 ชุดบล็อกของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามจากโปรแกรม MATLAB (SPS model)..... 78
ภาพประกอบ 61 ค่าความเร็วเทียบกับเวลา 80
ภาพประกอบ 62 กระแสของที่ขดลวดสเตเตอร์ 80

ภาพประกอบ 63 ค่า T_{em} เทียบกับเวลา 81
ภาพประกอบ 64 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดโรเตอร์ 81
ภาพประกอบ 65 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบแยกเฟส 82
ภาพประกอบ 66 แสดงค่าพารามิเตอร์ขอมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบแยกเฟส 85
ภาพประกอบ 67 ผลการทดสอบการทำงานเอนโคดเดอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา 87
ภาพประกอบ 68 ผลการทดสอบการทำงานเอนโคดเดอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา 87
ภาพประกอบ 69 ผลการทดสอบการทำงานเอนโคดเดอร์ของเฟส Z 88
ภาพประกอบ 70 ทดสอบการทำงานของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน 89
ภาพประกอบ 71 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่อินพุต 92
ภาพประกอบ 72 วงจรทดสอบการทำงานของชุดตรวจจับความเร็วมอเตอร์ด้วยเอ็นโคดเตอร์ 94
ภาพประกอบ 73 ผลการทดสอบการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ 95
ภาพประกอบ 74 ความเร็วมอเตอร์ขณะเดินเครื่องถึงสภาวะเข้าสู่สถานะอยู่ตัว ใช้ค่า $J=0.0032$ 96
ภาพประกอบ 75 กระแสที่สเตเตอร์ ใช้ค่า $J=0.0032$ 97
ภาพประกอบ 76 ต้นแบบที่ใช้ในการศึกษาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ 98
ภาพประกอบ 77 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ 98
ภาพประกอบ 78 ชุดบล็อกของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ 100
ภาพประกอบ 79 ค่าความเร็วเทียบกับเวลา 101
ภาพประกอบ 80 กระแสของที่ขดลวดสเตเตอร์บนแกน $\alpha\beta$ 102
ภาพประกอบ 81 กระแสของที่ขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC 102
ภาพประกอบ 82 ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_{em}) เทียบกับเวลา 103
ภาพประกอบ 83 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดโรเตอร์บนแกน $\alpha\beta$ 103
ภาพประกอบ 84 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดสเตเตอร์บนแกน 104
ภาพประกอบ 85 ทดสอบการทำงานของของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ 104
ภาพประกอบ 86 ค่าความเร็วเทียบกับเวลา 105

ภาพประกอบ 87 กระแสของที่ขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC 105
ภาพประกอบ 88 ค่าความเร็วเทียบกับเวลา 106
ภาพประกอบ 89 ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_{em}) เทียบกับเวลา 107
ภาพประกอบ 90 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดสเตเตอร์ 107
ภาพประกอบ 91 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน $\alpha\beta$ 108
ภาพประกอบ 92 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC 108
ภาพประกอบ 93 กระแส RMS ของขดลวดสเตเตอร์ที่เฟส ABC 109
ภาพประกอบ 94 ค่าความเร็วเทียบกับเวลา 109
ภาพประกอบ 95 ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_{em}) เทียบกับเวลา 110
ภาพประกอบ 96 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดสเตเตอร์บนแกน 110
ภาพประกอบ 97 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน $\alpha\beta$ 111
ภาพประกอบ 98 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC 111
ภาพประกอบ 99 กระแส RMS ของขดลวดสเตเตอร์ที่เฟส A 112
ภาพประกอบ 100 โครงสร้างของการควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ 113
ภาพประกอบ 101 ค่าความเร็วเทียบกับเวลา ของการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส 114
ภาพประกอบ 102 ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_{em}) เทียบกับเวลา 115
ภาพประกอบ 103 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดสเตเตอร์บนแกน 115
ภาพประกอบ 104 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน $\alpha\beta$ 116
ภาพประกอบ 105 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC 116
ภาพประกอบ 106 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC 117
ภาพประกอบ 107 กระแส RMS ของขดลวดสเตเตอร์ที่เฟส A 117
ภาพประกอบ 108 ค่าความเร็วเทียบกับเวลา 118
ภาพประกอบ 109 ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_{em}) เทียบกับเวลา 118
ภาพประกอบ 110 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดสเตเตอร์ 119

ภาพประกอบ 111 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน $\alpha\beta$ ข..... 119
ภาพประกอบ 112 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC 120
ภาพประกอบ 113 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC 120
ภาพประกอบ 114 กระแส RMS ของขดลวดสเตเตอร์ที่เฟส A 121
ภาพประกอบ 115 โครงสร้างของระบบควบคุมของการขับของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ 123
ภาพประกอบ 116 ค่าความเร็วเทียบกับเวลาของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก 124
ภาพประกอบ 117 ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_{em}) เทียบกับเวลาของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก..... 124
ภาพประกอบ 118 ฟลักซ์เชื่อโยงขดลวดสเตเตอร์ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก 125
ภาพประกอบ 119 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน $\alpha\beta$ ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก 125
ภาพประกอบ 120 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก..... 126
ภาพประกอบ 121 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ... 126
ภาพประกอบ 122 กระแส RMS ของขดลวดสเตเตอร์ที่เฟส A ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ... 127
ภาพประกอบ 123 ค่าความเร็วเทียบกับเวลาของการควบคุมของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก 127
ภาพประกอบ 124ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_{em}) เทียบกับเวลาของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก..... 128
ภาพประกอบ 125 ฟลักซ์เชื่อมโยงขดลวดสเตเตอร์ ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก..... 128
ภาพประกอบ 126 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน $\alpha\beta$ ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก..... 129
ภาพประกอบ 127 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ... 129
ภาพประกอบ 128 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ... 130
ภาพประกอบ 129 กระแส RMS ของขดลวดสเตเตอร์ที่เฟส A ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ... 130
ภาพประกอบ 130 ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_{em}) เทียบกับเวลาของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิกกับการควบคุมด้วยฮิสเตอริซิส 131
ภาพประกอบ 131 ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_{em}) เทียบกับเวลาของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิกกับการควบคุมด้วยฮิสเตอริซิส 131
ภาพประกอบ 132 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC 132

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในภาคอุตสาหกรรมและยานยนต์สมัยใหม่ที่ต้องใช้กำลังไฟฟ้าสูง ซึ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีข้อดีคือ ไม่มีแปรงถ่าน ราคาไม่แพง มีความน่าเชื่อถือสูง และมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน [1] อย่างไรก็ตาม สมรรถนะและประสิทธิภาพสูงสุดของการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขึ้นอยู่กับเทคนิคการควบคุมมอเตอร์ [2] เทคนิคการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและหลากหลายอีกทั้งยังสามารถจำแนกเป็นประเภทต่างๆ ได้อย่างหลากหลายด้วย โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 3 เทคนิคการควบคุม ได้แก่ การควบคุมมอเตอร์ขณะเริ่มเดินเครื่อง (Motor starting control) การควบคุมมอเตอร์ขณะทำงาน (Motor operating control) และการควบคุมมอเตอร์ขณะหยุดเดินเครื่อง (Motor stopping control) ซึ่งสมรรถนะและประสิทธิภาพสูงสุดของการใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับเทคนิคการควบคุมมอเตอร์ขณะทำงานเป็นหลัก โดยเทคนิคการควบคุมที่นิยมใช้คือ การควบคุมแรงบิด (Torque control) หรือ ความเร็วของมอเตอร์ (Speed Control) หรือ การควบคุมทั้งแรงบิดและความเร็ว (Torque-Speed control) [3]

การควบคุมแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ การควบคุมแบบแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่คงที่ (Voltage/Frequency Control; V/F) การควบคุมแบบเวกเตอร์ (Field Oriented Control; FOC) และการควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct Torque Control; DTC) การควบคุมแบบ V/F [4] [5][6] มีจุดเด่นคือ เป็นเทคนิคที่ง่ายต่อการออกแบบด้วยการควบคุมเฉพาะขนาดและความถี่ของแรงดันหรือกระแส ทำให้มีต้นทุนต่ำ แต่มีประสิทธิภาพต่ำ การควบคุมแบบ FOC [7][8][9] เป็นวิธีควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยหลักการควบคุมจะเลียนแบบการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งจะควบคุมส่วนที่สร้างฟลักซ์แม่เหล็กและส่วนสร้างแรงบิด ซึ่งต้องแปลงปริมาณสามเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวให้อยู่ในแกนดีคิวและเนื่องจากในทางปฏิบัติไม่สามารถวัดค่าฟลักซ์ได้โดยตรง จึงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมาคำนวณหาค่าฟลักซ์แทน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ถูกต้อง การควบคุมแบบ DTC [10][11][12] จะทำการกำหนดรูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์โดยตรงไม่ผ่านการทำ PWM เหมือนกับการควบคุมแบบอื่น อินเวอร์เตอร์

จะคำนวณค่าฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์และค่าแรงบิดโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปเลือกรูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้แรงดันสเตเตอร์ที่เหมาะสม ข้อดีของการควบคุมแบบนี้คือ ไม่จำเป็นต้องใช้การแปลงพิกัดที่ยุ่งยาก ไม่จำเป็นต้องดำเนินการควบคุมกระแสป้อนกลับ และแรงบิดมอเตอร์สามารถควบคุมได้โดยตรง ในการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการควบคุมแรงบิดและความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบควบคุมแรงบิดโดยตรง [13] ซึ่งเทคนิคการควบคุมแบบแรงบิดโดยตรงนั้นจะมีการควบคุม 2 ส่วน คือ ส่วนควบคุมแรงบิดและส่วนควบคุมความเร็ว โดยทั่วไปในการควบคุมจะมีลูปการควบคุมความเร็วและลูปการควบคุมแรงบิด โดยใช้ตัวควบคุมแบบดั้งเดิม (Conventional) อย่างเช่น PI PID หรือ PD เพื่อควบคุมความเร็ว แรงบิด แรงดันไฟฟ้าและกระแส เพื่อให้ได้ผลการตอบสนองที่เหมาะสม [14][15] ตัวควบคุมพีไอดีมีโครงสร้างที่ง่ายแต่ในการออกแบบต้องอาศัยสมการของมอเตอร์และพารามิเตอร์ที่แม่นยำ ซึ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสนั้นมีการคำนวณที่ซับซ้อน ความไม่เป็นเชิงเส้น ความไม่แน่นอน ซึ่งตัวควบคุมแบบดั้งเดิมไม่สามารถชดเชยปัญหาเหล่านี้ได้ วิธีหนึ่งที่เหมาะสำหรับการแก้ปัญหานี้คือการใช้เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence Control) มาเพื่อแก้ปัญหาการควบคุมแบบดั้งเดิม โดยได้เลือกใช้ Fuzzy logic Control เพื่อให้ได้สมถรรนะการควบคุมที่ดีขึ้น

โครงสร้างพื้นฐานของระบบควบคุมฟัซซี่ [16][17] ประกอบด้วยสัญญาณความคลาดเคลื่อนระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตจะเข้าสู่ตัวควบคุมฟัซซี่ จากนั้นสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมฟัซซี่จะถูกป้อนเข้าสู่ระบบที่ต้องการควบคุม จนกระทั่งได้สัญญาณเอาต์พุตของระบบ ซึ่งตัวควบคุมประกอบด้วยชุดปฏิบัติการฟัซซิฟิเคชัน (Fuzzification unit) ฐานความรู้ (Knowledge) ลอจิกเพื่อการตัดสินใจ (Decision making logic) และชุดปฏิบัติการดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification unit) ตัวควบคุมชนิดนี้ไม่ต้องพึ่งพาค่าพารามิเตอร์หรือสมการของมอเตอร์ในการออกแบบ แค่อาศัยพฤติกรรมของระบบและประสบการณ์ของผู้ออกแบบเท่านั้น

ระบบขับเคลื่อนนิยมแบ่งตามลักษณะระบบขับเคลื่อน ได้แก่ ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เดี่ยว (Single motor drive system) ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ (Two-motor drive system) ระบบขับเคลื่อนหลายมอเตอร์ หรือ ตั้งแต่สามมอเตอร์ขึ้นไป (Multiple-motor drive) เช่น Three-wheel drives หรือ Four-wheel drives เป็นต้น ระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่เป็นระบบที่น่าสนใจเพราะมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนมากนักและยังมีสมรรถนะการควบคุมที่เหมาะสม แต่อาจประสบปัญหาเกี่ยวกับการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ที่เหมาะสมในสภาวะโหลดไม่ปกติหรือมีการเปลี่ยนแปลงโหลด [18] ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เดี่ยวอาจมีโครงสร้างง่าย แต่อาจประสบปัญหาเกี่ยวกับการออกแบบมอเตอร์ที่เหมาะสมในสภาวะโหลดไม่ปกติ [19] ในขณะที่ระบบขับเคลื่อนหลายมอเตอร์ให้สมรรถนะและความยืดหยุ่นของการทำงานดีกว่า แต่มีโครงสร้างและการควบคุมที่ซับซ้อน ยากต่อการซ่อมบำรุง

ระบบขับเคลื่อน [20] มอเตอร์คู่จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ ซึ่งนอกจากจะมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนมากนัก ยังมีสมรรถนะและการควบคุมที่ดีเหมาะสม

การควบคุมที่เหมาะสม แบ่งได้หลายประเภท ได้แก่ การควบคุมแบบดั้งเดิม การควบคุมแบบสมัยใหม่ [21][22][23] การควบคุมแบบดั้งเดิม (Classical controls) อาจจำเป็นต้องทราบหรือมีการวิเคราะห์หาโมเดลทางคณิตศาสตร์ก่อนเพื่อการออกแบบชุดควบคุม ซึ่งต่างจากแบบการควบคุมสมัยใหม่ (Modern controls) ซึ่งมีข้อดีคือ ไม่ต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบ ซึ่งการควบคุมสมัยใหม่ที่นิยม ได้แก่ Artificial neural network control, Fuzzy logic control Adaptive neural Fuzzy inference system [24][25][26] ซึ่งหนึ่งในนั้นคือ Fuzzy logic Control ซึ่งมีข้อดีคือ ในการออกแบบตัวควบคุมไม่ต้องพึ่งพาพารามิเตอร์ของระบบ หรือแม้แต่สมการใด ๆ ของระบบเลย และยังให้สมรรถนะเทียบเท่าการควบคุมแบบดั้งเดิม

การวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบแรงบิดโดยตรงควบคุมความเร็วและแรงบิดด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิกเพื่อควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์เมื่อมีการปรับความเร็วหรือมีการเปลี่ยนแปลงโหลดในสภาวะต่างๆ ให้เหมาะสมและเพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งยังไม่ปรากฏว่ามีงานวิจัยในหัวข้อนี้ จะมีก็เพียงการควบคุมมอเตอร์แบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เดียว [27][28][29] ซึ่งในการวิจัยจะได้ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเปรียบเทียบสมรรถนะต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและออกแบบการควบคุมความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ด้วยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB

1.2.2 เพื่อจัดสร้างชุดควบคุมความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ด้วยการจัดสร้างต้นแบบการทดลองจริง

1.2.3 เพื่อสร้างองค์ความรู้ในการออกแบบตัวควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 มอเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (3-phase induction motors) ทั้งนี้เนื่องจากแนวโน้มการพัฒนาและใช้งานมอเตอร์ในอนาคตเป็นมอเตอร์ประเภทนี้

1.3.2 กำลังรวมของระบบขับเคลื่อนที่ใช้ในชุดทดลองคือ 1.5 kW ซึ่งเป็นชุดกำลังที่เหมาะสมสำหรับรถยนต์ส่วนบุคคลขนาดเล็กทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมด้านงบประมาณและการควบคุมการทดลองและการวิจัย

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ศึกษาและได้ผลการออกแบบการควบคุมความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกด้วยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB

1.4.2 ได้ต้นแบบชุดควบคุมความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

1.4.3 ได้องค์ความรู้ในการออกแบบตัวควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่เหมาะสมสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

บทที่ 2

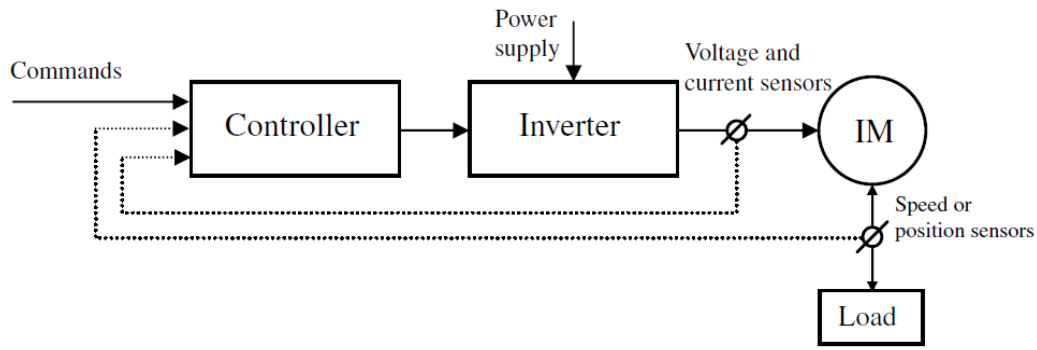
ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ที่ 1 ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะศึกษา ออกแบบและทดสอบการควบคุมความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก ในบทนี้ผู้วิจัยจะอธิบายถึงทฤษฎี หลักการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการควบคุมความเร็วและแรงบิดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก ระบบขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

ปัญหาการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำได้เป็นที่สนใจของนักวิจัยมานานเป็นเวลาหลายปี งานวิจัยส่วนใหญ่มาจากทฤษฎีการควบคุมแบบคลาสสิกและทฤษฎีเครื่องไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

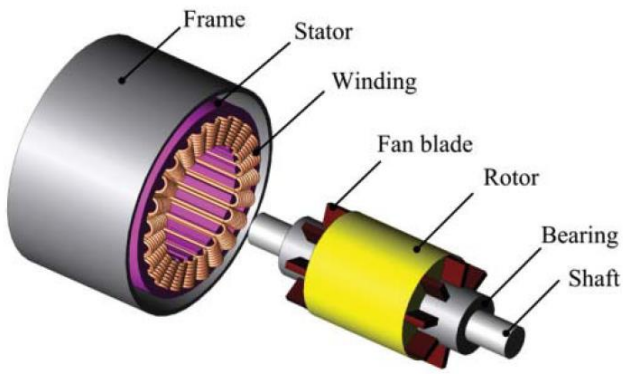
ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**1 ระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำประกอบด้วยตัวควบคุมเซ็นเซอร์อินเวอร์เตอร์และมอเตอร์เหนี่ยวนำ เห็นได้ชัดว่าการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมมอเตอร์เชิงเหนี่ยวนำเกี่ยวข้องกับพื้นฐานวิศวกรรมไฟฟ้า 3 ส่วน ได้แก่ การควบคุมไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และเครื่องจักรกลไฟฟ้า [23]



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**1 ระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.1.1 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่อยู่กับที่ เรียกว่า สเตเตอร์ (stator) และส่วนที่หมุนเรียกว่า โรเตอร์ (rotor) โครงสร้างดังภาพประกอบ 2 [30]



ภาพประกอบ 2 โครงสร้างของสเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอกประกอบด้วยขดลวดสเตเตอร์ (stator) และขดลวดโรเตอร์ (rotor) โดยพันอยู่บนแท่งตัวนำแบบกรงกระรอกถูกคั่นกลางด้วยฉนวน และที่ปลายทั้งสองข้างจะเชื่อมเข้าด้วยกันกับวงแหวนทำให้มีรูปร่างคล้ายกับกรงกระรอกซึ่งเป็นโครงสร้างที่ง่ายและมีราคาต่ำ

การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุลเข้าที่ไปขดลวด สเตเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนกระจายออกมาในช่องว่างอากาศ (air gap) หมุนรอบโรเตอร์ด้วยความเร็วคงที่เรียกว่าความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed, ω_s) มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที ความเร็วเชิงมุมที่ความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังสมการที่ 2.1

$$\omega_s = \frac{2}{P} 2\pi f = \frac{2}{P} \omega \qquad 2.1$$

สามารถคำนวณค่าความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสใน หน่วยรอบต่อนาที แสดงดังสมการที่ 2.2

$$n_s = 60 \times \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{120}{P} f \qquad 2.2$$

แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนตัวนำโรเตอร์สามารถ แสดงดังสมการที่ 2.3

$$e_{ind} = \left(\vec{v} \times \vec{B}\right).\vec{l} \qquad 2.3$$

โดยที่ v คือ ความเร็วของตัวนำโรเตอร์สัมพัทธ์กับสนามแม่เหล็ก

B คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของสเตเตอร์

l คือ ความยาวของตัวนำโรเตอร์

จากกฎของการเหนี่ยวนำไฟฟ้าแม่เหล็กของฟาราเดย์ที่ว่า “ถ้าเส้นลวดตัวนำมีกระแสไหลผ่านวางอยู่บริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงเหนี่ยวนำทางกลกระทำกับเส้นลวดตัวนำนั้น ซึ่งทิศทางของแรงเหนี่ยวนำทางกลที่เกิดขึ้น สามารถอธิบายได้ด้วยกฎมือซ้ายของเฟลมมิง โดยให้หัวแม่มือแทนทิศของแรงเหนี่ยวนำทางกล นิ้วชี้แทนทิศของสนามแม่เหล็กและนิ้วกลางแทนทิศของกระแสที่ไหลในเส้นลวดตัวนำที่เกิดขึ้น”เนื่องจากแรงบิดที่เกิดขึ้นหรือการทำงานของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนตัวนำโรเตอร์ จึงเรียกมอเตอร์แบบนี้ว่ามอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ แรงบิดที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์แสดงดังสมการที่ 2.4

$$T_{ind} = k.\left(\vec{B}_R \times \vec{B}_s\right) \qquad 2.4$$

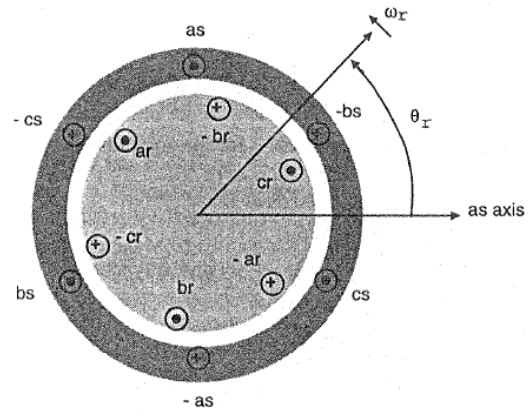
โดยที่ k คือ ค่าคงที่

B_R คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของโรเตอร์

B_s คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของสเตเตอร์

2.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

โครงสร้างตามภาพตัดขวางของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ดังภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.3 [31] ได้แสดงขดลวดของ สเตเตอร์และโรเตอร์ ของเฟส a b และ c ซึ่งมีมุมเป็น 120 องศาทางไฟฟ้า θ_r คือมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ ที่วัดระหว่างแกนแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์ เฟส A และแกนแม่เหล็กของขดลวดของโรเตอร์เฟส A และ $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$ คือความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ สมการมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอธิบายไว้ดังสมการที่ 2.5-2.10



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**3 ภาพตัดขวางของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

สมการแรงดันไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์

$$v_{as} = i_{as} r_s + \frac{d\psi_{as}}{dt} \quad V$$
$$v_{bs} = i_{bs} r_s + \frac{d\psi_{bs}}{dt} \quad V \qquad 2.5$$
$$v_{cs} = i_{cs} r_s + \frac{d\psi_{cs}}{dt} \quad V$$

สมการแรงดันไฟฟ้าทางด้านโรตอร์

$$v_{ar} = i_{ar} r_r + \frac{d\psi_{ar}}{dt} \quad V$$
$$v_{br} = i_{br} r_r + \frac{d\psi_{br}}{dt} \quad V \qquad 2.6$$
$$v_{br} = i_{br} r_r + \frac{d\psi_{br}}{dt} \quad V$$

โดยที่ r_s คือ ความต้านทานต่อเฟสของขดลวดสเตเตอร์

r_r คือ ความต้านทานต่อเฟสของขดลวดของโรเตอร์

v_{as}, v_{bs}, v_{cs} คือ แรงดันเฟสของสเตเตอร์

i_{as}, i_{bs}, i_{cs} คือ กระแสเฟสของสเตเตอร์

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} คือ กระแสเฟสของโรเตอร์

$\psi_{as,}\psi_{bs,}\psi_{cs,}$ คือ ฟลักซ์เชื่อมโยงของขดลวดแต่ละเฟสด้านสเตเตอร์

$\psi_{ar,}\psi_{br,}\psi_{cr,}$ คือ ฟลักซ์เชื่อมโยงของขดลวดแต่ละเฟสด้านของโรเตอร์

สมการเชื่อมโยงฟลักซ์ แสดงดังสมการ (2.7)

$$\begin{bmatrix}\psi_s^{abc}\\ \psi_r^{abc}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc}\\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_s^{abc}\\ i_r^{abc}\end{bmatrix} \qquad W.b.turn \qquad 2.7$$

เมตตริกย่อยความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

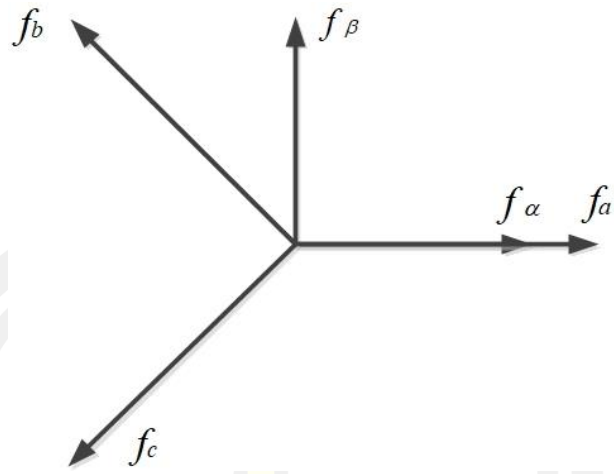
$$L_{ss}^{abc}=\begin{bmatrix}L_{ls}+L_{ss} & L_{sm} & L_{sm}\\ L_{sm} & L_{ls}+L_{ss} & L_{sm}\\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls}+L_{ss}\end{bmatrix} \qquad H \qquad 2.8$$

$$L_{rr}^{abc}=\begin{bmatrix}L_{lr}+L_{rr} & L_{rm} & L_{rm}\\ L_{rm} & L_{lr}+L_{rr} & L_{rm}\\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr}+L_{rr}\end{bmatrix} \qquad H \qquad 2.9$$

$$L_{sr}^{abc}=\left[L_{sr}^{abc}\right]^t=L_{sr}\begin{bmatrix}\cos\theta_r & \cos\left(\theta_r+\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r-\frac{2\pi}{3}\right)\\ \cos\left(\theta_r-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r+\frac{2\pi}{3}\right)\\ \cos\left(\theta_r+\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r\end{bmatrix} \qquad H \qquad 2.10$$

2.1.3 การแปลงของคลาร์ก (Clarke's Transformation)

การแปลงของคลาร์กเป็นการแปลงปริมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส abc ให้อยู่บนแกน $\alpha\beta$ ซึ่งจะช่วยลดความซับซ้อนในการคำนวณหาค่าต่างๆ ลง ซึ่งรูปแบบการแปลงแกนดังภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**4



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**4 การแปลงปริมาณ abc ให้อยู่บนแกน $\alpha\beta$

จะได้สมการการแปลงแกนจาก abc เป็น $\alpha\beta$ ได้ดังนี้

$$f_\alpha = f_a - f_b sin30 - f_c sin30 = f_a - \frac{1}{2} f_b - \frac{1}{2} f_c \qquad 2.11$$

$$f_\beta = 0 + f_b cos30^\circ - f_c cos30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} f_b - \frac{\sqrt{3}}{2} f_c \qquad 2.12$$

เขียนเป็นเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ 2.13

$$\left[\mathbf{f}_{\alpha\beta 0}\right] = \left[\mathbf{T}_{\alpha\beta 0}\right]\left[\mathbf{f}_{abc}\right] \qquad 2.13$$

เมื่อ

$$\left[\mathbf{f}_{\alpha\beta 0}\right] = \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix}, \left[\mathbf{T}_{\alpha\beta 0}\right] = K \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \text{ และ } \left[\mathbf{f}_{abc}\right] = \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \qquad 2.14$$

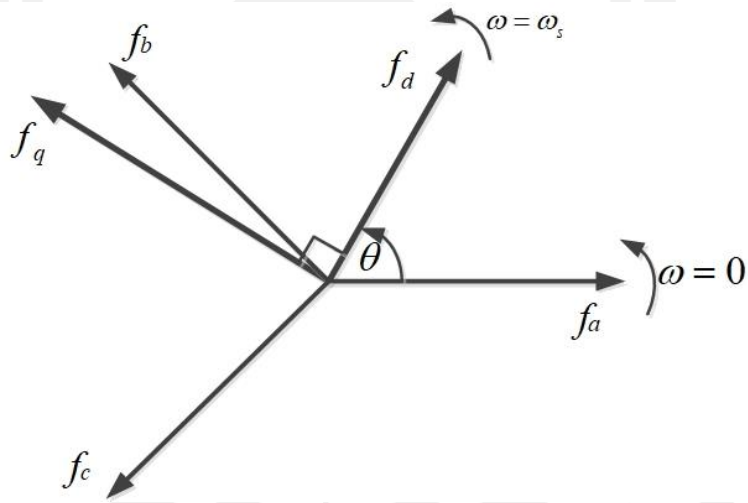
ในทางกลับกันถ้าแปลงจากแกน แกนจาก $\alpha\beta$ เป็น abc ได้ดังนี้

$$\left[\mathbf{f}_{abc}\right]=\left[\mathbf{T}_{\alpha\beta 0}\right]^{-1}\left[\mathbf{f}_{\alpha\beta 0}\right] \quad 2.15$$

$$\left[\mathbf{T}_{\alpha\beta 0}\right]^{-1}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad 2.16$$

2.1.4 การแปลงของปาร์ค (Park's Transformation)

การแปลงแบบปาร์คเป็นการแปลงแกน abc ให้อยู่บนแกน dq คือการแปลงปริมาณสามเฟสไปเป็นปริมาณสองเฟสที่อยู่บนแกนหมุน (rotating frame) โดยใช้รูปแบบการแปลงแบบปาร์ค [31]



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**5 การแปลงปริมาณ abc ให้อยู่บนแกน dq

พิจารณาภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**5 จะได้สมการการแปลงแกนจาก abc เป็น dq ได้ดังนี้

$$\left[\mathbf{f}_{dq0}\right]=\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]\left[\mathbf{f}_{abc}\right] \tag{2.17}$$

เมื่อ

$$\left[\mathbf{f}_{dq0}\right]=\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix},\ \left[\mathbf{T}_{dq0}\right]=\frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta+\frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta+\frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \text{ และ } \left[\mathbf{f}_{abc}\right]=\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}$$

ในทางกลับกันถ้าแปลงจากแกน แกนจาก dq เป็น abc ได้ดังนี้

$$\left[\mathbf{f}_{abc}\right]=\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1}\left[\mathbf{f}_{dq0}\right] \tag{2.18}$$

$$\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1}=\begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta+\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta+\frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$

การแปลงฟลักซ์เชื่อมโยงบนแกนดีคิว

การแปลงฟลักซ์เชื่อมโยงบนแกนดีคิว จะใช้วิธีการแปลงของปาร์ค โดยแปลงสมการฟลักเชื่อมโยงทางฝั่งสเตเตอร์

$$\left[\psi_{dq0s}\right]=\left[\mathbf{T}_{dq0}(\theta)\right]\left(\left[\mathbf{L}_{abc,ss}\right]\left[\mathbf{i}_{abcs}\right]+\left[\mathbf{L}_{abc,sr}\right]\left[\mathbf{i}_{abcr}\right]\right) \tag{2.19}$$

แปลงกระแสที่แสสเตเตอร์และโรเตอร์บนแกนเอบีซีไปอยู่บนแกนดีคิวจากการแปลงกลับของปาร์ค ดังนี้

$$\begin{aligned}\left[\psi_{dq0s}\right]=&\left[\mathbf{T}_{dq0}(\theta)\right]\left[\mathbf{L}_{abc,ss}\right]\left[\mathbf{T}_{dq0}(\theta)\right]^{-1}\left[\mathbf{i}_{dq0s}\right]\\&+\left[\mathbf{T}_{dq0}(\theta)\right]\left[\mathbf{L}_{abc,sr}\right]\left[\mathbf{T}_{dq0}(\theta-\theta_r)\right]^{-1}\left[\mathbf{i}_{dq0r}\right]\end{aligned} \tag{2.20}$$

$$\left[\psi_{dq0s}\right]=\begin{bmatrix} L_{ls}+\frac{3}{2}L_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls}+\frac{3}{2}L_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls}+\frac{3}{2}L_{ss} \end{bmatrix}\left[\mathbf{i}_{dq0s}\right]+\begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\left[\mathbf{i}_{dq0r}\right]$$

$$\left[\psi_{dq0r}\right]=\left[\mathbf{T}_{dq0}(\theta-\theta_r)\right]\left[\mathbf{L}_{abc,sr}\right]\left[\mathbf{T}_{dq0}(\theta)\right]^{-1}\left[\mathbf{i}_{dq0s}\right]+\left[\mathbf{T}_{dq0}(\theta-\theta_r)\right]\left[\mathbf{L}_{abc,rr}\right]\left[\mathbf{T}_{dq0}(\theta-\theta_r)\right]^{-1}\left[\mathbf{i}_{dq0r}\right]$$

$$\left[\psi_{dq0r}\right]=\begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\left[\mathbf{i}_{dq0s}\right]+\begin{bmatrix} L_{ls}+\frac{3}{2}L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls}+\frac{3}{2}L_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & L_{lr} \end{bmatrix}\left[\mathbf{i}_{dq0r}\right]$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{0s} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \\ \psi'_{0r} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} L_{ls}+L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls}+L_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L'_{lr}+L_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{lr}+L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{lr}+L_m \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \qquad 2.21$$

สมการแรงดันบนแกนดีคิว

$$\left[\mathbf{T}_{dq0}(\theta)\right]^{-1}\left[\mathbf{V}_{dq0s}\right]=R_s\left[\mathbf{T}_{dq0}(\theta)\right]^{-1}\left[\mathbf{i}_{dq0s}\right]+\frac{d}{dt}\left[\mathbf{T}_{dq0}(\theta)\right]^{-1}\left[\psi_{dq0s}\right] \qquad 2.22$$

จะได้

$$\begin{aligned}\left[\mathbf{V}_{dq0s}\right]&=R_s\left[\mathbf{i}_{dq0s}\right]+\left[\mathbf{T}_{dq0}(\theta)\right]\frac{d}{dt}\left(\left[\mathbf{T}_{dq0}(\theta)\right]^{-1}\left[\psi_{dq0s}\right]\right)\\&=R_s\left[\mathbf{i}_{dq0s}\right]+\frac{d}{dt}\left[\psi_{dq0s}\right]+\left[\mathbf{T}_{dq0}(\theta)\right]\left[\psi_{dq0s}\right]\left(\frac{d}{dt}\left[\mathbf{T}_{dq0}(\theta)\right]^{-1}\right)\end{aligned}$$

พิจารณาพจน์ $\left[\mathbf{T}_{dq0}(\theta)\right]\left(\frac{d}{dt}\left[\mathbf{T}_{dq0}(\theta)\right]^{-1}\right)$ โดยที่ $\theta=\omega t$ มุมอ้างอิงที่ใช้ในการแปลงแกน

$$\frac{d}{dt}\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1}=\omega\begin{bmatrix}-\sin\theta & -\cos\theta & 0\\ -\sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & 0\\ -\sin(\theta+\frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta+\frac{2\pi}{3}) & 0\end{bmatrix}$$

$$\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]\frac{d}{dt}\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1}=\omega\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

ดังนั้นแรงดันทางฝั่งสเตเตอร์บนแกนดีคิว จะได้ตามสมการดังนี้

$$\left[\mathbf{V}_{dq0s}\right]=R_s\left[\mathbf{i}_{dq0s}\right]+\omega\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\left[\psi_{dq0s}\right]+\frac{d}{dt}\left[\psi_{dq0s}\right] \qquad 2.23$$

สมการแรงดันทางฝั่งโรเตอร์ โดยมุมอ้างอิงทางฝั่งโรเตอร์คือ $\theta-\theta_r=\omega t-\omega_r t$ ดังนั้นจะได้สมการแรงดันทางฝั่งโรเตอร์บนแกนดีคิวดังนี้

$$\left[\mathbf{V}'_{dq0r}\right]=R'_r\left[\mathbf{i}'_{dq0r}\right]+\left(\omega-\omega_r\right)\begin{bmatrix}0 & -1 & 0\\ 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\left[\psi'_{dq0r}\right]+\frac{d}{dt}\left[\psi'_{dq0r}\right] \qquad 2.24$$

กำลังไฟฟ้าและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสบนแกนดีคิว

$$\begin{aligned}P_{in}&=\left[\mathbf{V}_{abcs}\right]^t\left[\mathbf{i}_{abcs}\right]+\left[\mathbf{V}'_{abcr}\right]^t\left[\mathbf{i}'_{abcr}\right]\\ &=\left(\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1}\left[\mathbf{V}_{dq0s}\right]\right)^t\left(\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1}\left[\mathbf{i}_{dq0s}\right]\right)+\left(\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1}\left[\mathbf{V}'_{dq0r}\right]\right)^t\left(\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1}\left[\mathbf{i}'_{dq0r}\right]\right)\\ &=\left[\mathbf{V}_{dq0s}\right]^t\left[\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1}\right]^t\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1}\left[\mathbf{i}_{dq0s}\right]+\left[\mathbf{V}'_{dq0r}\right]^t\left[\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1}\right]^t\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1}\left[\mathbf{i}'_{dq0r}\right]\end{aligned}$$

$$ {}^{t}\left[\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1}\right]^{t}\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1}=\begin{bmatrix}\frac{3}{2} & 0 & 0\\ 0 & \frac{3}{2} & 0\\ 0 & 0 & \frac{3}{2}\end{bmatrix} $$

จะได้สมการกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์บนแกนดีคิว

$$ P_{in}=\frac{3}{2}\left(v_{ds}i_{ds}+v_{qs}i_{qs}\right)+\frac{3}{2}\left(v'_{dr}i'_{dr}+v'_{qr}i'_{qr}\right) $$

แทนค่า $\left[\mathbf{V}_{dq0s}\right]=R_s\left[\mathbf{i}_{dq0s}\right]+\omega\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\left[\psi_{dq0s}\right]+\frac{d}{dt}\left[\psi_{dq0s}\right]$ ลงในสมการ และวิเคราะห์สมการ

ในสภาวะคงตัว ซึ่งจะตัดเทอมของตัวเหนี่ยวนำออก เนื่องจากแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจะได้สมการกำลังทางด้านอินพุต

$$ P_{in}=\frac{3}{2}R_s\left(i_{ds}^2+i_{qs}^2\right)+\frac{3}{2}R'_r\left(i'^2_{dr}+i'^2_{qr}\right)+\frac{3}{2}\omega_r L_m\left(i_{qs}i'_{dr}-i_{ds}i'_{qr}\right) \qquad 2.25 $$

สมการกำลังเอาต์พุตของมอเตอร์

$$ P_{out}=\frac{3}{2}\omega_r L_m\left(i_{qs}i'_{dr}-i_{ds}i'_{qr}\right) \qquad 2.26 $$

สมการแรงบิด จะพิจารณากำลังเอาต์พุตมีความสัมพันธ์กับสมการทางกล

$$ P_{out}=T_e\omega_{rm} \qquad \text{โดยที่ } \omega_r=\frac{P}{2}\omega_{rm} $$

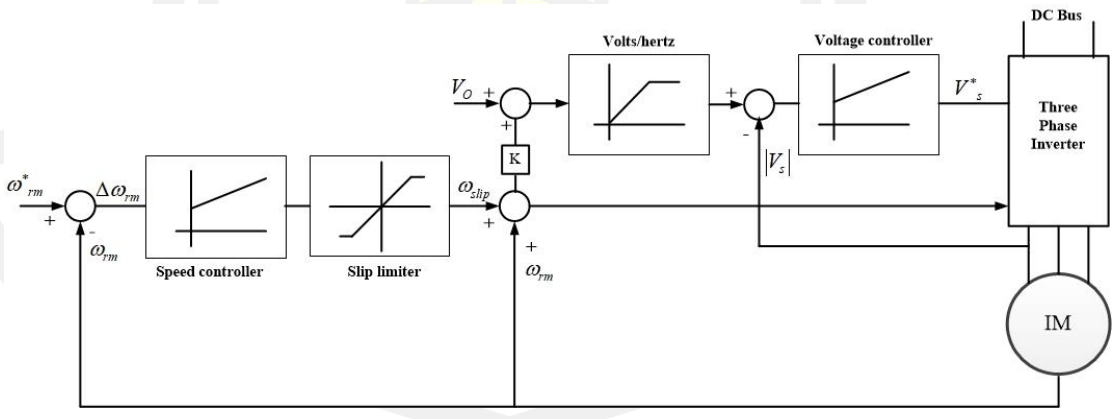
จะได้สมการแรงบิด

$$
\begin{aligned}
T_e &= \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right) L_m \left(i_{qs} i'_{dr} - i_{ds} i'_{qr}\right) \\
&= \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)\left(\psi'_{qr} i'_{dr} - \psi'_{dr} i'_{qr}\right) \\
&= \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)\left(\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}\right)
\end{aligned}
\qquad 2.27
$$

สำหรับเทคนิคการควบคุมของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส มีวิธีการควบคุมสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ การควบคุมแบบอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ (V/F control) การควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector control) หรือ การควบคุมแบบฟิลด์ออเรียนเต็ดทางอ้อม (Field-Oriented Control: FOC) และ การควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct Torque Control)

2.1.5 การควบคุมแบบอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ (V/F control)

การควบคุมแบบ V/F ของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีจุดเด่นที่ง่ายต่อการออกแบบ มักใช้กับการขับเคลื่อนที่ต้องการต้นทุนต่ำและประสิทธิภาพต่ำ ซึ่งควบคุมอัตราส่วนระหว่างขนาดและความถี่ของแรงดันหรือกระแส เป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการควบคุมความเร็วแบบลูปเปิดหรือลูปปิดแล้วแต่การใช้งาน โครงสร้างดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**6 แผนภาพการควบคุมแบบอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ (V/F control) [31] [32]



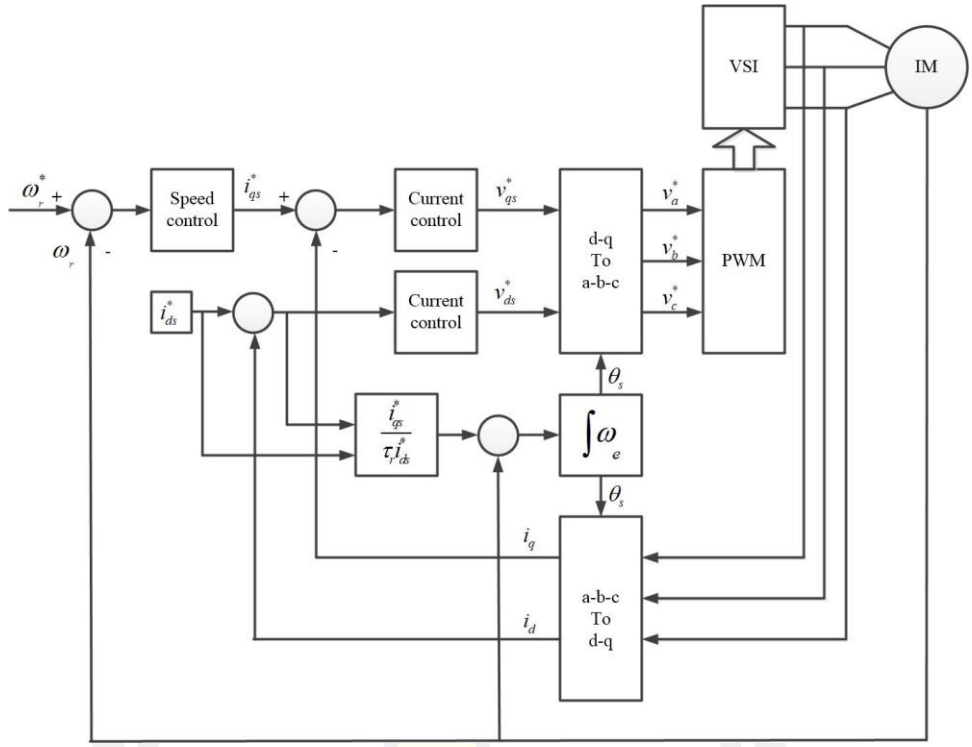
ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**6 แผนภาพการควบคุมแบบอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ (V/F control) [31]

2.1.6 การควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector control) หรือ การควบคุมแบบฟิลด์ออเรียนเต็ดทางอ้อม (Field-Oriented Control: FOC)

การควบคุมแบบฟิลด์ออเรียนเต็ดทางอ้อม (Field-Oriented Control: FOC) [7] [33] [34] คือวิธีควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ที่พัฒนามาจากการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่) แต่เนื่องจากต้องการให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสามารถควบคุมแรงบิดได้โดยตรง การควบคุมแบบ FOC จะทำได้โดยจะอาศัยการแปลงแกนจากระบบสามเฟส abc ไปอยู่บนแกน dq หลักการควบคุมมอเตอร์วิธีนี้จะเลียนแบบการควบคุมของมอเตอร์กระแสตรง โดยควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ด้วยกระแส i_{qs} เป็นหลัก และการควบคุมฟลักซ์จะถูกควบคุมด้วยกระแส i_{ds} ในการแปลงแกนจะต้องใช้มุมในการหมุนที่ความเร็วซิงโครนัส เนื่องจากต้องใช้ในการแปลงแกน abc ไปอยู่บนแกน dq เพื่อควบคุมฟลักซ์ที่อยู่บนแกน d และแรงบิดที่อยู่บนแกน q และแปลงกลับจากแกน dq ไปอยู่บนแกน abc โดยการคำนวณมุมสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.28

$$\theta_s = \int \omega_e \, dt = \int \left(\omega_r - \omega_{sl} \right) = \int \left(\omega_r + \frac{i_{qs}^*}{\tau_r i_{ds}^*} \right) dt \qquad 2.28$$

ค่าความเร็วเชิงมุมที่โรเตอร์สามารถวัดได้จากความเร็วของโรเตอร์โดยตรง ความเร็วเชิงมุมของสลิปได้จากการประมาณจากสมการ $\frac{i_{qs}^*}{\tau_r i_{ds}^*}$ จะเห็นว่ามีพารามิเตอร์ที่เป็นค่าคงที่ทางฝั่งโรเตอร์ $\tau_r = \frac{L_r'}{R_r'}$ ซึ่งคือค่า L_r' และ R_r' ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต้องมีความถูกต้องเป็นอย่างมากจึงจะได้การคำนวณมุมในการหมุนที่ความเร็วซิงโครนัสที่ถูกต้อง จะทำให้ได้การควบคุมที่มีประสิทธิภาพ โครงสร้างการควบคุมดังภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**7

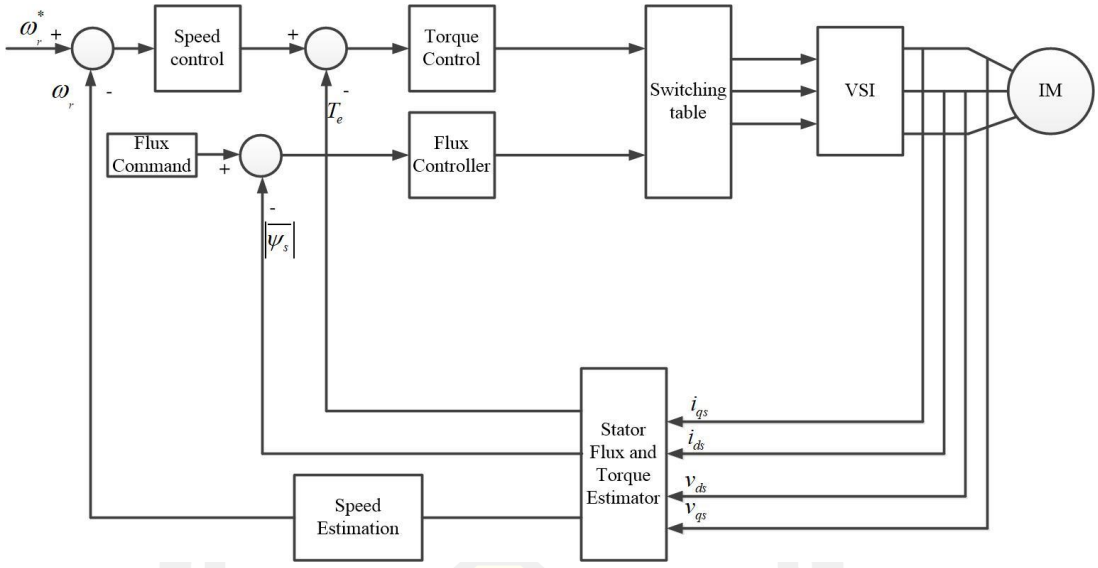


ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**7 โครงสร้างการควบคุมแสดงแบบการควบคุมแบบฟิลด์ออเรียนเต็ดทางอ้อม (Field-Oriented Control: FOC)

ดังนั้นจากโครงสร้างการควบคุมแบบวิธีนี้ข้อด้อยคือ ประสิทธิภาพการควบคุมอยู่ที่ความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ และต้องทราบข้อมูลความเร็วรอบหรือตำแหน่งของมอเตอร์ด้วย ทำให้ต้องใช้เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วจะใช้ระบบควบคุมแบบ FOC กับงานที่ต้องการความแม่นยำและความเร็วในการตอบสนองสูง

2.1.7 การควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct Torque Control)

การควบคุมแบบแรงบิดโดยตรง (Direct Torque Control) [13] [35] [36] วิธีการควบคุมจะทำการกำหนดรูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์โดยตรงไม่ผ่านการกล้ำสัญญาณ PWM เหมือนกับการควบคุมแบบอื่นๆ โครงสร้างการควบคุมแสดงดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**8 [10][37]



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**8 โครงสร้างการควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct Torque Control)

โดยการควบคุมวิธีนี้จะทำการคำนวณค่าฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์และค่าแรงบิดโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์จากนั้นจะนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงของทั้งฟลักซ์และแรงบิดจะทำให้ทราบว่าต้องเพิ่มหรือลดค่าฟลักซ์กับแรงบิดเป็นปริมาณเท่าใด แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปเลือกรูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์จากการเปิดตารางการสวิตช์ เพื่อให้ได้ค่าแรงดันสเตเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อควบคุมการของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสตามต้องการ โดยการควบคุมแบบแรงบิดโดยตรงจะมีการควบคุมอยู่สองส่วน คือการควบคุมความเร็วรอบและแรงบิด ในการควบคุมจึงจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ ค่าแรงบิดและฟลักซ์ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองลักษณะพลวัตทางด้านสเตเตอร์ ดังนั้นการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสจะมีประสิทธิภาพที่ดีได้ก็ขึ้นอยู่กับความถูกต้องของพารามิเตอร์ ในการประมาณค่าค่าฟลักซ์และแรงบิดของสเตเตอร์สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.29-2.30

$$\psi_{sd} = \int \left(v_{sd} - R_s i_{sd} \right) dt$$

$$\psi_{sq} = \int \left(v_{sq} - R_s i_{sq} \right) dt$$

$$\left| \overline{\psi_s} \right| = \sqrt{\psi_{sd}^2 + \psi_{sq}^2} \qquad 2.29$$

$$T_e = \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)\left(\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}\right) \quad 2.30$$

ประมาณค่าความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้ดังสมการที่ 2.31

$$\omega_r = \omega_s - \frac{1}{\left|\bar{\lambda}\right|^2}\frac{Lm}{Tr}\left(\psi_{rd} i_{sd} - \psi_{rd} i_{sd}\right)$$

$$\omega_r = \left[\psi_{rd}\frac{d\psi_{rq}}{dt} - \psi_{rd}\frac{d\psi_{rd}}{dt}\right] - \frac{2T_e R_r}{3P\left|\bar{\psi}\right|^2} \quad 2.31$$

2.2 การประยุกต์ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ได้ใช้อย่างแพร่หลายในประเทศ ประมาณครึ่งหนึ่งของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในประเทศพัฒนาแล้วจะถูกแปลงเป็นพลังงานกลโดยทั่วไปโดยใช้เครื่องจักรไฟฟ้าใช้ในงานเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน เครื่องปรับอากาศ เครื่องทำความร้อน ในงานอุตสาหกรรม การควบคุมยานยนต์ ซึ่งในอุตสาหกรรมยานยนต์ก็เป็นสิ่งที่น่าสนใจในการพัฒนาระบบควบคุม เนื่องจากในปัจจุบัน น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงหลักในการขับเคลื่อน ซึ่งนำมาสู่การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศอย่างต่อเนื่อง และเป็นสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกัน การพึ่งพิงเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ามัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ต่างเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป จะทำให้เกิดภาวะขาดแคลนพลังงานได้ในอนาคต ดังนั้น หลายประเทศจึงเห็นความสาคัญของปัญหาทั้ง 2 ประเด็นดังกล่าวที่สุด จึงนำมาสู่การส่งเสริมการใช้รถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) ทดแทนยานยนต์พลังงานน้ำมัน

รถยนต์ไฟฟ้าแบ่งเป็นกลุ่มใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นกำลังขับเคลื่อนหลัก และกลุ่มที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นกำลังขับเคลื่อนหลัก

1 กลุ่มใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นกำลังขับเคลื่อนหลัก ประกอบด้วย

ยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในแบบดั้งเดิม (Conventional Internal Combustion Engine: ICE) เป็นเครื่องยนต์ที่ไม่พึ่งพากำลังขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า ใช้พลังงานสูงและปลดปล่อยมลภาวะจำนวนมาก และมีระยะทางการใช้งานยาว

ยานยนต์แบบผสม (Hybrid Electric Vehicle: HEV and Plug-in HEV7) เป็นเครื่องยนต์ผสมระหว่างการขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นหลักร่วมกับการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์

ไฟฟ้า และรวมถึงการใช้เทคโนโลยีปลั๊กอินเพื่อเติมพลังงานไฟฟ้าเป็นทางเลือกเสริม (Optional) สาหรับแบตเตอรี่ที่ชาร์จจากเครื่องยนต์สันดาปภายในมีขนาดเล็ก จึงสามารถขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าได้เพียงระดับหนึ่ง ด้วยระดับความเร็วต่ำ และระยะทางสั้น สามารถประหยัดพลังงานมากกว่าเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบดั้งเดิมในระยะทางที่เท่ากัน

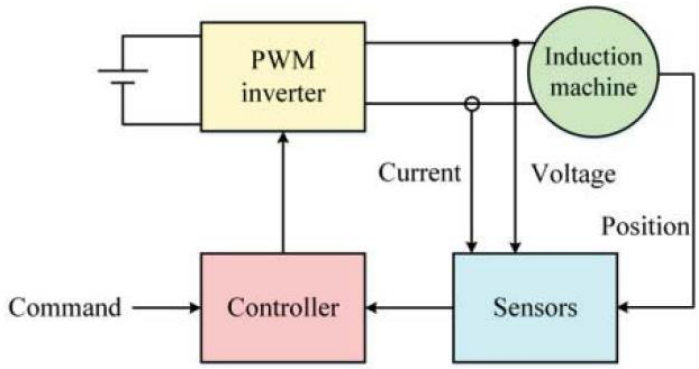
2 กลุ่มที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นกำลังขับเคลื่อนหลัก ประกอบด้วย

1. ยานยนต์แบบผสมขยายระยะ (Range Extended Electric Vehicle: REEV) เป็นเครื่องยนต์แบบผสมประเภทหนึ่ง ที่มีการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าเป็นหลักใช้แบตเตอรี่ที่มีขนาดความจุต่ำกว่ายานยนต์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่ (BEV) และใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในขนาดเล็กทำหน้าที่กำเนิดพลังงานไฟฟ้า เพื่อให้สามารถใช้งานได้ในระยะทางที่ยาวขึ้น

2. ยานยนต์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle: BEV) เป็นการขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งต้องใช้แบตเตอรี่ที่มีความจุสูง เช่น เทคโนโลยีลิเที่ยม-ไอออน มีระยะทางการใช้งานระดับสั้นถึงปานกลาง โดยต้องชาร์จพลังงานจากสถานีอัดประจุเท่านั้น

3. ยานยนต์ไฟฟ้าแบบเซลเชื้อเพลิง (Fuel Cell Electric Vehicle: FCEV) เป็นยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ระบบพลังงานจากเซลเชื้อเพลิงและขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า มีการต่อเซลเชื้อเพลิงแบบอนุกรมเวลา (Fuel Cell Stack) โดยใช้เทคโนโลยีเยื่อเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane: PEM) ซึ่งใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อน มีระยะทางการใช้งานระยะปานกลางถึงระยะยาว

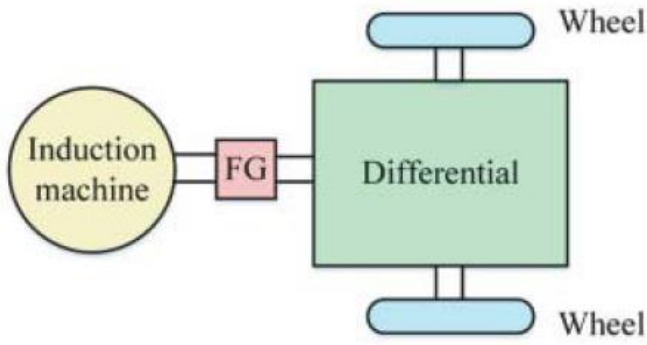
ซึ่งรถยนต์ไฟฟ้าเป็นประเภทที่รับความนิยมมากในปัจจุบัน คือ ยานยนต์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าใช้พลังงานจากแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว (Battery Electric Vehicle: BEV) [38] โครงสร้างพื้นฐานของระบบขับเคลื่อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แสดงในภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**9ประกอบด้วย มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ตัวแปลงผันกำลังงานไฟฟ้า (ชุดกำเนิดสัญญาณควบคุมแบบ PWM) ระบบควบคุม และตัวตรวจรู้



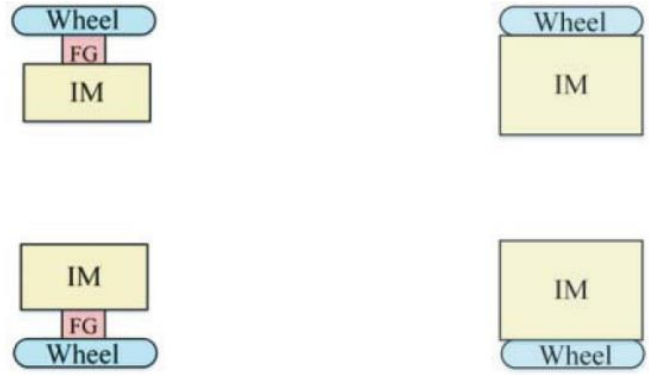
ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**9 โครงสร้างพื้นฐานของระบบขับเคลื่อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส [30]

2.2.1 การขับเคลื่อนมอเตอร์หนี่ยวนำคู่

ระบบขับเคลื่อนนิยมแบ่งตามลักษณะระบบขับเคลื่อน ได้แก่ ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เดี่ยว (Single motor drive system) ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ (Two-motor drive system) ระบบขับเคลื่อนหลายมอเตอร์ หรือ ตั้งแต่สามมอเตอร์ขึ้นไป (Multiple-motor drive) เช่น Three-wheel drives หรือ Four-wheel drives เป็นต้นอาจจะเป็นแบบมอเตอร์เดียวหรือมอเตอร์คู่แสดงภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**10 และ ภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**11



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**10 องค์ประกอบของรถยนต์พลังงานไฟฟ้าแบบมอเตอร์เดียว [30]



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**11 องค์ประกอบของรถยนต์พลังงานไฟฟ้าแบบมอเตอร์คู่ [30]

2.3 การควบคุมแบบฟัซซี่ (Fuzzy Logic Control)

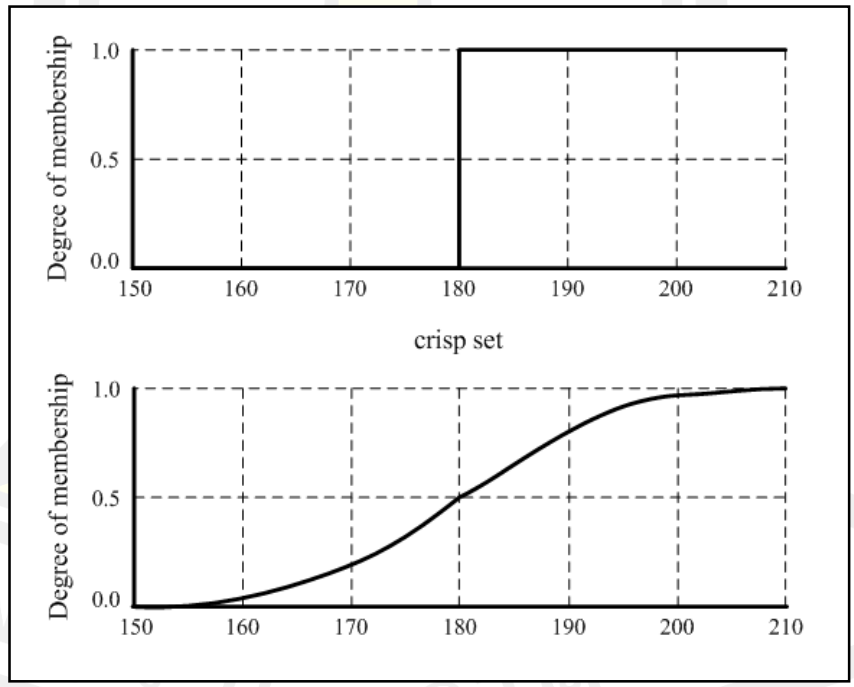
การใช้เทคนิคอัจฉริยะเพื่อแก้ปัญหาการออกแบบตัวควบคุมที่ต้องการค่าพารามิเตอร์และสมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกต้อง วิธีการควบคุมแบบอัจฉริยะ (Intelligent Control of Induction motor) ใช้เทคนิคและขั้นตอนของแรงจูงใจของมนุษย์ (เช่นรูปแบบการแทนความรู้หรือการตัดสินใจ) การควบคุมแบบฟัซซี่ จึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการแก้ปัญหาเหล่านี้

ฟัซซี่ลอจิกถูกพัฒนาขึ้นโดย Lotfi A. Zedeh [16][17] เมื่อปี ค.ศ. 1965 ซึ่งมีรากฐานอยู่บนทฤษฎีฟัซซี่เซต ซึ่งฟัซซี่เซตเป็นกลุ่มสิ่งของหรือวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงความเป็นสมาชิกในเซตอย่างค่อยเป็นค่อยไป หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าที่แสดงความเป็นสมาชิกมีลักษณะต่อเนื่อง [39] เมื่อ 0 หมายถึง การไม่เป็นสมาชิกในเซต และ 1 หมายถึงการเป็นสมาชิกในเซตอย่างสมบูรณ์ โดยจะมีการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกผ่านฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function) เพื่อระบุค่าความเป็นสมาชิก (degree of membership) ของสมาชิกใด ๆในเซตที่อยู่ในขอบเขตเอกภพสัมพัทธ์ (universe of discourse) ที่พิจารณาในขณะที่เซ็ตปกติธรรมดาจะพิจารณาสิ่งของหรือวัตถุใด ๆว่าเป็นสมาชิกหรือไม่เป็นสมาชิกของเซตเท่านั้น ค่าที่ใช้แสดงลักษณะสมบัติดังกล่าวมีเพียง 0 หรือ 1 ซึ่ง 0 หมายถึงการไม่เป็นสมาชิกในเซต และ 1 หมายถึง การเป็นสมาชิกในเซต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าฟัซซี่เซตมีความแตกต่างไปจากเซตธรรมดาในเรื่องการให้ค่าที่แสดงลักษณะสมบัติความเป็นสมาชิกและไม่เป็นสมาชิกในเซต ภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**12 โดยเป็นเซตของช่วงความสูงของมนุษย์จาก 150 เซ็นติเมตร เมื่อพิจารณาเซตปกติธรรมดาจะเห็นได้ว่า

ช่วงความสูง 180 เซ็นติเมตร ถึง 210 เซ็นติเมตร เป็นสมาชิกของเซตอย่างสมบูรณ์ ส่วนที่เหลือนอกย่านดังกล่าวไม่เป็นสมาชิกอย่างสิ้นเชิง เมื่อพิจารณาฟัซซี่เซต พบว่า ช่วงความสูงจาก 150 เซ็นติเมตร ถึง 210 เซ็นติเมตร แสดงความเป็นสมาชิกอย่างค่อยเป็นค่อยไป โดยมีระดับความเป็นสมาชิกอยู่ในช่วง 0 ถึง 1

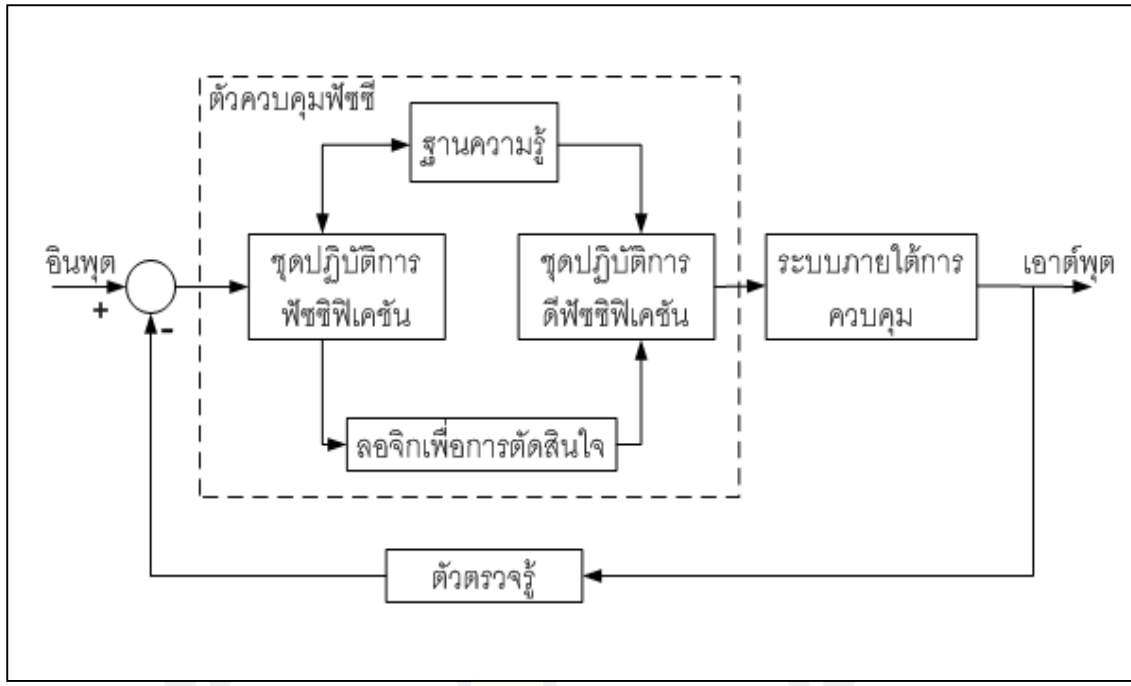
2.3.1 องค์ประกอบของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก

โครงสร้างพื้นฐานของระบบควบคุมฟัซซี่แสดงได้ด้วยภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**13 โดยสัญญาณความคลาดเคลื่อนระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตจะเข้าสู่ตัวควบคุมฟัซซี่ จากนั้นสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมฟัซซี่จะถูกป้อนเข้าสู่ระบบที่ต้องการควบคุม จนกระทั่งได้สัญญาณเอาต์พุตของระบบ ซึ่งตัวควบคุมประกอบด้วยชุดปฏิบัติการฟัซซิฟิเคชัน (Fuzzification Unit) ฐานความรู้ (Knowledge) ลอจิกเพื่อการตัดสินใจ (Decision Making Logic) และชุดปฏิบัติการดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification unit) ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**12 ความแตกต่างของความเป็นสมาชิกระหว่างเซตธรรมดากับฟัซซี่เซต

(ก) เซตธรรมดา (ข) ฟัซซี่เซต [40]



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**13 โครงสร้างพื้นฐานของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ [40]

ปฏิบัติการฟัซซิฟิเคชัน ทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลทางด้านอินพุตแบบธรรมดาเป็นตัวแปรภาษาหรือตัวแปรฟัซซี่ โดยอยู่ในรูปของค่าระดับความเป็นสมาชิกแต่ละฟัซซี่เซตบางครั้งอาจรวมชุดวัดสัญญาณด้วยทรานสดิวเซอร์และชุดเปรียบเทียบสัญญาณไว้ในส่วนที่เป็นชุดปฏิบัติการฟัซซิฟิเคชันนี้ด้วย เนื่องจากตัวแปรจากตัวแปรอินพุตแต่ละตัวที่วัดได้จากเครื่องมือวัดอาจอยู่นอกขอบเขตเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด ดังนั้นต้องดำเนินการแปลงค่าตัวแปรอินพุตเหล่านี้ให้อยู่ในรูปขอบเขตเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนดด้วยค่าสเกล (scaling) หรือค่าเกน (gain factor) เรียกขั้นตอนนี้ว่า การทำนอร์มัลไลซ์ (normalization) ตัวอย่างเช่น สัญญาณความเร็วจากมอเตอร์กระแสตรงที่วัดได้อยู่ในช่วง [-1000, +1000] รอบต่อนาที ถ้ากำหนดให้เอกภพสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง [-1, +1] ดังนั้นต้องทำการคูณค่าแรงดันที่วัดได้ด้วย (1/1000) รอบต่อนาที เป็นต้น

ฐานความรู้ ประกอบด้วยส่วนที่เป็นฐานข้อมูล (data base) และฐานกฎการควบคุม (control rule base) ส่วนที่เป็นฐานข้อมูลนั้นให้นิยามต่าง ๆ ที่ใช้กำหนดกฎการควบคุมนั้น รวมทั้งเป็นศูนย์รวมของกฎการควบคุมแบบตัวแปรทางภาษา ซึ่งแสดงถึงแนวทางการควบคุมให้พฤติกรรมตามที่ต้องการ

ลอจิกเพื่อการตัดสินใจ เป็นส่วนที่ให้การเลียนแบบการตัดสินใจของมนุษย์ โดยอาศัยแนวคิดทางคณิตศาสตร์ และการอนุมานแบบฟัซซี่ลอจิก

ชุดปฏิบัติการดีฟัซซิฟิเคชัน ทำหน้าที่แปลงข้อมูลแบบฟัซซี่ไปเป็นตัวแปรธรรมดา (conventional variable) หรือคริปส์เอาต์พุตที่สมนัยกัน เพื่อให้ระบบภายใต้การควบคุมสามารถเข้าใจสัญญาณดังกล่าวได้ ข้อมูลแบบฟัซซี่นี้เป็นข้อมูลที่ได้มาจากการอนุมานกฎการควบคุมแบบฟัซซี่ เนื่องจากขอบเขตเอกภพสัมพัทธ์ของเอาต์พุตในฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอาจยังไม่อยู่ในขอบเขตที่นำไปใช้งานได้ ดังนั้นต้องทำการแปลงค่าเอาต์พุตในเอกภพสัมพัทธ์ให้อยู่ในขอบเขตเอาต์พุตจริงที่ใช้ควบคุมระบบ เรียกขั้นตอนนี้ว่า การดีนอร์มัลไลซ์ (demoralization) ตัวอย่างเช่น เอกภพสัมพัทธ์ของเอาต์พุตในฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอยู่ในช่วง [-1, +1] แต่สัญญาณแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์กระแสตรงมีขอบเขตอยู่ในช่วง [-12, +12] โวลต์ ดังนั้นต้องทำการคูณค่าเอาต์พุตเอกภพสัมพัทธ์ด้วย 12 ก่อนส่งไปควบคุมระบบจริง เป็นต้น

2.3.2 การออกแบบระบบควบคุมแบบฟัซซี่

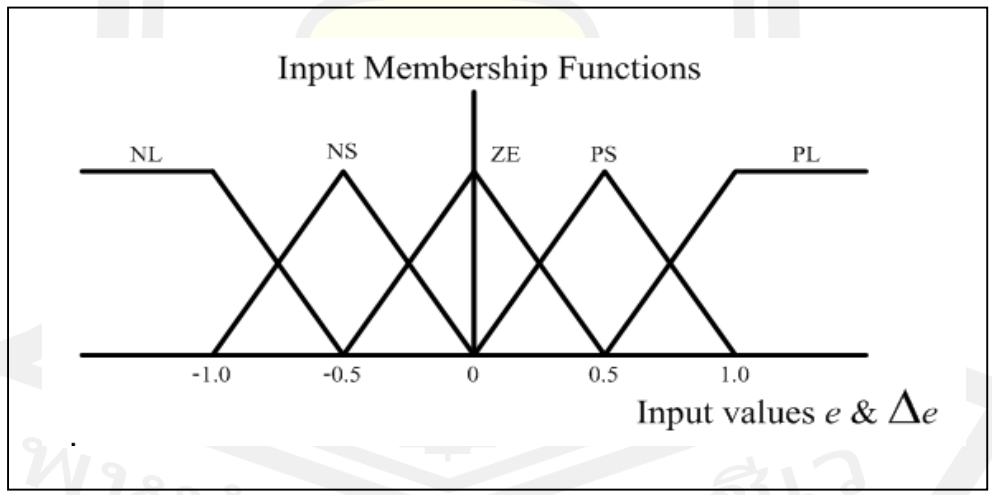
การทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกจะอาศัยคณิตศาสตร์แบบฟัซซี่ลอจิก และตัวแปรฟัซซี่ลอจิกเมื่อต้องเกี่ยวข้องกับระบบทางกายภาพที่ไม่เป็นฟัซซี่ลอจิก ตัวแปรต่างๆ ที่ไม่เป็นฟัซซี่ลอจิก ได้แก่ เอาต์พุตของกระบวนการ หรือระบบภายใต้การควบคุม อินพุตอ้างอิง เป็นต้น โดยผ่านกระบวนการทำให้เป็นฟัซซี่ลอจิกด้วยฟัซซี่ลอจิกโอเพอเรเทอร์ (fuzzy operator) ที่เรียกว่า ฟัซซิฟายเออร์ (fuzzifier) ผลของการอนุมานที่ได้จากตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกจะนำไปควบคุมกระบวนการโดยอยู่ในรูปของตัวแปรฟัซซี่ลอจิก ซึ่งระบบหรือกระบวนการภายใต้การควบคุมนั้นไม่สามารถเข้าใจได้ ตัวแปรฟัซซี่ลอจิกดังกล่าวจึงต้องผ่านกระบวนการทำให้ไม่เป็นฟัซซี่ลอจิกด้วยโอเพอเรเทอร์ชนิดดีฟัซซิฟายเออร์ (defuzzifier) หรือดีฟัซซิฟิเคชันโอเพอเรเทอร์ (defuzzification operator)

การควบคุมระบบแบบฟัซซี่ลอจิก เป็นการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับระบบที่มีความซับซ้อน โดยอาศัยคณิตศาสตร์แบบฟัซซี่ อาศัยกระบวนการตัดสินใจและความคิดอ่านของมนุษย์เป็นพื้นฐานในการควบคุม โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสถานะต่าง ๆ ในระบบพลวัตในรูปประโยคฟัซซี่ ซึ่งมี ลักษณะเป็นประโยคเงื่อนไข ถ้า... แล้ว... (if... then) เรียกประโยคเงื่อนไขแบบนี้ว่า กฎฟัซซี่ (fuzzy rule) ในการดำเนินงานตัวแปรทางภาษาแทนการใช้ตัวแปรเชิงเลข ซึ่งตัวแปรทางภาษาเป็นตัวแปรที่มีการให้ค่าเป็นคำหรือประโยค เพื่อบ่งบอกลักษณะของสิ่งของใด ๆ ซึ่งมีค่าตามคำให้ค่าของฟัซซี่เซต ตัวอย่างเช่น ถ้าความเร็วของมอเตอร์มีค่ามาก แล้วลดแรงดันที่ให้กับมอเตอร์ ซึ่งตัวแปรทางภาษาหรือตัวแปรฟัซซี่ คือความเร็วของมอเตอร์ และแรงดันที่ให้กับมอเตอร์ เป็นต้น

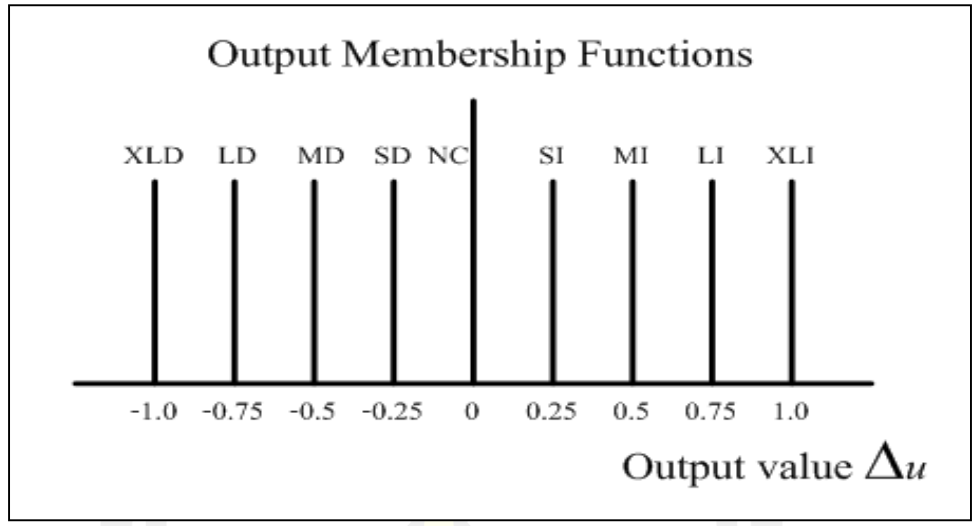
กฎฟัซซี่ในประโยคเงื่อนไข ถ้า... แล้ว... ประกอบด้วยส่วนของตัวแปรเงื่อนไข (antecedent) และส่วนของตัวแปรผลลัพธ์ (consequent) ซึ่งในแต่ล่ะส่วนอาจมีได้หลายตัวแปร โดยเชื่อมประโยคด้วยโอเพอร์เรเตอร์ and หรือ or เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาสำหรับควบคุมระบบอินพุตเดียวเอาต์พุตเดียว (SISO) และระบบหลายอินพุต (MIMO) กฎการควบคุมฟัซซี่สามารถกำหนดขึ้นด้วยการเขียน

เป็นประโยคแสดงอาการของความพยายามควบคุมกับผลที่เกิดขึ้นกับการตอบสนองของระบบ โดยอาศัยความรู้ความชำนาญและประสบการณ์ของมนุษย์ในการกำหนดกฎฟัซซี่เพื่อควบคุมระบบ ตัวอย่างการกำหนดกฎฟัซซี่ลอจิก เมื่อตัวแปรฟัซซี่ลอจิกในส่วนเงื่อนไขประกอบด้วยสองอินพุต คือ ความคลาดเคลื่อนของ (error, e) และ ค่าปริมาณความคลาดเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลง (change in error, Δe) ซึ่งตัวแปรในส่วนผลลัพธ์กำหนดเป็นสัญญาณ เอาต์พุต (Δu)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในส่วนของตัวแปรอินพุต ซึ่งกำหนดให้เป็นรูปสามเหลี่ยม และรูปสี่เหลี่ยมคางหมูแสดงไว้ดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**14 ประกอบไปด้วย 5 ฟัซซี่เซตคือ NL (negative large), NS (negative small), ZE (zero), PS (positive small) และ PL (positive large) โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตในส่วนผลลัพธ์ของกฎฟัซซี่แสดงดังภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.** 14 กำหนดเป็นแบบ Sugeno ประกอบไปด้วย 9 ฟัซซี่เซตคือ XLD (extra largely decrease), LD (largely decrease), MD (moderately decrease), SD (slightly decrease), NC (no change), SI (slightly increase), MI (moderately increase), LI (largely increase) และ XLI (extra largely increase) ทั้งนี้การอนุมานกฎฟัซซี่ใช้วิธี Sugeno [41] ซึ่งสามารถกำหนดกฎฟัซซี่ได้ดังตาราง **Error! No text of specified style in document.**1 [42]



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**14 (ก) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุต (ข) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต

ตาราง **Error! No text of specified style in document.**1 กฎฟัซซี่

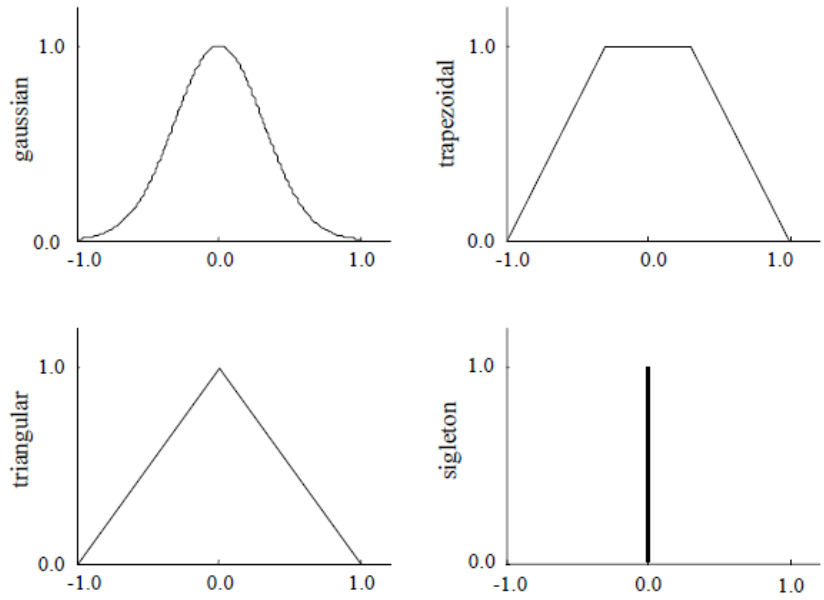
		Change in errors (Δe)				
		NL	NS	ZE	PS	PL
errors (e)	NL	XLI	LI	MI	SI	NC
	NS	LI	MI	SI	NC	SD
	ZE	MI	SI	NC	SD	MD
	PS	SI	NC	SD	MD	LD
	PL	NC	SD	MD	LD	XLD

จากการกำหนดกฎฟัซซี่ตามตาราง Error! No text of specified style in document.1 และการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุตดังภาพประกอบที่ 2.13 เมื่อนำมาเขียนกฎฟัซซี่จะได้ทั้งสิ้นจำนวน 25 กฎ ดังต่อไปนี้

กฎที่ 1 ถ้า e = NL และ Δe = NL แล้ว Δu = XLI
กฎที่ 2 ถ้า e = NS และ Δe = NL แล้ว Δu = LI
กฎที่ 3 ถ้า e = ZE และ Δe = NL แล้ว Δu = SI
กฎที่ 4 ถ้า e = PS และ Δe = NL แล้ว Δu = SI
กฎที่ 5 ถ้า e = PL และ Δe = NL แล้ว Δu = NC
กฎที่ 6 ถ้า e = NL และ Δe = NS แล้ว Δu = XLI
กฎที่ 7 ถ้า e = NS และ Δe = NS แล้ว Δu = MI
กฎที่ 8 ถ้า e = ZE และ Δe = NS แล้ว Δu = SI
กฎที่ 9 ถ้า e = PS และ Δe = NS แล้ว Δu = NC
กฎที่ 10 ถ้า e = PL และ Δe = NS แล้ว Δu = SP
กฎที่ 11 ถ้า e = NL และ Δe = ZE แล้ว Δu = MI
กฎที่ 12 ถ้า e = NS และ Δe = ZE แล้ว Δu = SI
กฎที่ 13 ถ้า e = ZE และ Δe = ZE แล้ว Δu = NC
กฎที่ 14 ถ้า e = PS และ Δe = ZE แล้ว Δu = SD
กฎที่ 15 ถ้า e = PL และ Δe = ZE แล้ว Δu = MD
กฎที่ 16 ถ้า e = NL และ Δe = PS แล้ว Δu = SI
กฎที่ 17 ถ้า e = NS และ Δe = PS แล้ว Δu = NC
กฎที่ 18 ถ้า e = ZE และ Δe = PS แล้ว Δu = SD
กฎที่ 19 ถ้า e = PS และ Δe = PS แล้ว Δu = MD
กฎที่ 20 ถ้า e = PL และ Δe = PS แล้ว Δu = XLD
กฎที่ 21 ถ้า e = NL และ Δe = PL แล้ว Δu = NC
กฎที่ 22 ถ้า e = NS และ Δe = PL แล้ว Δu = SD
กฎที่ 23 ถ้า e = ZE และ Δe = PL แล้ว Δu = SD
กฎที่ 24 ถ้า e = PS และ Δe = PL แล้ว Δu = LD
กฎที่ 25 ถ้า e = PL และ Δe = PL แล้ว Δu =XLD

2.3.3 การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

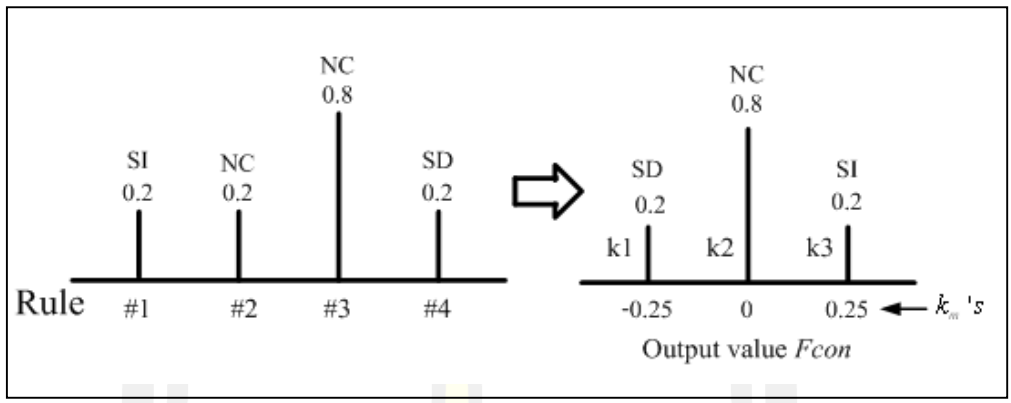
รูปแบบฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในฟัซซี่เซตมีรูปแบบที่ไม่ตายตัว กำหนดโดยผู้ออกแบบซึ่งจาศัยประสบการณ์การของผู้ออกแบบโดยตรง โดยรูปแบบที่กำหนด จะเป็นรูป สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมคางหมู รูประฆังคว่ำ เป็นต้น ดังภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**15 ในการออกแบบระบบควบคุมสามารถกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับความเหมาะสม เช่นการแบ่งช่วงฟัซซี่เซต การแบ่งส่วนฟัซซี่ลอจิก



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**15 รูปแบบฟังก์ชันความเป็นสมาชิก [43]

2.3.4 เทคนิคการดิฟัซซิฟิเคชัน

รูปแบบการอนุมานกฎฟัซซี่ดำเนินการตามวิธี Sugeno ซึ่ง Michio และ Sugeno ได้เสนอวิธีการอนุมานที่แตกต่างไปจากวิธีของแมมดานิ [44] ด้วยการลดขั้นตอนการคำนวณหาจุดศูนย์ถ่วงในการทำดีฟัซซี่ Sugeno ได้ใช้เส้นตรงโทนในการแทนฟังก์ชันสมาชิกในส่วนของตัวแปรเอาต์พุต ในที่นี้ค่าเอาต์พุตของแต่ละกฎจะเป็นเส้นตรงโทนซึ่งทำให้สะดวกสำหรับขั้นตอนการรวมกฎ จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของระบบฟัซซี่แบบ Sugeno มีเพียงส่วนเอาต์พุตเท่านั้น การทำดีฟัซซี่ของระบบแสดงดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**16



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**16 การรวมกฎแบบ Sugeno [42]

สามารถคำนวณหาค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดิฟัซซี่ ได้ดังสมการที่ 3.23 ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดิฟัซซี่นี้เรียกว่าค่าถ่วงน้ำหนักเฉลี่ย (weighted average หรือ WA) [42]

สามารถคำนวณหาค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดิฟัซซี่ ได้ดังสมการที่ 3.23 ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดิฟัซซี่นี้เรียกว่าค่าถ่วงน้ำหนักเฉลี่ย (weighted average หรือ WA) [42]

$$WA = \frac{\sum_{m=1}^{L} u(k_m) \times k_m}{\sum_{m=1}^{L} u(k_m)} \qquad 2.32$$

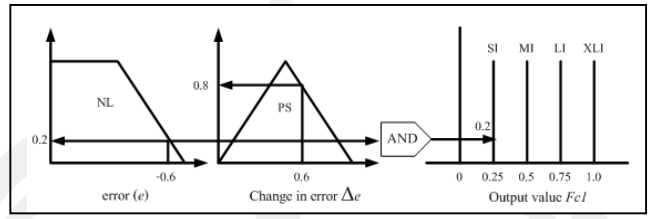
โดยที่ k_m คือ เส้นตรงโทน

$u(k_m)$ คือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกของเส้นตรงโทน k_m

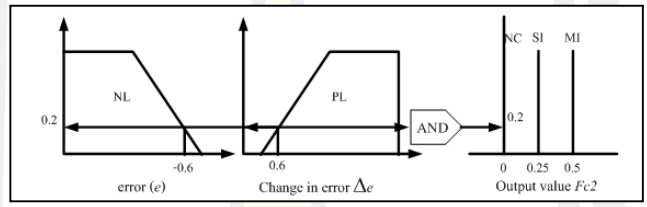
ในการอนุมานกฎฟัซซี่ แต่ละครั้ง มีจำนวนกฎที่เป็นไปได้จาก 25 กฎ อยู่เพียง 1-4 กฎ ดังนั้นการอนุมานกฎฟัซซี่ดำเนินการดังตัวอย่างต่อไปนี้

กำหนดให้ error (e) = -0.6 change in error (∆e) = 0.6 พิจารณาความคลาดเคลื่อน (error ,*e*) ที่ -0.6 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเซต NL และเซต NS โดยมีระดับความเป็นสมาชิกของเซต NL เท่ากับ 0.2 และมีระดับความเป็นสมาชิกของเซต NS เท่ากับ 0.8 พิจารณาค่าปริมาณความคลาดเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลง (change in error , Δe) ที่ 0.6 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเซต PS แลเซต PLโดยมีระดับความเป็นสมาชิก เท่ากับ 0.8 และ 0.2 ตามลำดับ ดังนั้นจะได้กฎในส่วนเงื่อนไข 4 ข้อดังแสดงรายละเอียดตามภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**17 [42]

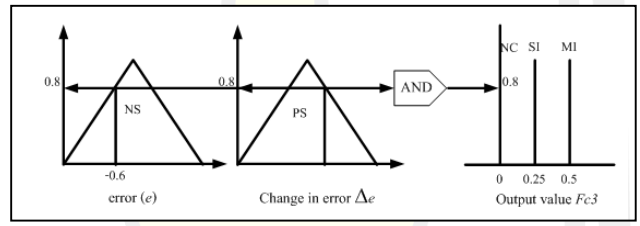
1. *IF* (*e is NL AND* Δe *is PS*) *THEN* (Δu *is SI*)



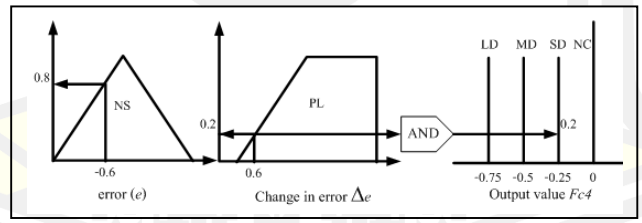
2. *IF* (*e is NL AND* Δe *is PL*) *THEN* (Δu *is NC*)



3. *IF* (*e is NS AND* Δe *is PS*) *THEN* (Δu *is NC*)



4. *IF* (*e is NS AND* Δe *is PL*) *THEN* (Δu *is SD*)



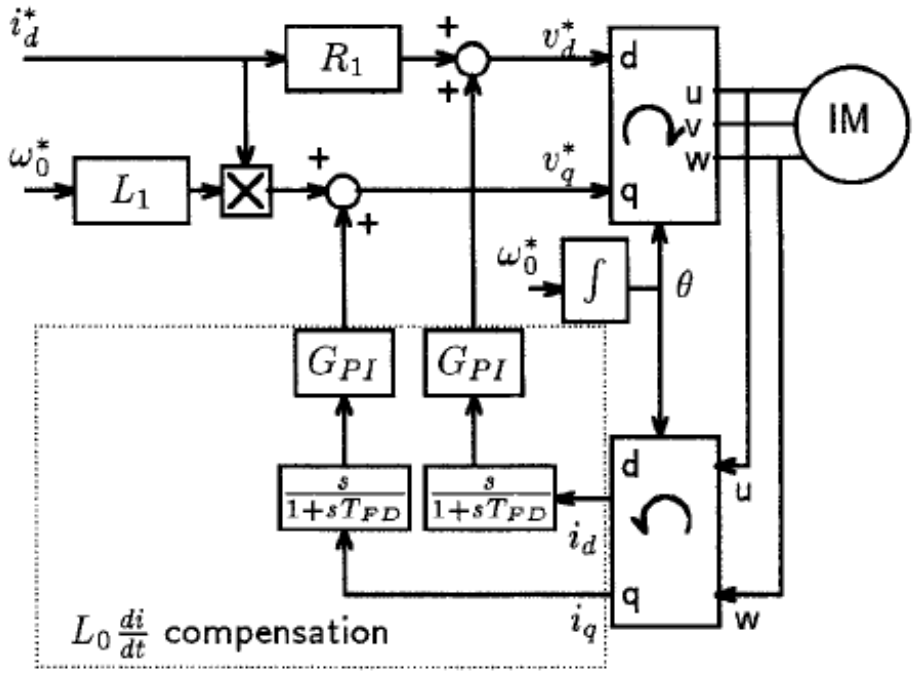
ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**17 การอนุมานกฎฟัซซี่แบบ Sugeno [42]

จากภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**17 เมื่อรวมผลจาก 4 กฎ ทั้ง 4 เข้าด้วยกันแบบ Sugeno และคำนวณผลการอนุมานกฎฟัซซี่แบบ Sugeno ตามสมการ ที่ 3.32 จะได้ดังสมการที่ 3.33

$$WA = \frac{0.2\times(-0.25)+0.8\times 0+0.2\times 0.25}{0.2+0.8+0.2} = 0 \qquad 2.33$$

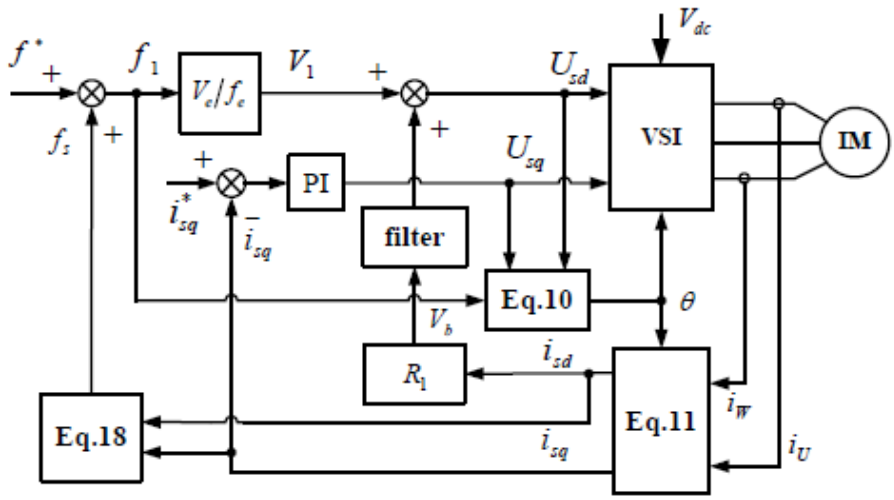
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

L. Ben-Brahim (1998) [4] นำเสนอการปรับปรุงตัวควบคุม V/F เป็นตัวควบคุมสเกลาร์แบบลูปเปิดสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งตัวควบคุมแบบ V/F ไม่สามารถควบคุมการในช่วงทรานเซียนได้ อาจทำให้ระบบเกิดความไม่เสถียร งานวิจัยนี้เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของการควบคุม V / f แบบเดิม บทความนี้วิเคราะห์สาเหตุของความไม่มีเสถียรภาพนี้และเสนอตัวลดแรงสั่นสะเทือนเพื่อระงับการสั่นไม่พึงประสงค์โดยส่งกลับค่ากระแสที่จ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเพื่อใช้ในการควบคุมจะช่วยลดการแกว่งของแรงบิดและความเร็ว



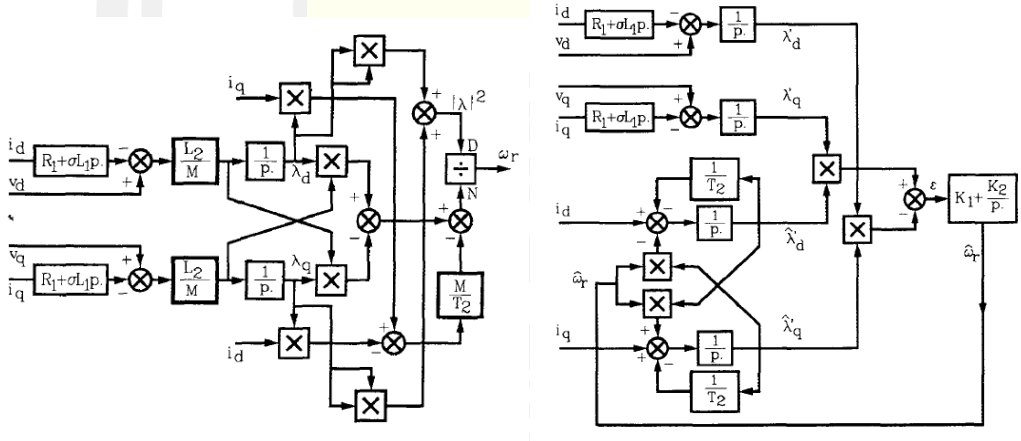
ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**18 แผนภาพการควบคุมแบบอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ (V/F control) [4]

W. Chen, D. Xu, R. Yang, Y. Yu, and Z. Xu (2009) [6] เสนอวิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบ V/F เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและความเสถียรของระบบลูปเปิด โดยการชดเชยแรงดันที่สเตอร์เมื่อตอนแรงดันตกให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของการควบคุมความเร็วที่ความเร็วต่ำและเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบ



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**19 แผนภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบ V/F โดยการชดเชยแรงดันที่สเตเตอร์ [6]

C. Schauder (1989) [45] ได้เสนอวิธีการควบคุมมอเตอร์แบบเวกเตอร์โดยใช้การประมาณค่าความเร็วแบบ MARS (model-reference adaptive system; MARS) สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสโดยไม่ใช้เซ็นเซอร์วัดความเร็ว โดยใช้การประมาณค่าความเร็วจากค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของสเตเตอร์

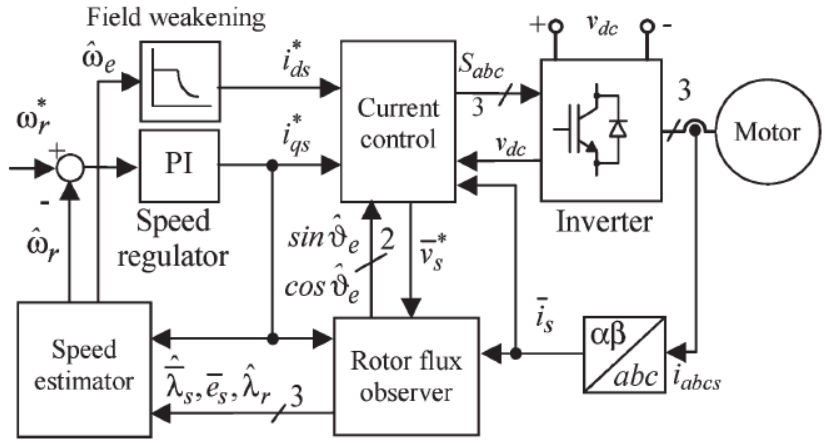


(ก) (ข)

ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**20 แผนภาพบล็อกของการประมาณค่าความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส [45]

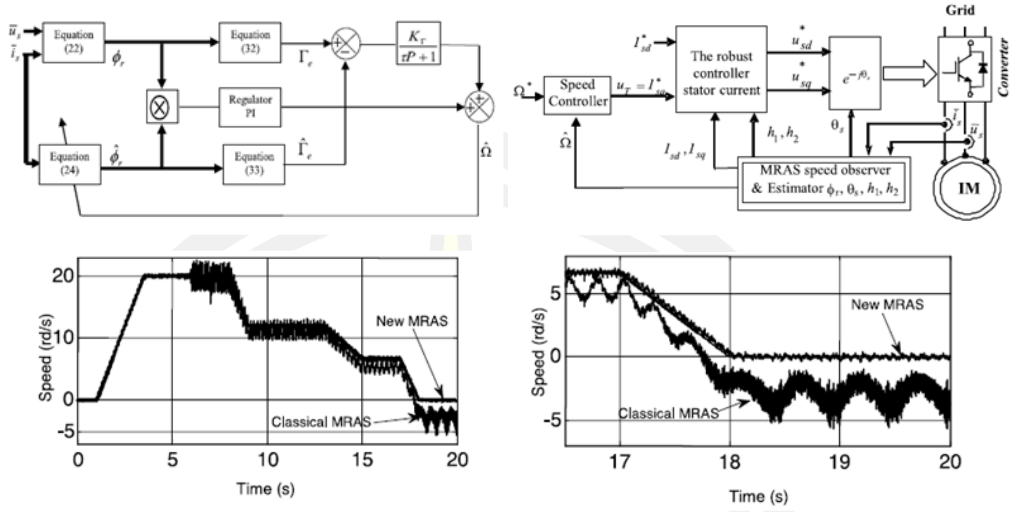
ก ค่าความเร็วของโรเตอร์ ข ค่าความเร็วของ MARS (model-reference adaptive system

R. Bojoi, P. Guglielmi, and G.-M. Pellegrino (2008) [9] เสนอวิธีการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส แบบเวกเตอร์หรือฟิลด์ออเรียนเต็ดแบบไร้เซ็นเซอร์สำหรับงานที่ต้นทุนต่ำ อัลกอริทึม SDRFOC มากจากการประมาณค่าฟลักซ์โดยใช้คอนโทรลเลอร์โปรเซสเซอร์สัญญาณดิจิตอลแบบจุดคงที่ต้นทุนต่ำ



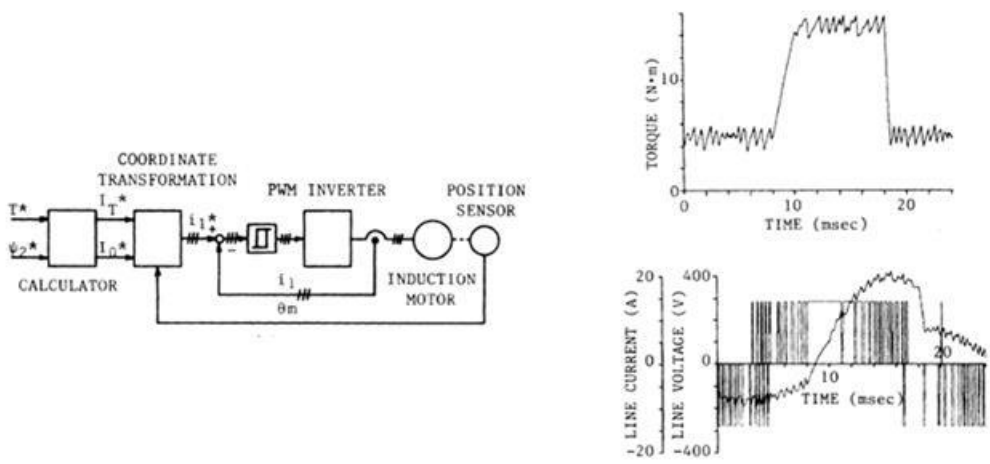
ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**21 แผนภาพบโครงสร้างของ Sensorless Direct Field-Oriented Control [9]

I. Benlaloui, S. Drid, L. Chrifi-Alaoui, and M. Ouriagli [46] ได้เสนอวิธีการปรับปรุงการประมาณค่าความเร็วแบบ MARS (New model-reference adaptive system; MARS) สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสโดยไม่ใช้เซ็นเซอร์วัดความเร็ว เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของการควบคุมเวกเตอร์ โดยวิธีการ MRAS แบบเดิมนั้นค่าฟลักซ์ของโรเตอร์ที่ประมาณได้จะถูกเปรียบเทียบกับค่าของจำลองอ้างอิง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพที่ความเร็วต่ำยังคงไม่แน่นอน แต่ในวิธี MRAS แบบใหม่จะใช้การเปรียบเทียบทั้งของค่าฟลักซ์และแรงบิดกับค่าของแบบจำลองอ้างอิง กลไกการปรับตัวจะเพิ่มตัวควบคุมแบบพีไอและตัวกรองความถี่ต่ำเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของการควบคุม

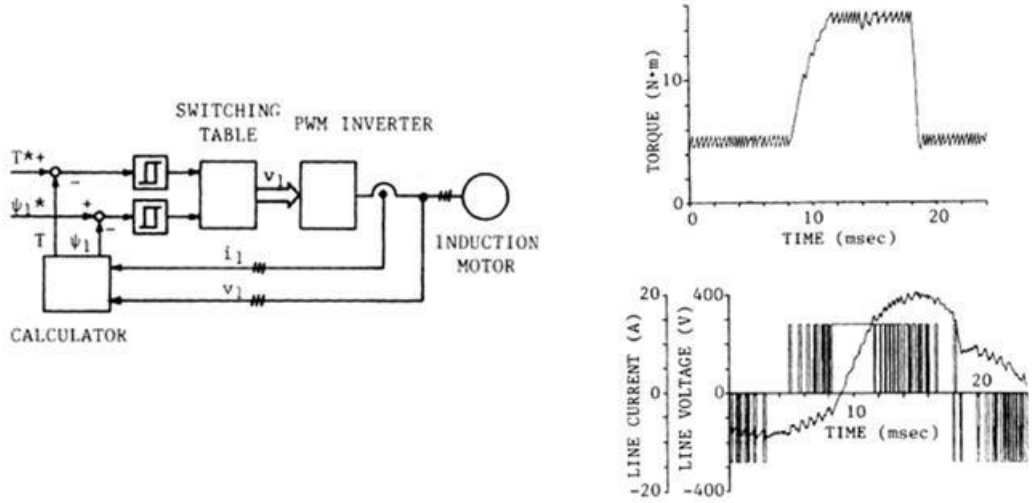


ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**22 แผนภาพบโครงสร้างของ New model-reference adaptive system; MARS [46]

Takahashi ,1986 [13] เสนอวิธีการควบคุมแรงบิดโดยตรงได้รับการพัฒนามาจากการควบคุมแบบ FOC โดยการควบคุมแบบ DTC จะควบคุมฟลักซ์และแรงบิดโดยตรง โดยการใช้ตารางสวิตช์สำหรับเลือกเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แทนการทำ PWM เพื่อควบคุมฟลั๊กและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสให้ได้ค่าที่เหมาะสม พบว่าให้ผลผลตอบสนองของฟลั๊กและแรงบิดที่เหมาะสมได้เร็วขึ้น และลดการสูญเสียฮาร์มอนิกและเสียงรบกวน ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**23 แสดง โครงสร้างการควบคุมแสดงแบบการควบคุมแบบฟิลด์ออเรียนเต็ดทางอ้อม (Field-Oriented Control: FOC) เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางตรง (Direct Torque Control : DTC)



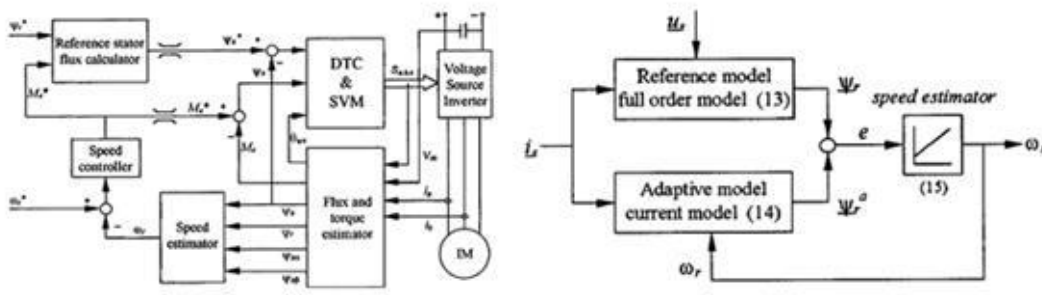
ก)



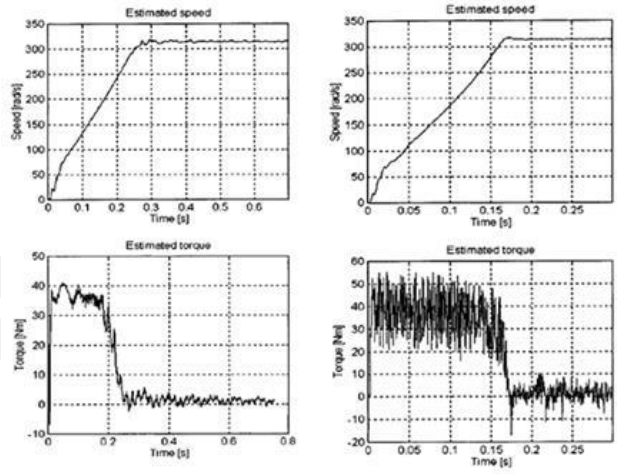
ข)

ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**23 แสดงโครงสร้างเปรียบเทียบการควบคุมแบบ ก) ฟิลด์ออเรียนเต็ดทางอ้อม (Field-Oriented Control: FOC) ข) การควบคุมแบบเวกเตอร์ทางตรง (Direct Torque Control : DTC) [13]

Cristian Lascu, Ion Boldea, 2000 [47] ได้เสนอวิธีการควบคุมแรงบิดโดยตรงและการควบคุมการฟลั๊กแบบใหม่ตามแบบเวกเตอร์ปริภูมิความกว้างพัลส์ (Direct Torque Control and Flux Control base on Space-Vector:DTC-SVM) สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบไร้เซ็นเซอร์ จะใช้การควบคุมแบบดิจิตอลแบบลูปปิดสำหรับควบคุมทั้งฟลักซ์และแรงบิดในลักษณะเดียวกันกับ DTC แต่แรงดันไฟฟ้าจะถูกสร้างจาก SVM ด้วยการวิธีนี้สมรรถนะของ DTC ในช่วงเวลาชั่วขณะจะไม่เปลี่ยนแปลงและค่าแรงบิดกระเพื่อมลดลง และการประมาณค่าความเร็วของมอเตอร์ใช้วิธีการควบคุมเชิงปรับตัวแบบ MRAC (Model Reference Adaptive Controller) แสดงโครงสร้างดังภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**24 โครงสร้างการควบคุม DTC-SVM



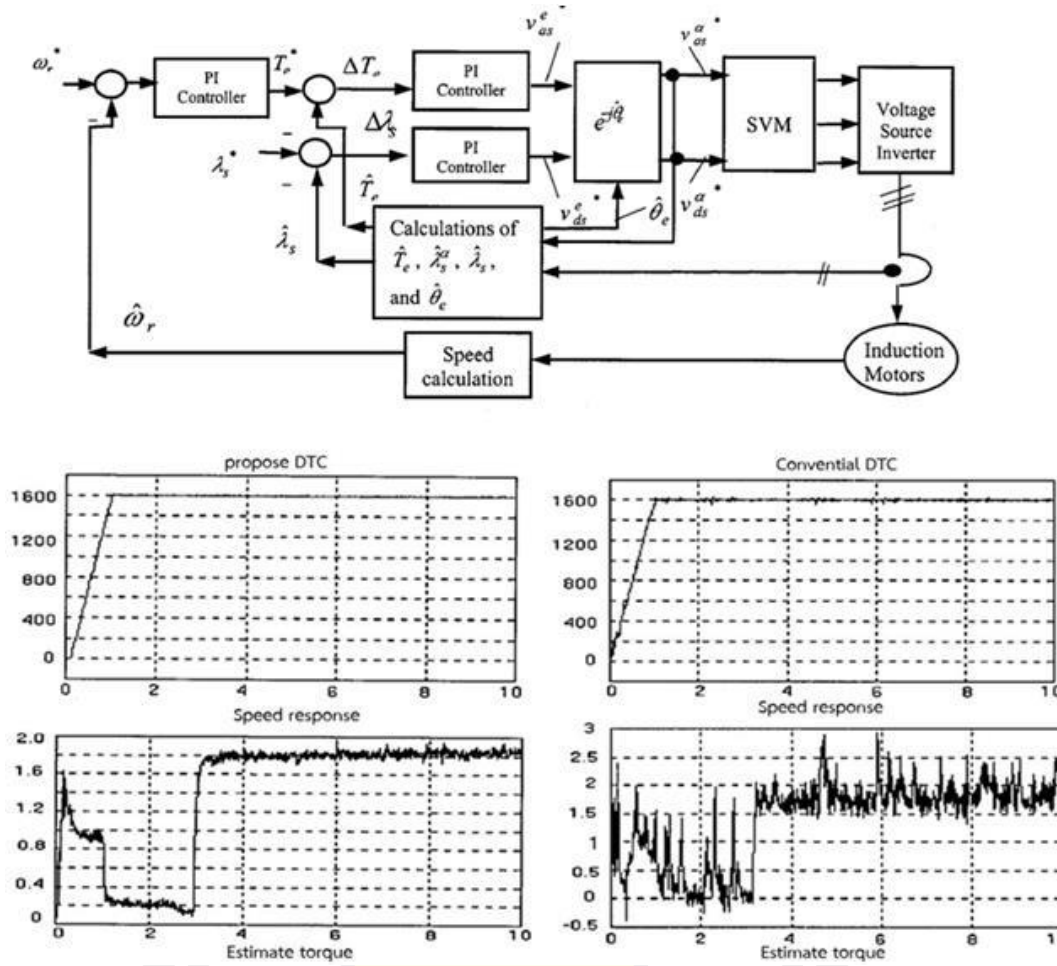
ก)



ข)

ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**24 ก) แสดงโครงสร้างการควบคุม DTC-SVM [47]
ข) ความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส

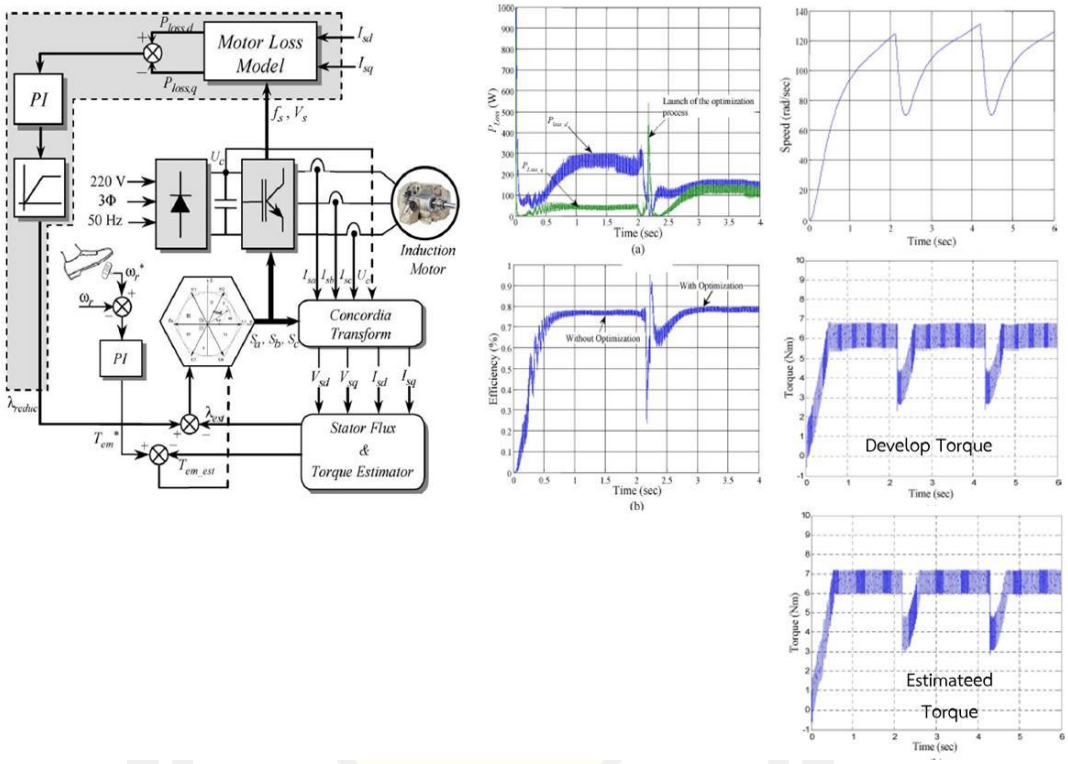
Y. S. Lai and J. H. Chen 2001 [48] ได้เสนอวิธีการควบคุมแรงบิดโดยตรงแบบปริภูมิความกว้างพัลส์แบบใหม่ เพื่อลดการแกว่งของแรงบิดของมอเตอร์ โดยเพิ่มตัวควบคุมพีไอในการควบคุมแรงบิดและฟลั๊กเพื่อคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงให้กับชุดเวกเตอร์ปริภูมิความกว้างพัลส์ได้จากค่าความผิดพลาดของแรงบิดและฟลั๊ก เพื่อนำไปสร้างสัญญาณการสวิตช์ให้กับอินเวอร์เตอร์ แสดงโครงสร้างดังภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**25 โครงสร้างการควบคุม DTC-base induction motor drive



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**25 การควบคุม DTC-base induction motor drive [48]

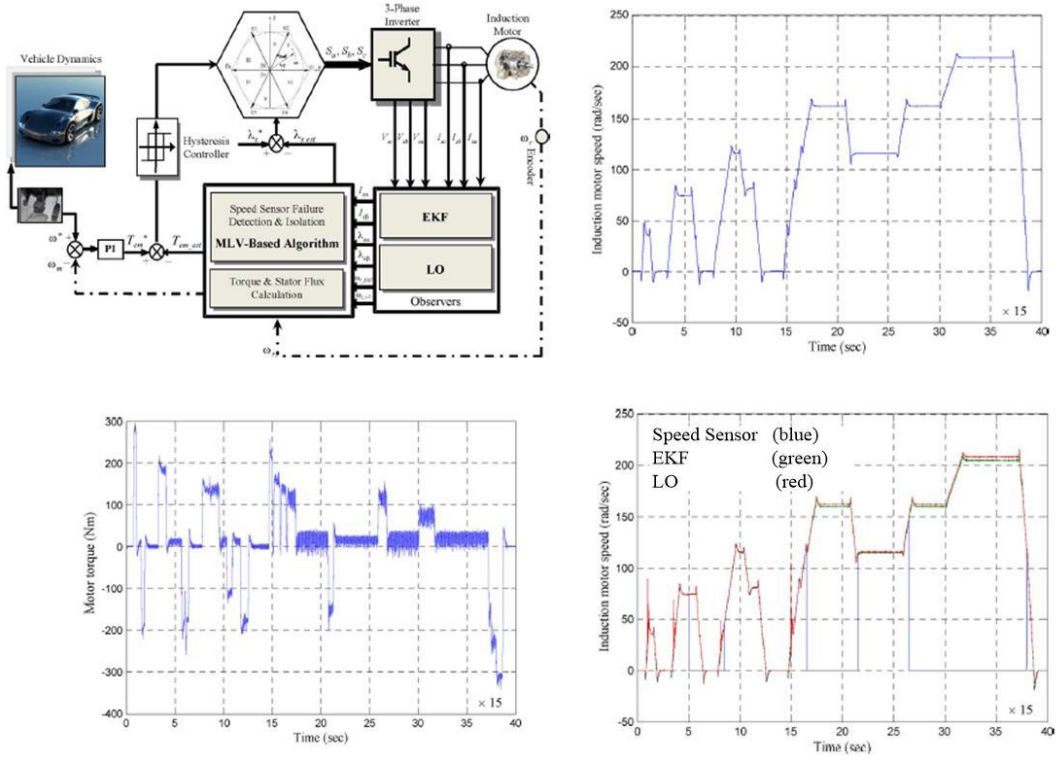
A. Haddoun, M. E. H. Benbouzid, D. Diallo, R. Abdessemed, J. Ghouili, and K. Srairi [20] เสนอวิธีการควบคุมเพื่อลดการสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า ด้วยวิธีควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวไฟฟ้าสามเฟสชนิดควบคุมแรงบิดโดยตรง DTC ซึ่งค่าฟลักซ์จะถูกเลือกตามความต้องการของแรงบิดของรถยนต์ไฟฟ้า การทดสอบได้ทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1.1 kW และได้ทดสอบโดยการนำค่าการสูญในมอเตอร์เหนี่ยวนำมาพิจารณาร่วมด้วย โดยใช้ตัวควบคุมแบบ

พีไอเพื่อควบคุมลูปของการะแสไฟฟ้าและความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากผลการทดสอบจะเห็นว่า ตัวควบคุมสามสารถลดการสูญเสียพลังงานได้ และยังคงมีสมรรถนะที่ดี



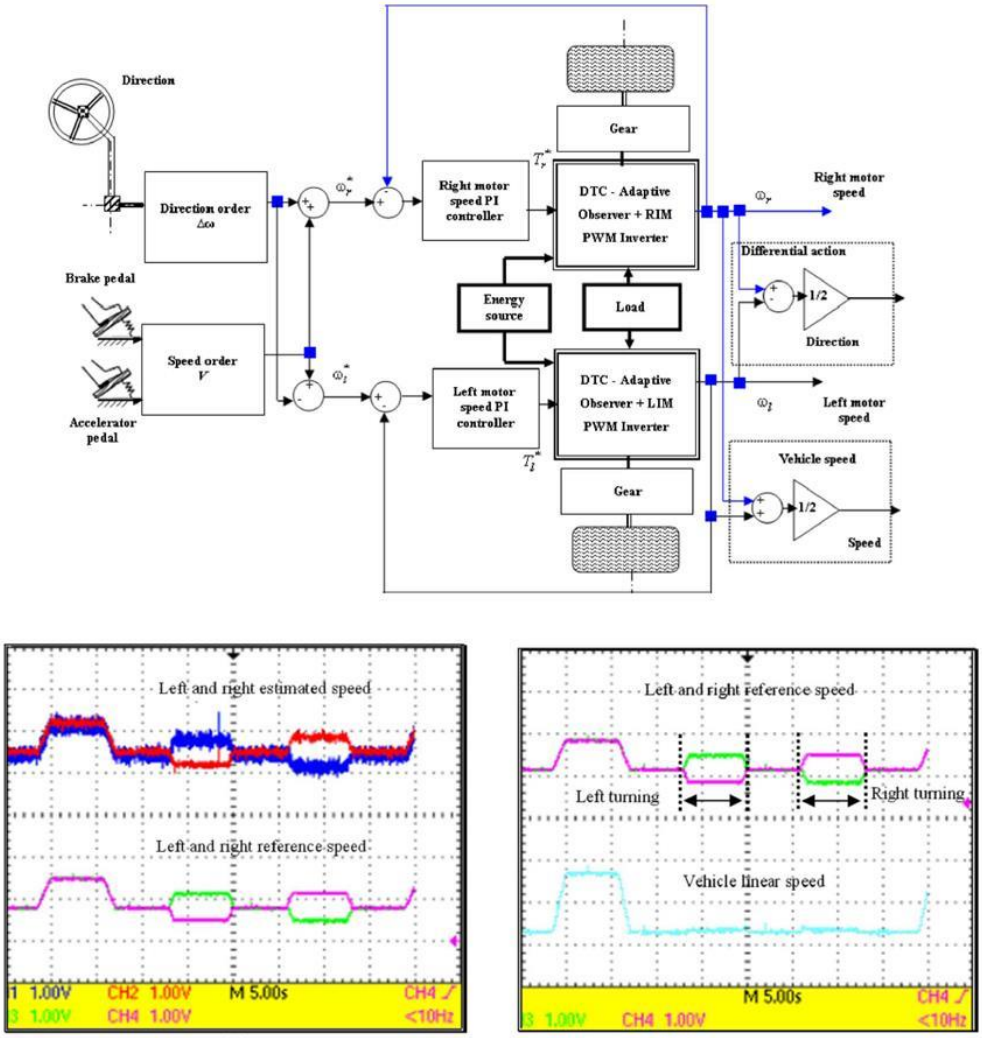
ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**26 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบ DTC เพื่อลดการสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำ [20]

B. Tabbache, M. E. H. Benbouzid, A. Kheloui, and J.-M. Bourgeot [49] เสนอแนวทางการเพิ่มสมรรถนะความน่าเชื่อถือของระบบขับเคลื่อนในรถยนต์ไฟฟ้า โดยเพิ่มการตรวจจับความผิดพลาดของเซ็นเซอร์วัดความเร็วโดยใช้อัลกอริธึม MLV เพื่อตรวจจับความผิดพลาดของเซ็นเซอร์ โดยมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบควบคุมแรงบิดโดยตรง (DTC) โดยใช้ตัวควบคุมแบบฮิสเตอรีซิส ควบคุมความเร็วด้วยตัวควบคุมพีไอ



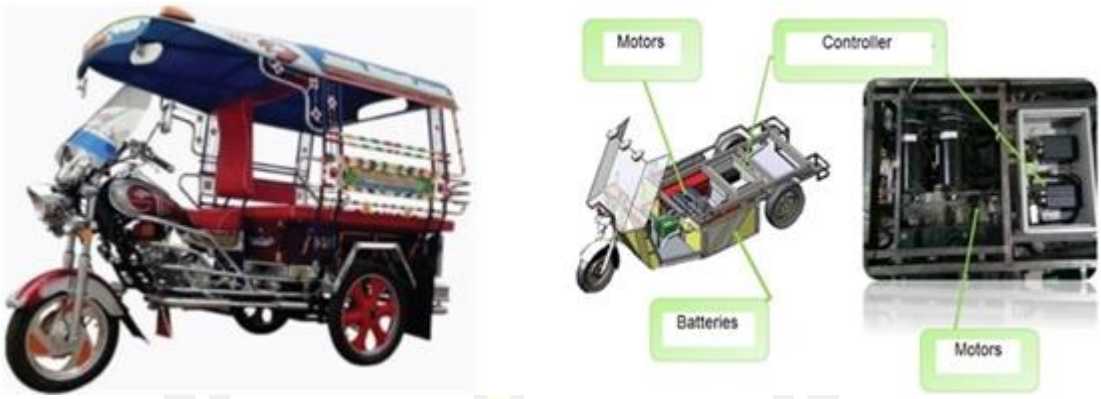
ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**27 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบ DTC โดยใช้อัลกอริธึม MLV [49]

B. Tabbache, A. Kheloui, and M. E. H. Benbouzid [18] เสนอวิธีการขับเคลื่อนสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า (EVs) แบบมอเตอร์คู่เพื่อลดความซับซ้อนของรูปแบบทางกลโดยติดตั้งมอเตอร์เชื่อมกับล้อผ่านการลดเกียตัวดิฟเฟอเรนเชียลสำหรับการเข้าโค้ง โดยใช้มอเตอร์แบบเหนี่ยวนำเป็นตัวขับแคลื่อน ระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ตามงานวิจัยนี้ได้แยกขับระหว่างมอเตอร์แต่ละล้อซึ่งต้องควบคุมให้มอเตอร์ทั้งสองตัวทำงานรักษาเสถียรภาพขณะเข้าโค้งหรือภายใต้สภาวะถนนลื่นระบบควบคุมแบบแรงบิดโดยตรง ข้อดีของการควบคุมมอเตอร์วิธีคือไม่ต้องใช้การวัดความเร็วหรือตำแหน่งแต่ใช้การวัดแรงดันและกระแสเท่านั้น โดยในลูปความเร็วใช้ตัวควบคุมพีไอ



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**28 ระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าโดยใช้ล้อมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำสองแบบแยกกัน [18]

P. Panmuang, T. Thongsan, N. Suwapaet, J. Laohavanich, and C. Photong [19] ได้เสนอวิธีการ เสนอระบบขับเคลื่อนสองล้อแบบใหม่ที่ใช้สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า 3 ล้อที่มีล้อฟรี 1 ชุดที่ด้านหน้าและ 2 ล้อมีระบบขับเคลื่อนที่ท้ายรถ ระบบขับเคลื่อนสองล้อใหม่ประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรงสองชุดที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมความเร็วรอบอย่างอิสระ ภายใต้สภาวะที่มีโหลดน้อย โครงสร้างแสดงดังภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**29



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**29 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ [19]

สำหรับต้นแบบรถสามล้อของ Skylab ที่มีแรงบิด 8 กิโลวัตต์เมื่อโหลดเต็มที่ และ 4kW เมื่อใช้งานที่มีน้ำหนักเบา โดยงานวิจัยนี้ได้ออกแบบโดยใช้มอเตอร์ 4 kW 2 ตัว มาทำงานแทน เพื่อต้นทุนการลงทุนที่ต่ำลง มีอายุการใช้งานยาวนานกว่าและช่วยให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง และทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายมากขึ้นเมื่อเทียบกับระบบมอเตอร์เดี่ยวที่มีมอเตอร์กระแสไฟ 8kW

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวพบว่า เทคนิคการควบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน เทคนิคการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสมีวิธีการควบคุมหลัก ๆ อยู่ 3 วิธี ได้แก่ การควบคุมแบบสเกลาร์ (scalar control) หรือการควบคุมแบบอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ (V/F control) การควบคุมแบบเวกเตอร์ (vector control) และการควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct Torque Control) ดังงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การควบคุมแบบ V/F มีจุดเด่นคือ เป็นเทคนิคที่ง่ายต่อการออกแบบด้วยการควบคุมเฉพาะขนาดและความถี่ของแรงดันหรือกระแส ทำให้มีต้นทุนต่ำแต่ไม่สามารถควบคุมแรงบิดได้โดนตรง การควบคุมแบบ FOC เป็นวิธีควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งจะควบคุมความเร็วและแรงบิดได้โดยตรง โดยคำนวณค่าฟลักซ์และแรงบิดจากสมการของมอเตอร์ ซึ่งต้องแปลงปริมาณสามเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้อยู่ในแกนดีคิว การควบคุมแบบ DTC จะทำการกำหนดรูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์โดยตรงโดยเลือกรูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์จากตารางเพื่อให้ได้แรงดันสเตเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อควบคุมแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ตามค่าอ้างอิง ข้อดีของการควบคุมแบบนี้คือไม่จำเป็นต้องใช้การแปลงพิกัดที่ยุ่งยาก ไม่ต้องใช้เครื่องมือวัดความเร็วรอบของโรเตอร์ โดยค่า

ความเร็ว ฟลักซ์ และแรงบิด จะได้จากการประมาณค่าจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์จึงต้องมีความเที่ยงตรงถึงจะได้สมรรถนะการควบคุมที่ดี ในการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการควบคุมแรงบิดและความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบควบคุมแรงบิดโดยตรง โดยทั่วไปในการควบคุมจะมีลูปการควบคุมความเร็วและลูปการควบคุมแรงบิด โดยใช้ตัวควบคุมแบบดั้งเดิม (Conventional) อย่างเช่น PI PID หรือ PD เพื่อควบคุมความเร็ว แรงบิด แรงดันไฟฟ้าและกระแส เพื่อให้ได้ผลการตอบสนองที่เหมาะสมตัวควบคุมพีไอดีมีโครงสร้างที่ง่ายแต่ในการออกแบบต้องอาศัยสมการของมอเตอร์และพารามิเตอร์ที่แม่นยำและเนื่องจากการควบคุมแบบ DTC ค่าอ้างอิงในการควบคุมจะได้จากการประมาณค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอีกด้วย ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาในการออกแบบที่ต้องอาศัยความเม่นยำของค่าพารามิเตอร์จึงเลือกใช้เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence Control) มาเพื่อแก้ปัญหาการควบคุมแบบดั้งเดิม โดยได้เลือกใช้ Fuzzy logic Control เนื่องจากตัวควบคุมชนิดนี้ไม่ต้องพึ่งพาค่าพารามิเตอร์หรือสมการของมอเตอร์ในการออกแบบ แค่อาศัยพฤติกรรมของระบบและประสบการณ์ของผู้ออกแบบเท่านั้น

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบขับเคลื่อนในยานยนต์ไฟฟ้า โดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นตัวขับเคลื่อน และระบบควบคุมในยานยนต์ไฟฟ้า ทำให้เกิดแนวคิดที่มุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบแรงบิดโดยตรงควบคุมความเร็วและแรงบิดด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกเพื่อควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์เมื่อมีการปรับความเร็วหรือมีการเปลี่ยนแปลงโหลดในสภาวะต่างๆ ให้เหมาะสมและเพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

บทที่ 3

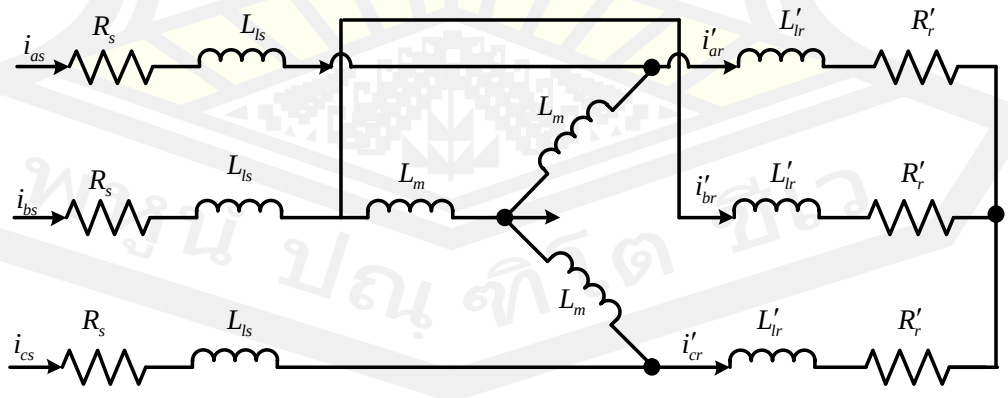
วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้นำเสนอขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัยซึ่งหลังจากที่ได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ทำให้เกิดแนวคิดที่มุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบแรงบิดโดยตรงควบคุมความเร็วและแรงบิดด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิก โดยได้นำทฤษฎีเหล่านั้นมาประยุกต์ใช้งานเพื่อให้ได้งานออกมาตามขอบเขตที่กำหนดไว้ ผู้วิจัยได้นำเสนออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง การออกแบบการควบคุมแรงบิดและความเร็วด้วยฟัซซี่ลอจิกสำหรับการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ การออกแบบการทดสอบเพื่อวัดสมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสำหรับการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

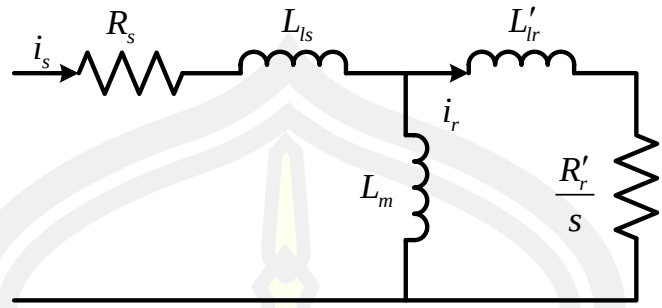
3.1 การวิเคราะห์สมการของการขับของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่

3.1.1 การวิเคราะห์สมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส

พิจารณาสมการมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสโดยต่อขดลวดแบบวาย (Y) วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส [31] แสดงดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**30 และวงจรสมมูลแบบแยกเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสแสดงดัง ภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**31



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**30 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสต่อแบบวาย (Y)



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**31 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบแยกเฟส

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสสามารถนำมาเขียนเป็นสมการอนุพันธ์ของแรงดันที่ขดลวดสแตอร์และโรเตอร์ได้ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2 [31] [50]

$$\left[V_s^{abc}\right] = \left[i_s^{abc}\right] R_s + \frac{d}{dt}\left[\psi_s^{abc}\right] \tag{3.1}$$

$$\left[V_r^{abc}\right] = \left[i_r^{abc}\right] R_r + \frac{d}{dt}\left[\psi_r^{abc}\right] \tag{3.2}$$

โดยที่

$$\begin{bmatrix}\psi_s^{abc}\\ \psi_r^{abc}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc}\\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_s^{abc}\\ i_r^{abc}\end{bmatrix}$$

$$L_{ss}^{abc} = \begin{bmatrix}L_{ls}+L_{ss} & L_{sm} & L_{sm}\\ L_{sm} & L_{ls}+L_{ss} & L_{sm}\\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls}+L_{ss}\end{bmatrix}$$

$$L_{rr}^{abc} = \begin{bmatrix}L_{lr}+L_{rr} & L_{rm} & L_{rm}\\ L_{rm} & L_{lr}+L_{rr} & L_{rm}\\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr}+L_{rr}\end{bmatrix}$$

$$L_{sr}^{abc} = \left[L_{sr}^{abc} \right]^t = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r \end{bmatrix}$$

ทำการแปลงแกนจาก abc ไปอยู่บนแกน dq ในรูปแบบการแปลงแบบปาร์ค (Park's transformation) ดังนั้นสมการแรงดันที่ขดลวดสเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส สามารถเขียนให้อยู่บนแกน dq ได้ดังนี้

$$\left[\mathbf{V}_s^{dq0} \right] = R_s \left[\mathbf{i}_{dq0s} \right] + \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \left[\psi_s^{dq0} \right] + \frac{d}{dt} \left[\psi_s^{dq0} \right] \tag{3.3}$$

$$\left[\psi_s^{dq0} \right] = \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{0s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{0s} \\ i'_{dr} \\ i'_{qr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

สมการแรงดันเมื่อพิจารณาด้านโรเตอร์ โดยมุมอ้างอิงด้านโรเตอร์คือ $\theta - \theta_r = \omega t - \omega_r t$ ดังนั้นจะได้สมการแรงดันด้านโรเตอร์บนแกน dq ดังนี้

$$\left[\mathbf{V}_{r'}^{dq0} \right] = R'_r \left[\mathbf{i}_{r'}^{dq0} \right] + \left(\omega - \omega_r \right) \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \left[\psi_{r'}^{dq0} \right] + \frac{d}{dt} \left[\psi_{r'}^{dq0} \right] \tag{3.5}$$

$$\left[\psi_{r'}^{dq0} \right] = \begin{bmatrix} \psi'_{dr} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L'_{lr} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L'_{lr} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{dr} \\ i'_{qr} \\ i'_{0r} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{0s} \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

สมการแรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสบนแกน dq

$$P_{in,dq0} = T_{em}\omega_{rm} \tag{3.7}$$

$$T_{em} = P_{in,dq0}\left(\frac{P}{2\omega_r}\right) \tag{3.8}$$

ผลรวมของกำลังงานขาเข้า แสดงได้ดังสมการ

$$P_{in,abc} = \frac{3}{2}v_{as}i_{as} + v_{bs}i_{bs} + v_{cs}i_{cs} + v'_{ar}i'_{ar} + v'_{br}i'_{br} + v'_{cr}i'_{cr} = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \\ v'_{ar} \\ v'_{br} \\ v'_{cr} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i'_{ar} \\ i'_{br} \\ i'_{cr} \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูป dq ได้ดังนี้

$$P_{in,dq0} = \left[\mathbf{V}_{dq0s}\right]^t\left[\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1}\right]^t\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1}\left[\mathbf{i}_{dq0s}\right] + \left[\mathbf{V}'_{dq0r}\right]^t\left[\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1}\right]^t\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1}\left[\mathbf{i}'_{dq0r}\right] \tag{3.10}$$

แทนค่า $\left[\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1}\right]^t\left[\mathbf{T}_{dq0}\right]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{2} \end{bmatrix}$ ลงใน (3.10) จะได้สมการกำลังไฟฟ้าบนแกน dq ดังสมการที่ (3.11)

$$P_{in,dq0} = \frac{3}{2}\left(v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs} + 2v_{0s}i_{0s} + v'_{dr}i'_{dr} + v'_{qr}i'_{qr} + 2v'_{0r}i'_{0r}\right) \tag{3.11}$$

แทนค่า $\left[\mathbf{V}_s^{dq0}\right] = R_s\left[\mathbf{i}_{dq0s}\right] + \omega\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\left[\psi_s^{dq0}\right] + \frac{d}{dt}\left[\psi_s^{dq0}\right]$

$$\left[\mathbf{V}_{r'}^{dq0}\right] = R_r'\left[\mathbf{i}_{r'}^{dq0}\right] + \left(\omega - \omega_r\right)\begin{bmatrix}0 & -1 & 0\\ 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\left[\psi_{r'}^{dq0}\right] + \frac{d}{dt}\left[\psi_{r'}^{dq0}\right]$$

$$P_{in,dq0} = \frac{3}{2}\begin{pmatrix} \omega(\psi_{ds}i_{qs} - \psi_{ds}i_{qs}) + (\omega - \omega_r)(\psi'_{dr}i'_{qr} - \psi'_{dr}i'_{qr}) \\ +R_s(i_{ds}{}^2 + i_{qs}{}^2 + 2i_{0s}{}^2) + R_r'(i'_{qr}{}^2 + i'_{qr}{}^2 + 2i_{0r}{}^2) \\ +i_{ds}\frac{d}{dt}\psi_{ds} + i_{qs}\frac{d}{dt}\psi_{qs} + 2i_{0s}\frac{d}{dt}\psi_{0s} \\ +i'_{dr}\frac{d}{dt}\psi'_{dr} + i'_{qr}\frac{d}{dt}\psi'_{qr} + 2i'_{0r}\frac{d}{dt}\psi'_{0r} \end{pmatrix} \tag{3.12}$$

การคำนวณหาแรงบิด T_{em} พิจารณาเฉพาะเทอมของ $\omega\psi_i$ โดยแรงบิดดังกล่าวจะเท่ากับผลรวมของเทอม $\omega\psi_i$ หารด้วยความเร็วทางกล

$$T_{em} = \frac{3}{2}\frac{P}{2\omega_r}\left(\omega(\psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds}) + (\omega - \omega_r)(\psi'_{dr}i'_{qr} - \psi'_{qr}i'_{dr})\right) \tag{3.13}$$

จากความสัมพันธ์ $\psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds} = -(\psi'_{dr}i'_{qr} - \psi'_{qr}i'_{dr}) = L_m(i'_{dr}i_{qs} - i'_{qr}i_{ds})$

สามารถเขียนความสัมพันธ์แรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสบนแกน dq ได้ดังนี้

$$T_{em} = \frac{3}{2}\frac{P}{2}(\psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds}) \tag{3.14}$$

$$= \frac{3}{2}\frac{P}{2}(\psi'_{qr}i'_{dr} - \psi'_{dr}i'_{qr}) \tag{3.15}$$

$$= \frac{3}{2}\frac{P}{2}L_m(i'_{dr}i_{qs} - i'_{qr}i_{ds}) \tag{3.16}$$

โดยปกติแล้วการเลือกแกนหมุนของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส จะนิยมเลือกแกนหมุนให้หมุนอยู่กับที่ โดยมีข้อกำหนดคือ

1) หมุนอยู่ที่แกนหยุดนิ่ง $(\omega = 0)$

2) หมุนอยู่ที่แกนหมุนโรเตอร์ $(\omega = \omega_r)$

3) หมุนอยู่ที่แกนหมุนซินโครนัส $(\omega = \omega_s)$

ได้เลือกแกนหมุนอยู่ที่แกนหยุดนิ่งเพื่อลดความซับซ้อนของสมการซึ่งการเลือกแกนบนแกนหยุดนิ่งจะทำให้ค่า $\omega = 0$ ดังนั้นจะทำให้แกน d ตรงกับแกน α และแกน d ตรงกับแกน β จะได้สมการแรงดันขดลวดสเตอร์และโรเตอร์ซึ่งเขียนในรูปแกนหมุนหยุดนิ่ง $\alpha\beta$ ดังสมการที่ (3.17)-(3.18) และฟลักซ์เชื่อมโยงของขดลวดสเตอร์และโรเตอร์ ดังสมการที่ (3.19)- (3.20)

$$\left[\mathbf{V}_s^{\alpha\beta 0}\right] = R_s\left[\mathbf{i}_s^{\alpha\beta 0}\right] + \frac{d}{dt}\left[\psi_s^{\alpha\beta 0}\right] \tag{3.17}$$

$$\left[\mathbf{V}_{r'}^{\alpha\beta 0}\right] = R_r'\left[\mathbf{i}_{r'}^{\alpha\beta 0}\right] + \omega_r\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\left[\psi_{r'}^{\alpha\beta 0}\right] + \frac{d}{dt}\left[\psi_{r'}^{\alpha\beta 0}\right] \tag{3.18}$$

$$\left[\psi_s^{\alpha\beta 0}\right] = \begin{bmatrix} \psi_{\alpha s} \\ \psi_{\beta s} \\ \psi_{0s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s i_{\alpha s} + L_m i'_{\alpha r} \\ L_s i_{\beta s} + L_m i'_{\beta r} \\ L_{ls} i_{0s} \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

$$\left[\psi_{r'}^{\alpha\beta 0}\right] = \begin{bmatrix} \psi'_{\alpha s} \\ \psi'_{\beta s} \\ \psi'_{0s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L'_r i'_{\alpha r} + L_m i_{\alpha s} \\ L'_r i'_{\beta r} + L_m i_{\beta s} \\ L'_{lr} i'_{0r} \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

โดยที่ $L_s = L_{ls} + L_m$

$L'_r = L'_{lr} + L_m$

ดังนั้นสมการความสัมพันธ์แรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสบนแกน dq สามารถเขียนให้อยู่ในบนแกน $\alpha\beta$ ดังสมการที่ (3.17)- (3.18)

$$T_{em} = \frac{3}{2}\frac{P}{2}(\psi_{\alpha s} i_{\beta s} - \psi_{\beta s} i_{\alpha s}) \tag{3.21}$$

$$= \frac{3}{2}\frac{P}{2}(\psi'_{\alpha r} i'_{\alpha r} - \psi'_{\alpha r} i'_{\beta r}) \tag{3.22}$$

$$= \frac{3}{2}\frac{P}{2}L_m(i'_{\alpha r} i_{\beta s} - i'_{\beta r} i_{\alpha s}) \tag{3.23}$$

3.1.2 ระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่

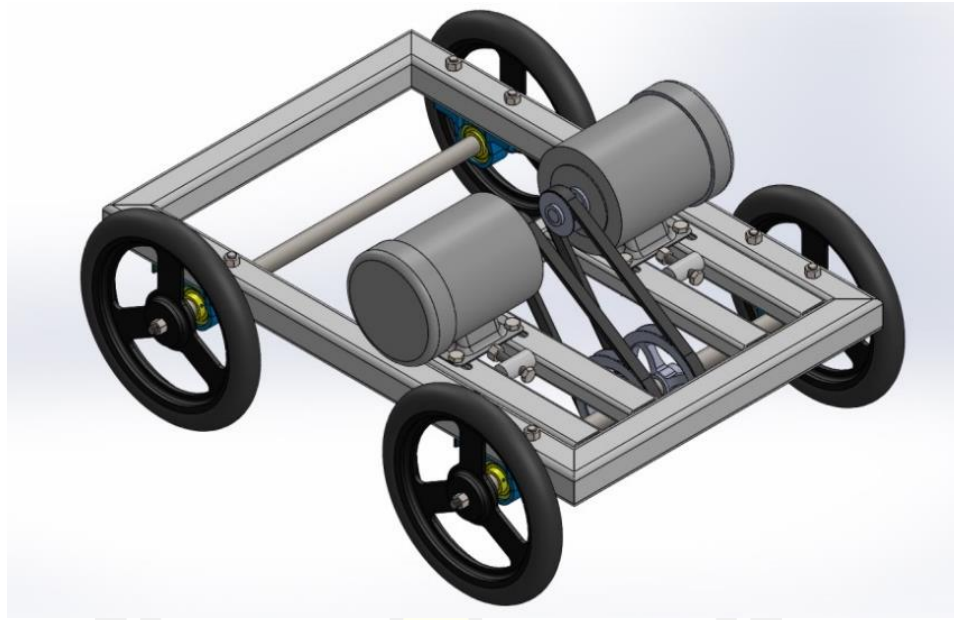
การขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ ได้ออกแบบระบบขับเคลื่อนโดยมีต้นแบบของ P. Panmuang, T. Thongsan, N. Suwapaet, J. Laohavanich, and C. Photong [19] ซึ่งภายใต้สภาวะไร้โหลดมอเตอร์ตัวที่หนึ่งจะทำงาน แต่เมื่อมีสภาวะโหลดเพิ่มขึ้น มอเตอร์ทั้งสองตัวจะทำงานพร้อมกัน ได้ออกแบบโครงสร้างของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ โครงสร้างแสดงดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**32 ประกอบด้วยมอเตอร์ ขนาด 746 วัตต์ จำนวน 2 ตัว กำลังงานโดยรวมเท่ากับ 1.5 กิโลวัตต์ ขนาดโครงสร้าง กว้าง 0.5 เมตร ยาว 1 เมตร จากการออกแบบได้ดำเนินการจัดสร้างชุดทดลองที่ได้ออกแบบไว้ ดังภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**32 ในการควบคุมจะต้องควบคุมให้มอเตอร์ทั้งสองตัวให้ทำงานพร้อมกันในสภาวะ เมื่อมีการปรับความเร็วหรือมีการเปลี่ยนแปลงโหลดในสภาวะต่างๆ เพื่อควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ ให้มีเสถียรภาพและสมรรถนะที่ดี

จากการศึกษางานวิจัย [51] โดยได้วิเคราะห์สมการการขับมอเตอร์คู่ พิจารณาทางฝั่งของระบบทางกล ตามโครงสร้างดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**33 สามารถ เขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางไฟฟ้ากับของขับมอเตอร์คู่ดังสมการที่ 3.24

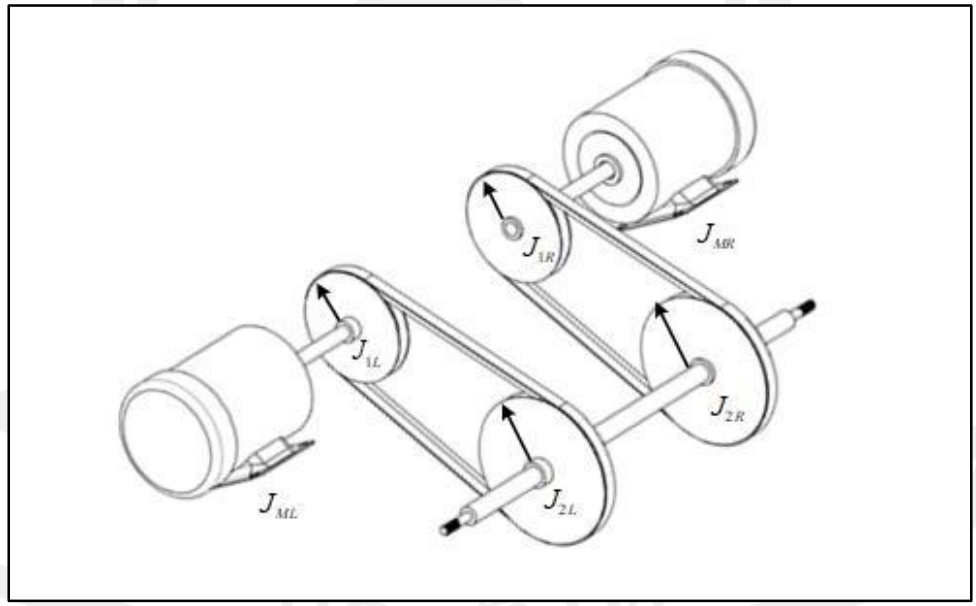
$$T_{em1} + T_{em2} = \frac{T_L}{k_G} + J\frac{d}{dt}\omega_2 + \beta\omega_2 \tag{3.24}$$

สามารถเขียนสมการอนุพันธ์ทางความเร็วของระบบขับมอเตอร์คู่ดังสมการที่ 3.25

$$\frac{d}{dt}\omega_2 = \frac{T_{em1} + T_{em2} - \frac{T_L}{k_G}}{J} \tag{3.25}$$



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**32 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**33 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่

จากสมการระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น เนื่องจาการควบคุมมอเตอร์ความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์นั้นจะต้องใช้พารามิเตอร์ในการจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของการขับมอเตอร์คู่ โดยการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ตาราง 2 สำหรับขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสของมอเตอร์ [52] มีวิธีดังนี้

ตาราง 2 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
R_s		ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
R_r		ความต้านทานของขดลาดโรเตอร์
L_{ls}		ความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์
L_{lr}		ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์
L_m		ความเหนี่ยวนำร่วม
J		โมเมนต์ความเฉื่อย
P		ขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า

1. การทดสอบกระแสตรงเรียกว่า โวลต์-แอมป์ (volt-amp method) หรือใช้มิเตอร์วัดค่าความต้านทานที่ขดลวดสเตเตอร์โดยตรง ในการทดสอบนี้จะใช้วิธีวัดค่าความต้านทานที่ขดลวดสเตเตอร์โดยตรง โดยการวัดค่าความต้านทานแต่ละ

2. การทดสอบสภาวะไร้โหลดเนื่องจากไม่มีการขับโหลดจึงประมาณค่า $s = 0$ ทำให้ได้ X_{ls} และ X_m

$$Z_{nl} = \frac{V_{s\phi}}{I_{s\phi}} = X_{ls} + X_m \tag{3.26}$$

เมื่อ $L_{ls} = \dfrac{X_{ls}}{2\pi f}$

$L_M = \dfrac{X_M}{2\pi f}$

3. การทดสอบยึดโรเตอร์ (locked-rotor test) การทดสอบยึดโรเตอร์จะใช้วงจรเดียวกับการทอสอบที่สภาวะไร้โหลด จะทำการจ่ายไฟให้มอเตอร์ที่ค่าแรงดันต่าง ๆ โดยยึดไม่ให้โรเตอร์หมุนจะทำให้ได้ค่า R_{eq} และ X_{eq}

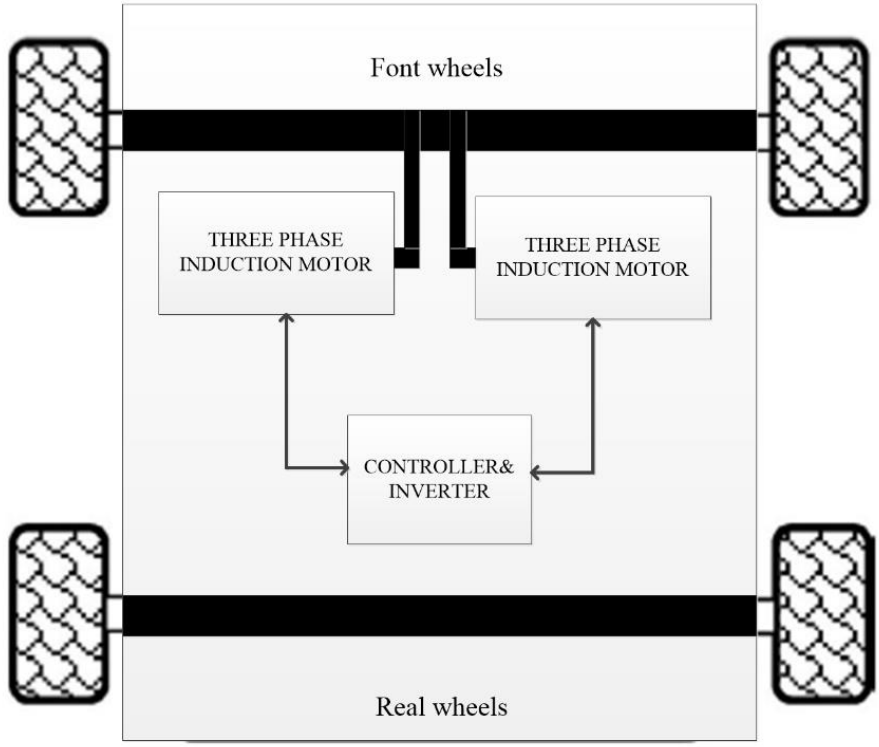
$$R_{eq} = \frac{V_{s\phi}}{I_{s\phi}} cos\theta = R_s + R'_r \tag{3.27}$$

$$X_{eq} = \frac{V_{s\phi}}{I_{s\phi}} sin\theta = X_{ls} + X_{lr} \tag{3.28}$$

ในการทดสอบหาการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ (J) สามารถดูได้จากคู่มือการทำงาน หรือได้จากการทดสอบมอเตอร์โดยตรงซึ่งการทดสอบก็จะมีความซับซ้อน โดยวิธีทดสอบอาจจะทำการจากการจำลองการทำงานของมอเตอร์บนโปรแกรม MATLAB โดยสุ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยไปเรื่อยๆ จนได้ผลใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่ที่สุด หรืออาจจะใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะเปรียบเทียบจากกราฟแสดงพลวัตของความเร็วมอเตอร์ ที่เปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง ดังนั้นผลการทดสอบจริงเพื่อค่าค่าในการทดสอบหาการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์จึงจำเป็นต้องทำการวัดความเร็วของมอเตอร์ดังนั้นจึงได้ออกแบบสร้างชุดตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์จะได้กล่าวในบทที่ 4 ต่อไป

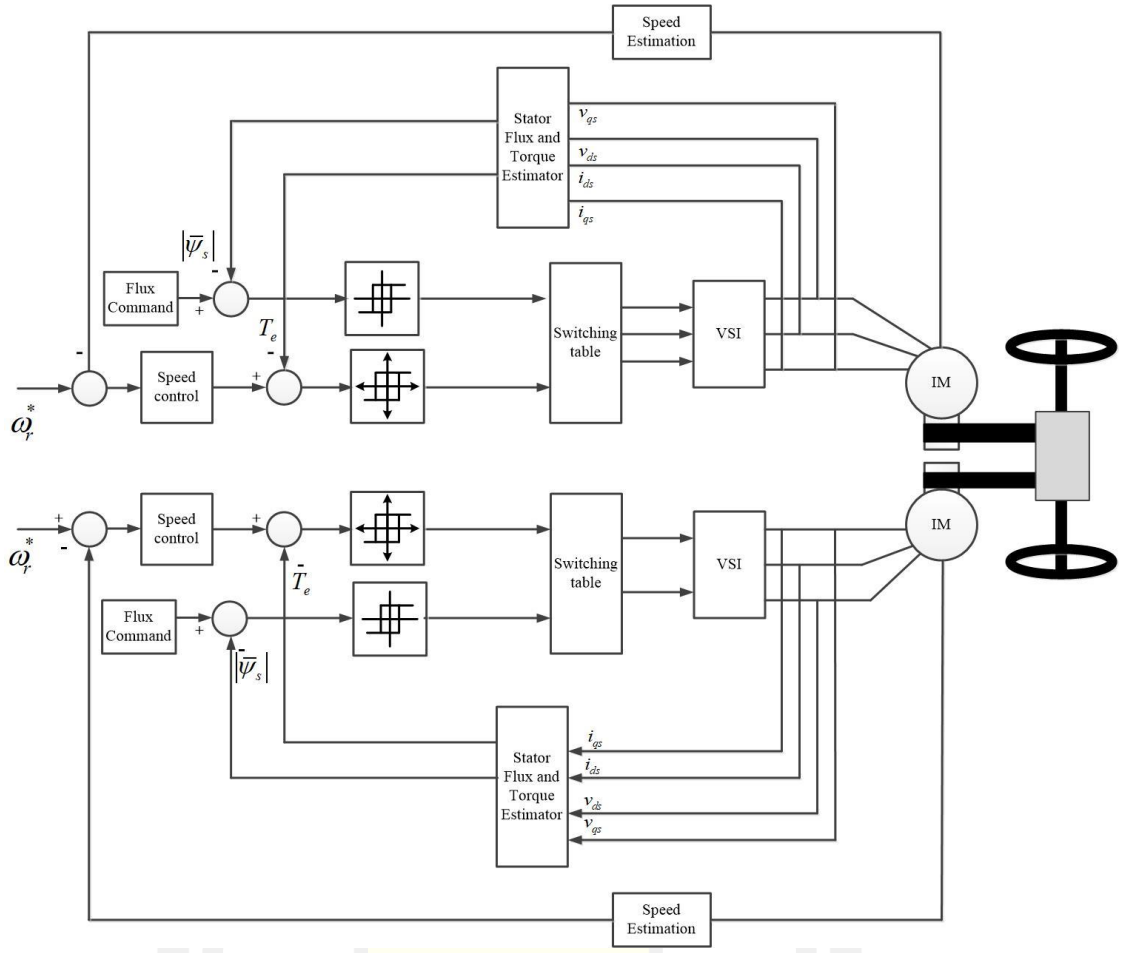
3.2 การออกแบบการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่แบบควบคุมแรงบิดโดยตรง

จากโครงสร้างของระบบควบคุมของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ แสดงดังภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.34 ประกอบด้วยมอเตอร์ 2 ตัว ทำงานเป็นอิสระต่อกัน โดยในการควบคุมจะต้องควบคุมให้มอเตอร์ทั้งสองตัวทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพและสมรรถนะที่ดี เมื่อมีการปรับความเร็วหรือมีการเปลี่ยนแปลงโหลดในสภาวะต่างๆ เพื่อควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ให้มีเสถียรภาพและสมรรถนะที่ดี ดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมจึงได้เลือกใช้การควบคุมที่สามารถควบคุมแรงแรงบิดของมอเตอร์ได้โดยตรง



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**34 โครงสร้างของระบบควบคุมของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่

การควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสโดยใช้การควบคุมแบบแรงบิดโดยตรงนั้นจะมีการควบคุมอยู่ 2 ส่วน คือ การควบคุมแรงบิดและการควบคุมความเร็วรอบ ในการควบคุมมอเตอร์แบบควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct Torque Control : DTC) [53] นั้นจะใช้วิธีการเลือกเวกเตอร์แรงดันที่เหมาะสมจากตารางการสวิตช์ โดยจะใช้ค่าผิดพลาดของฟลักซ์ แรงบิดและตำแหน่งเซกเตอร์มาพิจารณาการเลือกเวกเตอร์แรงดันที่เหมาะสม โครงสร้างของการควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ดังภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**35



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**35 โครงสร้างของการควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่

การควบคุมแบบแรงบิดโดยตรงนั้นสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากสมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์แสดงดังสมการที่ 3.29-3.31 [54] [55] ในการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอรเหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสด้วยวิธีควบคุมแรงบิดโดยตรงจะใช้อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันเพราะสามารถควบคุมฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์หรือฟลักซ์เชื่อมโยงโรเตอร์และแรงบิดได้โดยตรง โดยการเลือกรูปแบบการสวิตซ์มอเตอร์ให้กับอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสม

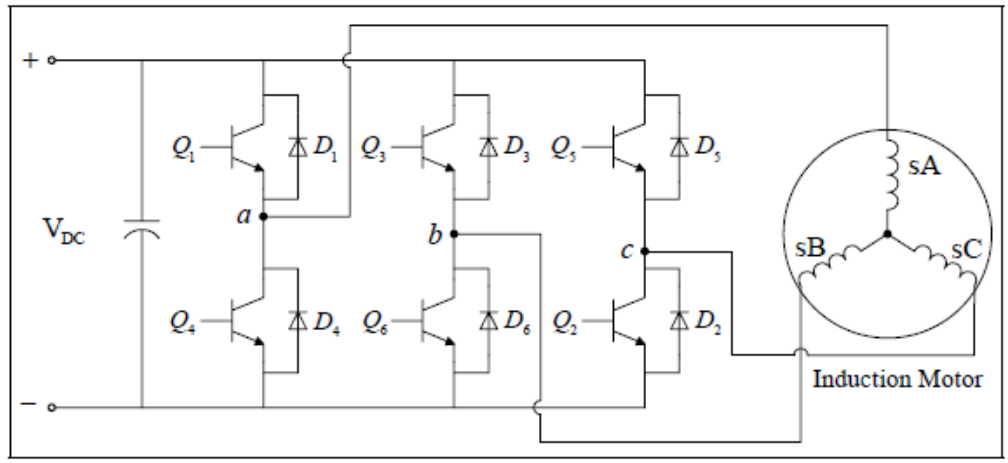
$$\psi_{s(\alpha,\beta)} = \int \left(v_{s(\alpha,\beta)} - R_s i_{s(\alpha,\beta)} \right) dt$$
$$\left| \overline{\psi_s} \right| = \sqrt{\psi_{s\alpha}^2 + \psi_{s\beta}^2} \qquad (3.29)$$

$$\theta_s = arctg(\psi_{s\alpha} + \psi_{s\beta}) \tag{3.30}$$

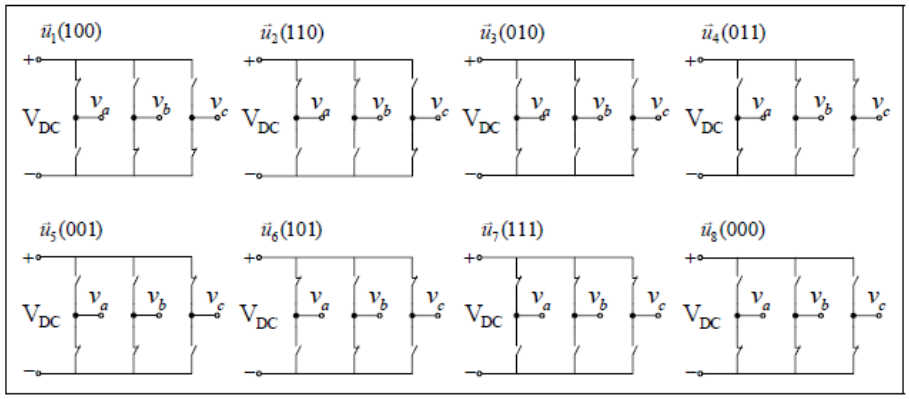
$$T_e = \frac{3}{2} P(\psi_{s\alpha} i_{s\beta} + \psi_{s\beta} i_{s\alpha}) \tag{3.31}$$

3.2.1 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage-source inverter: VSI)

การควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสโดยใช้วิธีการควบคุมแบบแรงบิดโดยตรง จะใช้วงจรการแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ หรือ อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage-source inverter: VSI) เพื่อเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบขับเคลื่อน โดยการควบคุมจะควบคุมด้วยการเลือกรูปแบบการสวิตช์ให้กับอินเวอร์เตอร์จากตารางการสวิตช์ เพื่อให้ได้ค่าฟลักซ์และแรงบิดตามค่าอ้างอิงภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.36 แสดงวงจรของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน



ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.36 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI) [3]



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**37 สถานะสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

อินเวอร์เตอร์สามเฟสทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ ประกอบด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ 6 ตัว ทำหน้าที่เปิดและปิดวงจร ซึ่งสวิตช์ที่อยู่ในกิ่งเดียวกันต้องไม่ปิดพร้อมกันเพื่อไม่ให้เกิดการลัดวงจร ดังนั้นการเปิดปิดสวิตช์จะทำให้เกิดสถานะแตกต่างกัน 8 สถานะ ภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**37 โดยที่ สถานะ 0 เมื่อสวิตช์ตัวบนเปิดวงจร และสถานะ 1 เมื่อ สวิตช์ตัวบนปิดวงจร จากรูปแบบการสวิตช์สามารถเขียนได้ดังตาราง Error**! No text of specified style in document.**3 แปลงเวกเตอร์แรงดันจาก 3 เฟส ไปเป็น 2 เฟส สามารถเขียนให้อยู่ในกรอบอ้างอิงได้ดังตาราง 4 และการวางสถานะบนระนาบ Vector Space ได้ดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**38

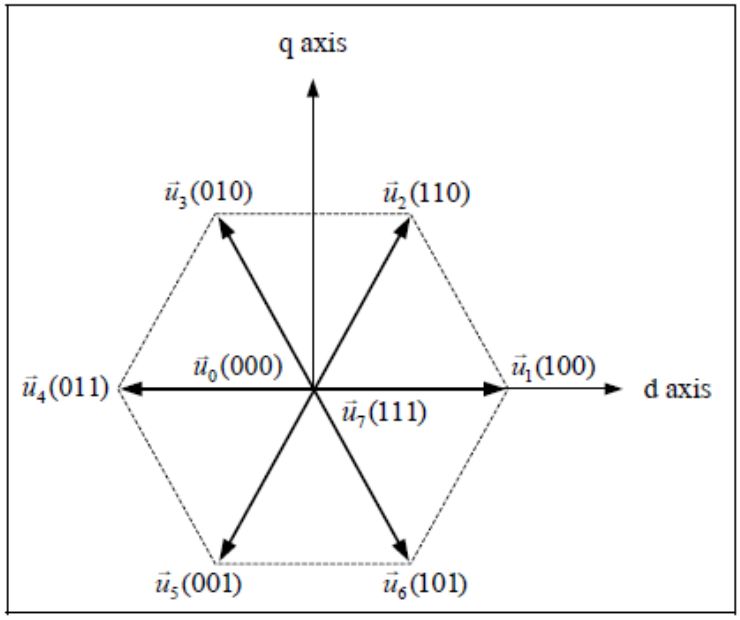
ตาราง **Error! No text of specified style in document.**3 รูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์สามเฟส

อันดับสถานะ	สถานะสวิตช์	v_a	v_b	v_c	v_{ab}	v_{bc}	v_{ca}
1	000	0	0	0	0	0	0
2	100	$\frac{2}{3}v_{DC}$	$-\frac{1}{3}v_{DC}$	$-\frac{1}{3}v_{DC}$	v_{DC}	0	$-v_{DC}$
3	110	$\frac{1}{3}v_{DC}$	$\frac{1}{3}v_{DC}$	$-\frac{2}{3}v_{DC}$	0	v_{DC}	$-v_{DC}$
4	010	$-\frac{1}{3}v_{DC}$	$\frac{2}{3}v_{DC}$	$-\frac{1}{3}v_{DC}$	$-v_{DC}$	v_{DC}	0
5	011	$-\frac{2}{3}v_{DC}$	$\frac{1}{3}v_{DC}$	$\frac{1}{3}v_{DC}$	$-v_{DC}$	0	v_{DC}

6	001	$-\frac{1}{3}v_{DC}$	$-\frac{1}{3}v_{DC}$	$\frac{2}{3}v_{DC}$	0	$-v_{DC}$	v_{DC}
7	101	$\frac{1}{3}v_{DC}$	$-\frac{2}{3}v_{DC}$	$\frac{1}{3}v_{DC}$	v_{DC}	$-v_{DC}$	0
8	111	0	0	0	0	0	0

ตาราง 4 รูปแบบการสวิตช์ในกรอบอ้างอิงสเตเตอร์

อันดับสถานะ	สถานะสวิตช์	v_α	v_β	$\overline{U_1}$
1	000	0	0	$\overline{U_0}$
2	100	$\frac{2}{3}v_{DC}$	0	$\overline{U_1}$
3	110	$\frac{1}{3}v_{DC}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}v_{DC}$	$\overline{U_2}$
4	010	$-\frac{1}{3}v_{DC}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}v_{DC}$	$\overline{U_3}$
5	011	$-\frac{2}{3}v_{DC}$	0	$\overline{U_4}$
6	001	$-\frac{1}{3}v_{DC}$	$-\frac{1}{\sqrt{3}}v_{DC}$	$\overline{U_5}$
7	101	$\frac{1}{3}v_{DC}$	$-\frac{1}{\sqrt{3}}v_{DC}$	$\overline{U_6}$
8	111	0	0	$\overline{U_7}$

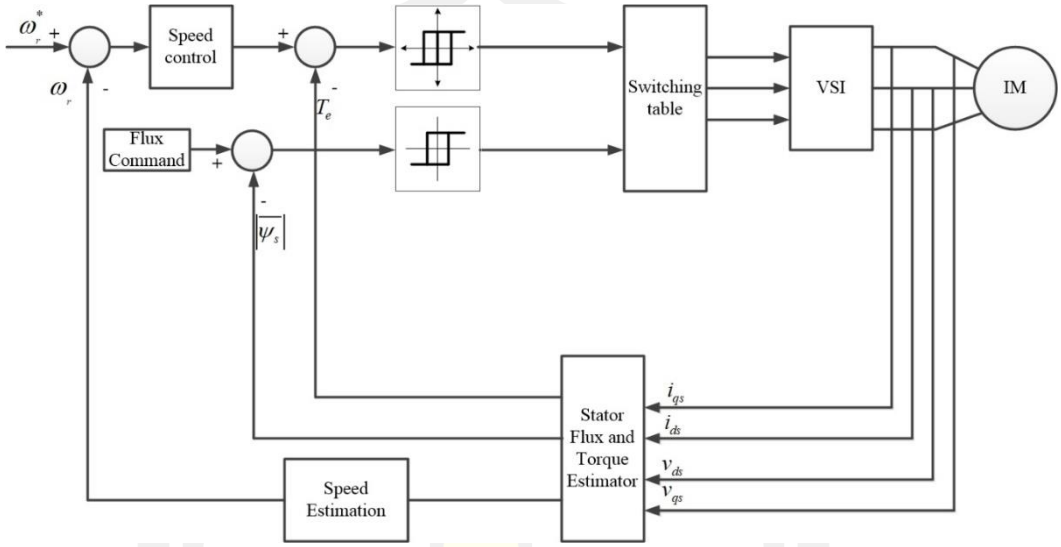


ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**38 การวางสถานะบนระนาบ Vector Space [56]

3.2.2 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสแบบควบคุมแรงบิดโดยตรง

ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีการควบคุมแรงบิดโดยตรงทำได้โดยการเลือกเวกเตอร์แรงดันจากอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์และแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส การเลือกเวกเตอร์แรงดันนั้นจะทำโดยการจำกัดขนาดของฟลักซ์และแรงบิดโดยใช้แถบฮิสเตอรีซิส (Hysteresis) ของฟลักซ์เชื่อมโยงและแรงบิด โครงสร้างการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิสดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**39 สำหรับรูปแบบการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์นั้น อินเวอร์เตอร์เป็นลักษณะของเวกเตอร์แรงดันแบ่งได้เป็น 6 เวกเตอร์ ดังนั้นการควบคุมแรงบิดโดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสจะนำค่าอ้างอิงของฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์มาเปรียบเทียบกับฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์จริงนั่นและนำที่ได้ของฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์มาป้อนเป็นอินพุตให้ฮีสเตอรีซิสเพื่อนำไปเลือกเลือกสวิตซ์เวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์ ในทำนองเดียวกันนำค่าอ้างอิงของแรงบิดมาเปรียบเทียบกับขนาดของแรงบิดจริงและค่าผิดพลาดของแรงบิดจะถูกป้อนให้ฮีสเตอรีซิสของแรงบิดผลที่ได้จากฮิสเตอรีซิสทั้งขนาดของฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์และแรงบิดจะถูกใช้ในการเลือกสวิตซ์เวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์ โดยใช้พร้อมกันกับข้อมูลตำแหน่งเซกเตอร์

ของสเปซเวกเตอร์ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์ ค่าผิดพลาดของของฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์และแรงบิดจะถูกควบคุมด้วยแถบฮีสเตอร์รีซิส ซึ่งจะมีความกว้างเท่ากับ $2\Delta\psi_s$ และ $2\Delta T_e$ ตามลำดับ



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**39 การควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส [4]

การควบคุมแรงบิดโดยใช้การควบคุมของฟลักซ์เชื่อมโยงสเตอร์ โดยทั่วไปแล้วค่าแรงบิดชั่วขณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสหาได้จากผลคูณครอสเวกเตอร์ (Cross vector product) ของเวกเตอร์ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์และเวกเตอร์กระแสสเตเตอร์จะพิจารณาในแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง ดังสมการที่ 3.32

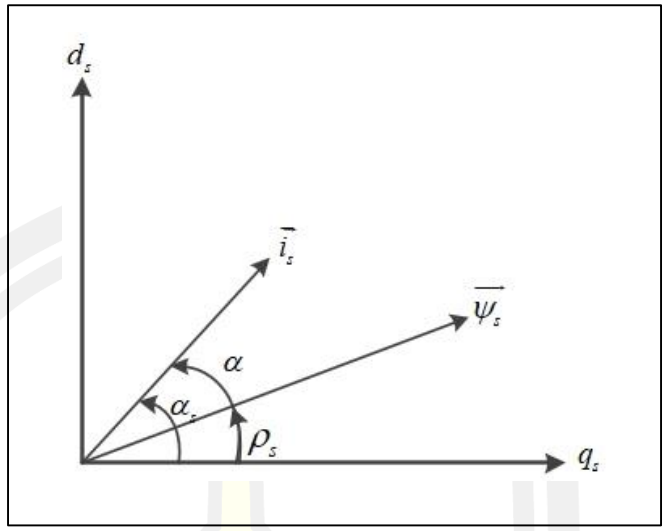
$$T_e = \frac{3P}{2}(\overrightarrow{\psi_s} \times \vec{i}_s) \tag{3.32}$$

โดยที่ T_e คือ แรงบิดสนามแม่เหล็ก

P คือ จำนวนขั้วมอเตอร์ (Pole)

$\overrightarrow{\psi_s}$ คือ เวกเตอร์ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์

$\vec{i}_s$ คือ เวกเตอร์กระแสสเตเตอร์



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**40 เวกเตอร์ของฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์และเวกเตอร์กระแสสเตเตอร์

เมื่อพิจารณา $\overrightarrow{\psi_s} = \left|\overrightarrow{\psi_s}\right| e^{j\rho_s}$ คือมุมเฟสของเวกเตอร์ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์กับแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง และ $\vec{i}_s = \left|\vec{i}_s\right| e^{j\alpha_s}$ แทนค่าลงในสมการที่ 3.32

$$T_e = \frac{3P}{2}\left|\overrightarrow{\psi_s}\right|\left|\vec{i}_s\right|\sin(\alpha_s - \rho_s) = \frac{3P}{2}\left|\overrightarrow{\psi_s}\right|\left|\vec{i}_s\right|\sin\alpha \qquad (3.33)$$

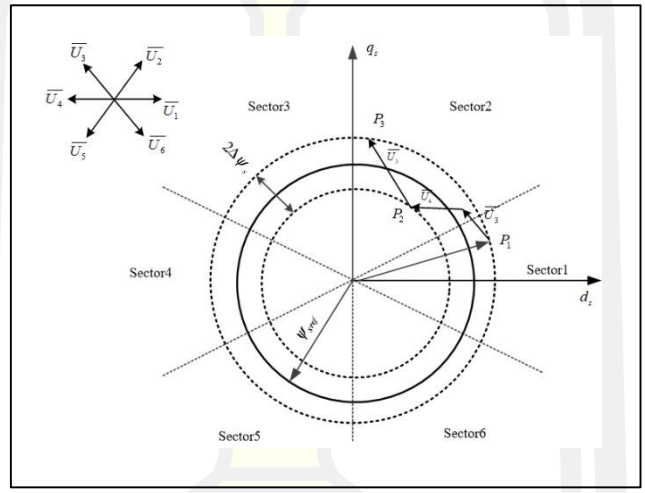
จากสมการสมการมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$\overrightarrow{v_s} = \vec{i}_s r_s + \frac{d}{dt}\overrightarrow{\psi_s} \qquad (3.34)$$

พิจารณาสมการที่ 3.34 โดยไม่คิดวชค่าความต้านทานสเตเตอร์ $r_s = 0$ จะได้ว่า $\frac{d}{dt}\overrightarrow{\psi_s} = \overrightarrow{v_s}$ ซึ่งจะเห็นว่าเวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์จะแปรผันตรงตามเวกเตอร์ของฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์ ดังนั้นทางเดินของของฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์สามารถเลือกได้จากการเลือกเวกเตอร์แรงดัน ซึ่งสามารถหาเวกเตอร์ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์ได้ดังนี้

$$\overrightarrow{\psi_s}(t) = \int_{t_0}^{t_n}\left(\overrightarrow{v_s}\right)dt \qquad (3.35)$$

ดังนั้นการหมุนของเวกเตอร์ของฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์ $\left(\overrightarrow{\psi_s}\right)$ จะอยู่ในทิศทางเดียวกับเวกเตอร์แรงดันที่ความเร็วรอบค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นไปตามสัดส่วนของขนาดเวกเตอร์แรงดัน การเลือกเวกเตอร์แรงดันที่ต้องการจะทำให้ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์หมุนไปตามที่ต้องการ ดังนั้นการเลือกเวกเตอร์แรงดัน คือการควบคุมฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์ $\left(\overrightarrow{\psi_s}(t)\right)$ โดยตรง



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**41 การควบคุมฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส

จากภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**41 ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์จะหมุนไปในทิศทางตามการเลือกเวกเตอร์แรงดัน ดังนั้นถ้าต้องการลดขนาดของฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์ต้องเลือกเวกเตอร์แรงดันที่ทำให้ลดขนาดฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์ หรือในทางกลับกันถ้าต้องการเพิ่มขนาดของฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์ต้องเลือกเวกเตอร์แรงดันที่ทำให้เพิ่มขนาดฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์ จากภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**41 แถบฮีสเตอรีซีสมีขนาด $2\Delta\psi_s$ ทางเดินของเวกเตอร์ฟลักซ์จะถูกแบ่งตามอินเวอร์เตอร์เนื่องจากอินเวอร์เตอร์แบ่งได้ 6 เวกเตอร์แรงดัน ดังนั้นจำนวนของเซกเตอร์ที่ต้องการอย่างน้อย 6 เซกเตอร์

ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**41 ถ้าตำแหน่งเริ่มต้นของเวกเตอร์ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์อยู่ที่จุด P_0 คือขอบบนของแถบฮีสเตอรีซีส $(\overrightarrow{\psi}_{sref}+\Delta\psi_s)$ ในเซกเตอร์ที่ 1 และฟลักซ์เชื่อมโยงสเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาดังนั้นต้องการลดขนาดของฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์ ต้องเลือกเวกเตอร์แรงดันที่ทำให้ขนาดของฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์ลดลง คือเวกเตอร์แรงดัน $\overline{U_3}(010)$ ดังนั้นฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์จะเคลื่อนที่จากจุด P_0 ไปยัง P_1 ซึ่งอยู่ใน

เซกเตอร์ที่ 2 ในทางตรงกันข้ามถ้าต้องการให้ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์เคลื่อนที่หมุนตามเข็มนาฬิกา ต้องเลือกเวกเตอร์แรงดัน $\overline{U_5}(001)$ ที่ทำให้ขนาดของลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์ลดลงและทิศทางตามเข็มนาฬิกา จากตำแหน่ง P_1 ถ้าต้องการลดขนาดของฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์และหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ต้องเลือกเวกเตอร์แรงดัน $\overline{U_4}(011)$ ทำให้ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์เคลื่อนที่จากจุด P_1 ไปยัง P_2 ซึ่งอยู่ขอบล่างของแถบฮีสเตอรีซีส ($\vec{\psi}_{sref} - \Delta\psi_s$) และอยู่ในเซกเตอร์ที่ 2 จากตำแหน่ง P_1 ถ้าต้องการให้ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์เคลื่อนที่หมุนตามเข็มนาฬิกาต้องเลือกเวกเตอร์แรงดัน $\overline{U_6}(101)$ เพื่อที่จะลดขนาดของเชื่อมโยงสเตเตอร์และเคลื่อนที่จากจุด P_1 ไปยัง P_0 และถ้าต้องการหยุดการหมุนของเวกเตอร์สเตเตอร์ฟลักซ์ เวกเตอร์แรงดันที่ต้องเลือกคือ $\overline{U_0}(000)$ หรือ $\overline{U_7}(111)$ อย่างใดอย่างหนึ่ง ถ้าให้ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์อยู่ที่ตำแหน่ง P_1 จะเลือกเวกเตอร์แรงดัน $\overline{U_0}(000)$ เพราะมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสวิตช์หนึ่งตำแหน่งจาก $\overline{U_3}(010)$ ไปเป็น $\overline{U_0}(000)$ น้อยกว่าการเลือก $\overline{U_7}(111)$ เพราะมีการเปลี่ยนตำแหน่งสวิตช์สองตำแหน่ง

จากที่กล่าวมาข้างต้นการหมุนฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงบิด ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดไม่ว่าจะเป็นทิศตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาและฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์หมุนในทิศทางตามต้องการ เช่น ที่จุด P_1 ต้องการลดฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์และเพิ่มแรงบิด เวกเตอร์แรงดันที่ถูกเลือกคือ เวกเตอร์แรงดัน $\overline{U_4}(011)$ ทำให้ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์เคลื่อนที่จากจุด P_1 ไปยัง P_2 ซึ่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 2 ถ้าต้องการเพิ่มฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์และต้องการลดแรงบิด เวกเตอร์แรงดันที่ถูกเลือกคือ เวกเตอร์แรงดัน $\overline{U_1}(100)$ เพื่อที่จะหมุนเวกเตอร์ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาและเพื่อเพิ่มฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์ และถ้าเวกเตอร์ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์อยู่ที่เซกเตอร์ที่2 ต้องการลดฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์และลดแรงบิด เวกเตอร์แรงดันที่ถูกเลือกคือ เวกเตอร์แรงดัน $\overline{U_6}(101)$

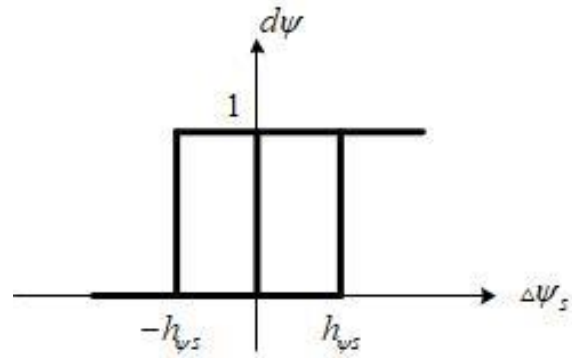
จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นการเลือกเวกเตอร์แรงดันที่จะถูกเลือกเพื่อเพิ่มหรือลดฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์และแรงบิด โดยทั่วไปแล้วถ้าต้องการเพิ่มแรงบิดเวกเตอร์แรงดันจะถูกเลือกเพื่อควบคุมแรงบิดให้เพิ่มขึ้นนำหน้าเวกเตอร์ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์ในทิศทางการหมุน และถ้าต้องการลดแรงบิดเวกเตอร์แรงดันจะถูกเลือกในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงบิดถ้าต้องการแรงบิดเท่ากับศูนย์ เวกเตอร์แรงดันที่ถูกเลือกคือ $\overline{U_0}(000)$ หรือ $\overline{U_7}(111)$ จากที่กล่าววิธีการเลือกเวกเตอร์แรงดันของการควบคุม สามารถเลือกเวกเตอร์แรงดันสำหรับการควบคุมแรงบิดโดยตรงได้ดังตาราง 5

ตาราง 5 การเลือกสวิตช์เวกเตอร์แรงดัน

		θ_s					
$d\psi$	dT_e	1	2	3	4	5	6

1	1	V2	V3	V4	V5	V6	V1
	0	V7	V0	V7	V0	V7	V0
	-1	V6	V1	V2	V3	V4	V5
0	1	V3	V4	V5	V6	V1	V2
	0	V0	V7	V0	V7	V0	V7
	-1	V5	V6	V1	V2	V3	V4

จากตารางที่ 3.4 เป็นการเลือกเวกเตอร์แรงดันโดยใช้ข้อมูล ค่าความผิดพลาดของสเตเตอร์ฟลักซ์ ($d\psi$) ค่าความผิดพลาดของแรงบิด (dT_e) และตำแหน่งของเซกเตอร์ ในส่วนการควบคุมขนาดของเวกเตอร์ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์ได้ใช้ฮิสเตอรีซีส 2 ระดับ ซึ่งกำหนดดังนี้

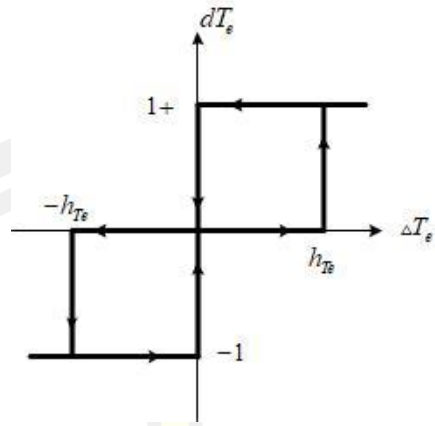


$d\psi = 1$ ถ้า $\Delta\psi_s > h_{\psi s}$

$d\psi = 0$ ถ้า $\Delta\psi_s \le h_{\psi s}$

จาก $d\psi = 1$ ขนาดของเวกเตอร์ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์อยู่ที่ขอบล่างของแถบฮิตเตอรีซีส ซึ่งจะต้องทำการเพิ่มขนาดของเวกเตอร์ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์ และ $d\psi = 0$ ขนาดของเวกเตอร์ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์อยู่ที่ขอบบนของแถบฮิตเตอรีซีส ซึ่งจะต้องทำการลดขนาดของเวกเตอร์ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์

ในส่วนของการควบคุมแรงบิดได้ใช้ฮิสเตอรีซีส 3 ระดับ ถ้าต้องการเพิ่มแรงบิดให้ $dT_e = 1$ ถ้าต้องการลดแรงบิดให้ $dT_e = -1$ และถ้าไม่ต้องการให้แรงบิดเปลี่ยนแปลงให้ $dT_e = 0$ ซึ่งกำหนดได้ดังนี้



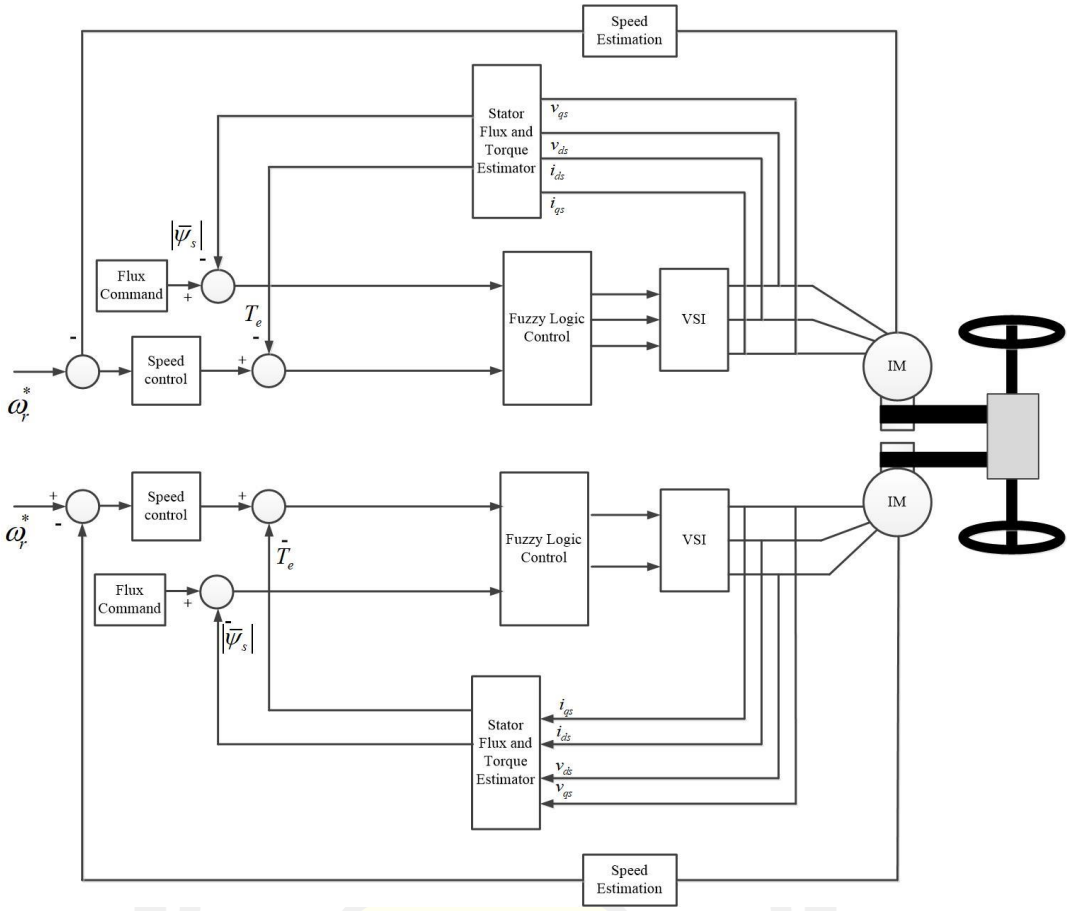
$dT_e = 1$ ถ้า $\Delta T_e > h_{Te}$

$dT_e = 0$ ถ้า $-h_{Te} \le \Delta T_e \ge h_{Te}$

$dT_e = 1$ ถ้า $\Delta T_e < -h_{Te}$

3.3 การออกแบบการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่แบบควบคุมแรงบิดโดยตรงควบคุมด้วยฟัซซี่ลอจิก

จากการออกแบบการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสโดยใช้การควบคุมแบบแรงบิดดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอการออกแบบการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฟัซซี่ลอจิกสำหรับระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ โครงสร้างของระบบควบคุมของการขับของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกแสดงดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**42



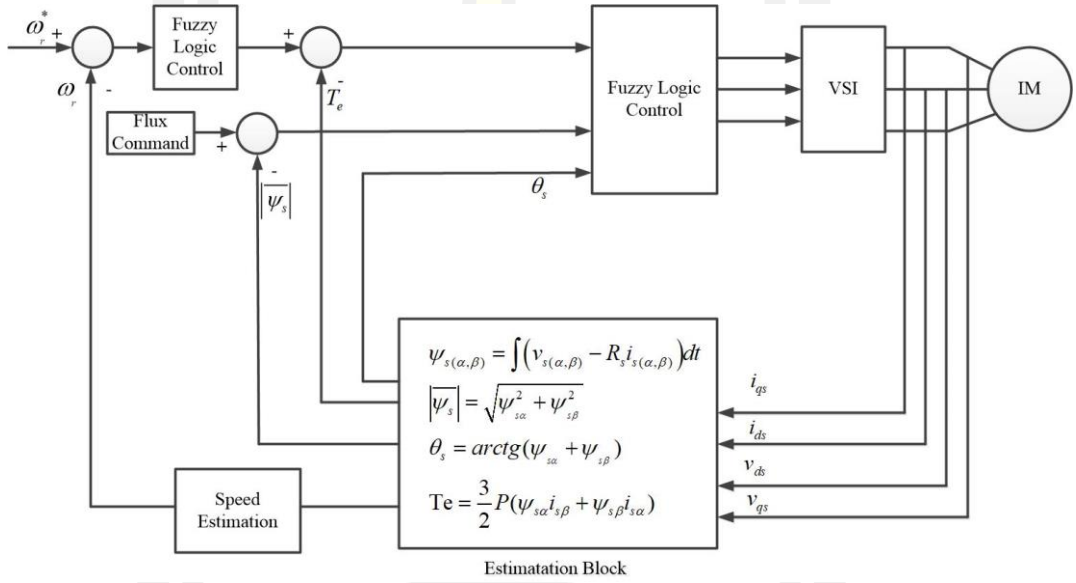
ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**42 โครงสร้างของระบบควบคุมของการขับของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่
ด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก

3.3.1 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสแบบควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฟัซซีลอจิก [54]

ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกสำหรับระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่นั้น จะออกแบบในทำนองเดียวกับการออกแบบการควบคุมแรงบิดโดยตรงวิธีดั้งเดิม ทำได้โดยการเลือกเวกเตอร์แรงดันจากอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์และแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามโดยจะใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีมาประมวลผลการตัดสินใจในการเลือกเวกเตอร์แรงดัน โครงสร้างการควบคุมแรงบิดโดยตรงควบคุมด้วยฟัซซี่ลอจิกดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**43 การควบคุมแรงบิดโดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสโดยค่าผิดพลาดของฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์ ค่าผิดพลาดของแรงบิดและข้อมูลตำแหน่งเซกเตอร์ของสเปซเวกเตอร์ฟลักซ์เชื่อมโยงสเตเตอร์จะเป็น

อินพุตให้กับตัวควบคุมฟัซซีจากนั้นตัวควบคุมจะทำการดิฟัซซิฟิเคชันเพื่อประมวลผลในการเลือกรูปแบบการสวิตซ์ของเวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์

การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกสำหรับระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ ได้ออกแบบให้ตัวควบคุมมี 3 อินพุต 1 เอาต์พุต ตัวแปรเงื่อนไขในส่วนของอินพุตประกอบไปด้วย ความผิดพลาดของสเตเตอร์ฟลักซ์ $(e\psi)$ ค่าความผิดพลาดของแรงบิด (eT_e) และตำแหน่งเซกเตอร์ (θ) ตัวแปรเงื่อนไขในส่วนของเอาต์พุตคือ สถานะการสวิตซ์เวกเตอร์แรงดัน (U) แสดงค่าผิดพลาดดังสมการที่ 3.36 และ 3.37



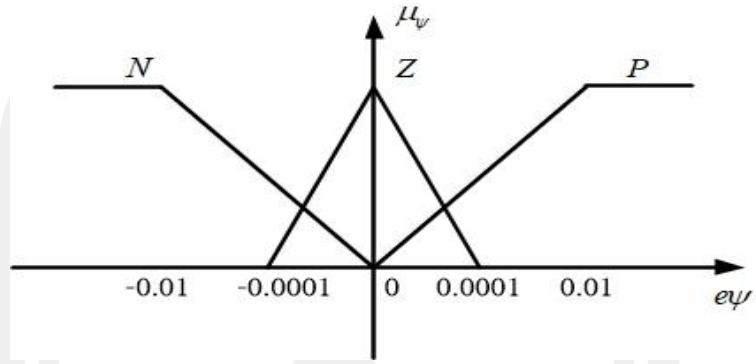
ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**43 โครงสร้างการควบคุมแรงบิดโดยตรงควบคุมด้วยฟัซซี่ลอจิก [54]

$$eT_e = T_e^* - T_e \quad (3.36)$$

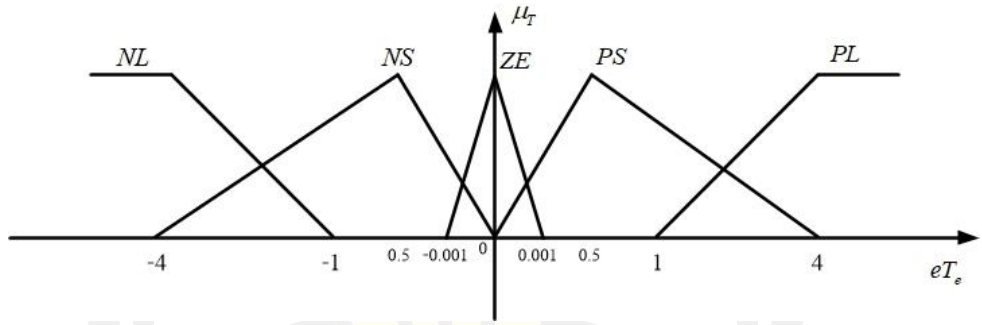
$$e\psi = e\psi^* - \psi \quad (3.37)$$

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความผิดพลาดของสเตเตอร์ฟลักซ์ $(e\psi)$ แสดงดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**44 โดยกำหนดให้เป็นรูป สามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมู ประกอบไปด้วย 3 ฟัซซี่เซตคือ N (Negative), Z (Zero) และ P (Positive) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความผิดพลาดของแรงบิด (eT_e) กำหนดให้เป็นรูป สามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมู ประกอบไปด้วย 5 ฟัซซี่ คือ NL (Negative large), NS (Negative Small), ZE (Zero), PS (Positive Small) และ PL (Positive large) แสดงดังภาพประกอบ Error**! No text of specified**

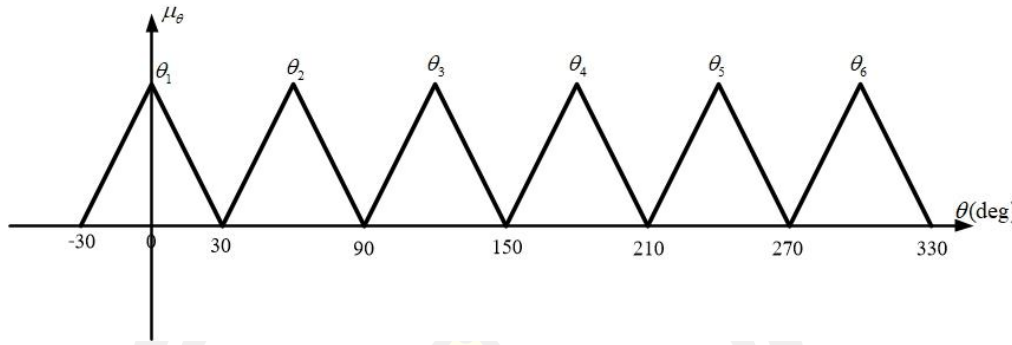
style in document.45 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกตำแหน่งเซกเตอร์ (θ) กำหนดให้เป็นรูปสามเหลี่ยม ประกอบไปด้วย 6 ฟัซซี่ คือ $\theta_1 - \theta_6$ ดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**46



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**44 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความผิดพลาดของสเตเตอร์ฟลักซ์ $(e\psi)$

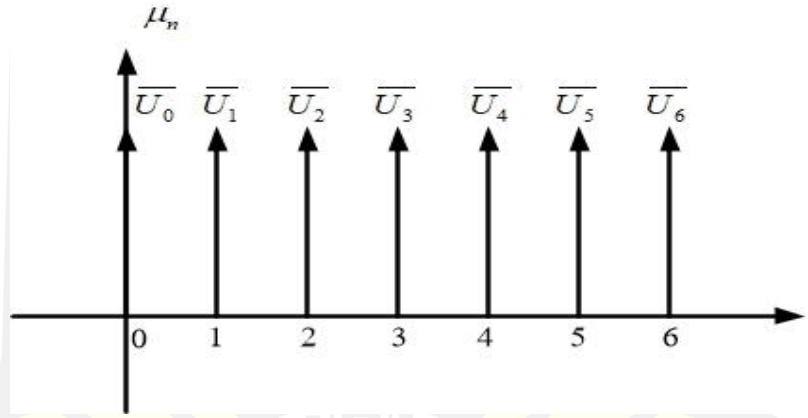


ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**45 ความผิดพลาดของแรงบิด (eT_e)



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**46 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกตำแหน่งเซกเตอร์ (θ)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในส่วนของเอาต์พุต u_n คือ สภาวะการสวิตช์เวกเตอร์แรงดัน (U) กำหนดให้มี 7 ฟัซซีเซต ซึ่งกำหนดตามสภาวะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์สามเฟส คือ $\overline{U_0}$ $\overline{U_1}$ $\overline{U_2}$ $\overline{U_3}$ $\overline{U_4}$ $\overline{U_5}$ และ $\overline{U_6}$ ดังภาพประกอบที่ 47 ซึ่งสามารถกำหนดกฎฟัซซีได้ดังตาราง 6



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**47 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในส่วนของเอาต์พุตของลูปการการควบคุมควบคุมฟลักซ์และแรงบิด

ตาราง 6 กฎฟัซซีของลูปการควบคุมแรงบิดและฟลักซ์

eT_e	$e\psi$	θ					
		θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
PL	P	V2	V3	V4	V5	V6	V1
	Z	V2	V3	V4	V5	V6	V1

	N	V3	V4	V5	V6	V1	V2
PS	P	V2	V3	V4	V5	V6	V1
	Z	V2	V3	V4	V5	V6	V1
	N	V3	V4	V5	V6	V1	V2
ZE	P	V0	V0	V0	V0	V0	V0
	Z	V0	V0	V0	V0	V0	V0
	N	V0	V0	V0	V0	V0	V0
NS	P	V6	V1	V2	V3	V4	V5
	Z	V1	V2	V3	V4	V5	V6
	N	V5	V6	V1	V2	V3	V4
NL	P	V6	V1	V2	V3	V4	V5
	Z	V1	V2	V3	V4	V5	V6
	N	V5	V6	V1	V2	V3	V4

3.4 วิธีการทดสอบ

ในการออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบแรงบิดโดยตรงควบคุมความเร็วและแรงบิดด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก จะใช้ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบเพื่อมาทำการออกแบบกฎในการควบคุม เมื่อออกแบบระบบควบคุมแล้วเสร็จจะต้องทดสอบเปรียบเทียบสมมรรถนะของตัวควบคุม ดังมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

3.4.1 ทดสอบคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส

ทดสอบสมรรถนะของระบบโดยการจำลองผลตามสภาวะต่างๆ ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบระบบควบคุมให้กับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ ทดสอบคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส โดยการทดสอบวัดค่า ความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 เพื่อออกแบบกฎการควบคุมฟัซซี่ลอกจิก ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกนั้น จะต้องออกแบบโดยดูจากพฤติกรรมของระบบ ซึ่งในการควบคุมแรงบิดและความเร็วนั้น ข้อมูลอินพุต คือ ความผิดพลาดของสเตเตอร์ฟลักซ์ $(e\psi)$ ค่าความความผิดพลาดของแรงบิด (eT_e) และตำแหน่งเซกเตอร์ (θ) เอาต์พุตคือ สภาวะการสวิตช์เวกเตอร์แรงดัน (U) การควบคุมความเร็วรอบ ข้อมูลอินพุต คือความผิดพลาดของความเร็วรอบของมอเตอร์ $(e\omega_r)$ และค่าปริมาณความคลาดเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบของมอเตอร์ $(\Delta e_{\omega r})$ และเอาต์พุตคือ สัญญาณสัญญาณเอาต์พุต

(Δu) ทดสอบคุณสมบัติของมอเตอร์เมื่อยังไม่มีตัวควบคุมโดยการวัดค่า แรงบิด ความเร็ว กระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้าในสภาวะต่าง ๆ

3.4.2 ทดสอบคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่

จำลองสภาวะการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่แบบควบคุมแรงบิดโดยตรง ตามสภาวะต่างๆ ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบ โดยทำการวัดค่าแรงบิด ความเร็ว กระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้า ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่

3.4.3 ทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก

จำลองสภาวะการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่แบบควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก ตามสภาวะต่างๆ ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบ โดยทำการวัดค่าแรงบิด ความเร็ว กระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้า ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่

3.5 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาประมาประยุกต์ใช้ออกแบบและพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบแรงบิดโดยตรง (Direct Torque Control, DTC) ควบคุมความเร็วและแรงบิดด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิกนั้น เพื่อให้ได้งานออกมาตามขอบเขตที่กำหนดไว้ ผู้วิจัยได้นำเสนออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

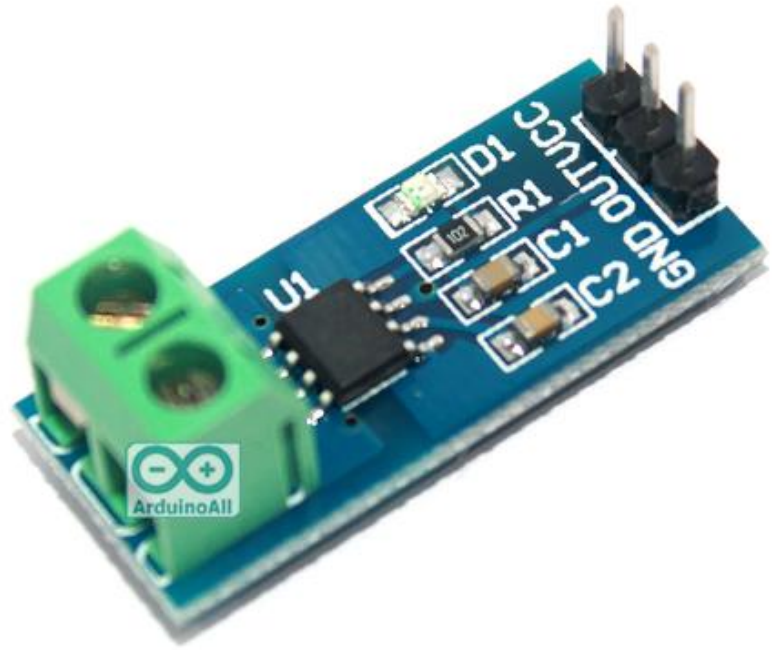
3.5.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส

จากการออกแบบ จะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส ขนาด 1 แรงม้า 4 ขั้ว จำนวน 2 ตัว กำลังไฟฟ้ารวม 1.5 kW 220/380 50Hz 1500 rpm มีลักษณะดังแสดงในภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**48

ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**48 มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส [57]

3.5.2 เซ็นเซอร์วัดกระแส (current sensor)

เซ็นเซอร์วัดกระแสคือ เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า อาศัยหลักการวัดความเหนี่ยวนำของแม่เหล็กที่แปรผันกับกระแสไฟฟ้า ให้เอาต์พุตออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เซ็นเซอร์วัดกระแสรุ่น ACS712-20A ซึ่งสามารถวัดกระแสได้ช่วง -20A ถึง 20A เอาต์พุต ที่ค่าความละเอียด 100mV/A เอาต์พุตมีคลาดเคลื่อนประมาณ 1.5%



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**49 เซ็นเซอร์วัดกระแสเบอร์ ACS712-20A [58]

3.5.3 มัลติมิเตอร์ดิจิทัล (Digital Multimeters)

มัลติมิเตอร์ดิจิทัล (Digital Multimeters) คือ เครื่องวัดไฟฟ้าที่สามารถวัดปริมาณไฟฟ้าได้หลาย ๆ ค่าตัวแปร หรือ เป็นเครื่องวัดอเนกประสงค์ เช่น สามารถวัดกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความต้านทาน แบตเตอรี่ ไดโอด อุณหภูมิ (วัดด้วยหัววัดอุณหภูมิ) และวัด ความต่อเนื่อง ได้จากเครื่องมือวัดเพียงเครื่องเดียว และแสดงค่าที่วัดได้ด้วยระบบดิจิทัล เครื่องมือวัดลักษณะนี้จึง เรียกว่า มัลติมิเตอร์ดิจิทัล ในงานวิจัยนี้ได้ใช้มัลติมิเตอร์ดิจิทัลรุ่น UNI-T UT52 โดยมีรายละเอียดการวัดดังนี้

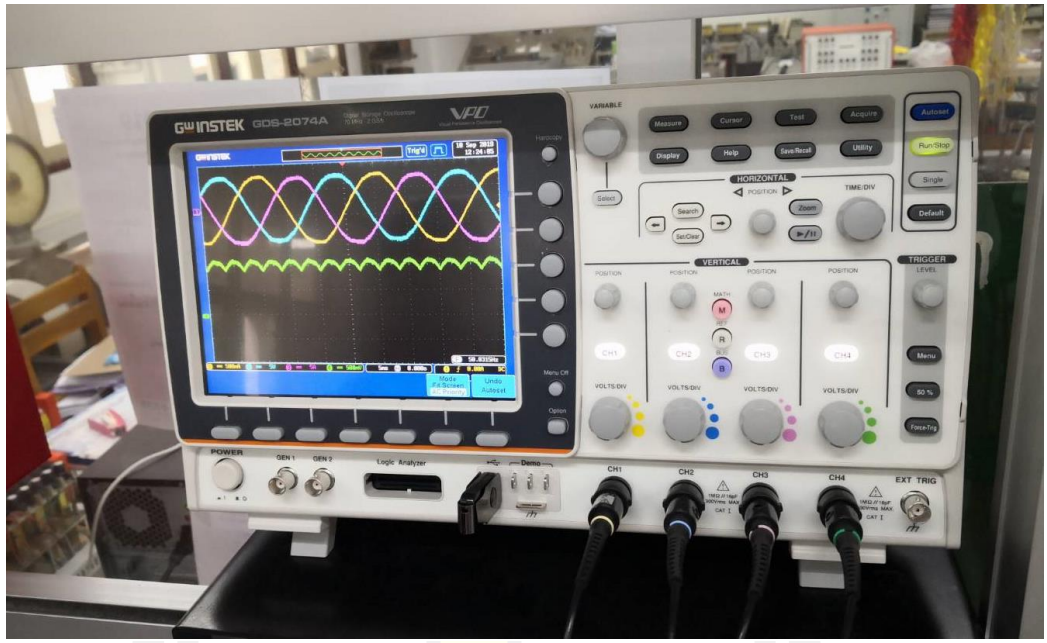
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	200mV /2V /20V /200V /1000V ± (0.5% + 1)
กระแสไฟฟ้าตรง	2mA /20mA /200mA /20A ± (0.8% + 1)
แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	200mV /2V /20V /200V /750V± (0.8% + 3)
กระแสไฟฟ้ากระแสสลับ	2mA /20mA /200mA /20A ± (1% + 3)
ความต้านทาน	200 Ω /2 $k\Omega$ /20 $k\Omega$ /200 $k\Omega$ /2 $M\Omega$ /20 $M\Omega$ /200 $M\Omega$ ± (0.8% + 1)
ตัวเก็บประจุ	2 nF /20 nF /200 nF /2 μF /20 μF

ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**50 มัลติมิเตอร์ดิจิทัล (Digital Multimeter) [59]

3.5.4 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

ออสซิลโลสโคป คือ เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่สามารถวัดรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า ชนิดต่างๆ ได้และแสดงเป็นรูปกราฟ ขนาด (Amplitude) และเวลา (Time) บนหน้าจอน งานวิจัยนี้ได้ใช้ออสซิลโลสโคป รุ่น GDS-2074A ยี่ห้อ GWINSTEK โดยมีรายละเอียดการวัดดังนี้

- ความถี่ใช้งาน 70 MHz ช่องสัญญาณ แบบ 4 ช่องสัญญาณ
- แนวแกนนอน ขอบเขตอยู่ระหว่าง 1ns/div ~ 100s/div (แบบ Step 1-2-5)
- แนวแกนตั้ง ช่วงเวลาขอบขาขึ้น 5nS ความไวในการแสดงผลทางแนวแกนตั้งอยู่ระหว่าง 1mV/div~10V/div
- อัตราการสุ่มสัญญาณแบบ Real Time 2GSa/s. และแบบ Equivalent Time 100GSa

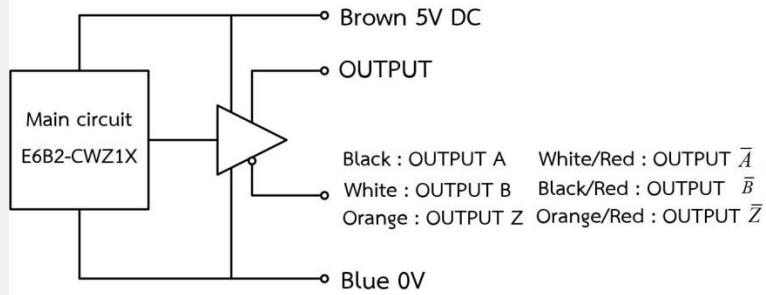


ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**51 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) [60]

3.4.5 อุปกรณ์เข้ารหัส (หรือ เอ็นโคดเดอร์) รุ่น E6B2-CWZ1X

เป็นเครื่องมือวัดที่สามารถบอกความเร็วและตำแหน่งของการหมุน ส่วนมากใช้ตัวตรวจวัดแบบแสงซึ่งสัญญาณจะออกมาในรูปของสัญญาณพัลส์ (Pulse) ที่สามารถนำไปประมาณผลเป็นความเร็วรอบและตำแหน่งได้ เอ็นโคดเดอร์ที่ใช้ในงานวิจัยของ OMRON รุ่น E6B2-CWZ1X ดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**53 โดยโครงสร้างภายในแสดง ดังภาพประกอบที่ 3.24 มีคุณสมบัติการการใช้งาน แหล่งจ่าย 5VDC จำนวนพัลส์ 1000 พัลส์ต่อหนึ่งรอบ สัญญาณเอาต์พุต A B และ Z ความถี่ที่ตอบสนองได้สูงสุด 100kHz วัดความเร็วสูงสุดได้ 6000 รอบต่อนาที โดยหลักการทำงานจะให้เอาต์พุตออกมาเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นสัญญาณช่อง A และช่อง B ซึ่งจะสมารถบอกได้ว่ามอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาหรือหมุนทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งเอาต์พุตจะออกมามีเฟสต่างกัน 90 องศา

ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**52 เอ็นโคดเตอร์ OMRON รุ่น E6B2-CWZ1X



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**53 โครงสร้างภายในของเอ็นโคดเตอร์ OMRON รุ่น E6B2-CWZ1X

3.5.6 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน รุ่น MIKROE-3126

เป็นเครื่องมือในการแปลงความถี่ซึ่งเป็นเอาต์พุตจากเอ็นโคดเดอร์แปลงให้เป็นแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้ตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยได้ใช้วงจร MIKROE-3126 ดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**54ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**54 คุณสมบัติการการใช้งาน ความถี่ที่ตอบสนอง 200Hz ถึง 120kHz โดยแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0V ถึง 3V

ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**54 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน รุ่น MIKROE-3126

3.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

เมื่อได้ทดสอบสมรรถนะของระบบจากการจำลองสภาวะการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่แบบควบคุมแรงบิดโดยตรง และการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่แบบควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก ในสภาวะต่าง ๆ แล้ว

ทำการเก็บรวมรวบข้อมูลที่ได้ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ แรงบิด ความเร็ว กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ ด้วยวิธีการควบคุมแต่ละแบบ จากนั้นเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์สมรรถนะของชุดควบคุมความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ที่ได้ออกแบบ และสรุปผลการทดสอบต่อไป

พหูน ปณฺ ฑิโต ชีเว

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปราย

สำหรับรายละเอียดในบทนี้จะแสดงถึงลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งหลังจากที่ได้วิธีดำเนินการวิจัยแล้วตามขั้นตอนการออกแบบการควบคุมแรงบิดและความเร็วด้วยฟัซซีลอจิกสำหรับการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่เพื่อวัดสมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสำหรับการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ โดยผลการทดสอบจะได้กล่าวและวิเคราะห์ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การจำลองผลของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่

ในการสร้างแบบจำลองของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่นั้น จะทำการสร้างแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวไฟฟ้าสามเฟสก่อนเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ 3.17-3.24 ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยจะทำการจำลองโดยใช้ สมการ 3.17-3.24 เทียบกับ ต้องโดยเทียบกับชุดบล็อกของมอเตอร์ใน SPS ของ MATLAB

4.1.1 การจำลองผลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

จากสมการที่ 3.17-3.24 จัดรูปสมการใหม่เพื่อคำนวณค่ากระแสที่ขดลวดสเตอร์และค่าฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดโรเตอร์ได้ดังสมการ 4.1-4.4 เพื่อนำไปสร้างแบบจำลองใน Simulink เพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ [61] เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบตัวควบคุมแรงบิดและความเร็วต่อไป

$$i_{\alpha s} = \frac{1}{\sigma L_r' L_s} \int \left(L_r' v_{\alpha s} - \left(L_r' R_s + \frac{L_m^2 R_r'}{L_r'} \right) i_{\alpha s} + \frac{L_m R_r'}{L_r'} \psi_{\alpha s}' + L_m \omega_r \psi_{\beta r}' \right) dt \qquad (4.1)$$

$$i_{\beta s} = \frac{1}{\sigma L_r' L_s} \int \left(L_r' v_{\beta s} - \left(L_r' R_s + \frac{L_m^2 R_r'}{L_r'} \right) i_{\beta s} + \frac{L_m R_r'}{L_r'} \psi_{\beta s}' - L_m \omega_r \psi_{\alpha r}' \right) dt \qquad (4.2)$$

$$\psi_{\alpha r}' = \int \left(\frac{L_m R_r'}{L_r'} i_{\alpha s} - \frac{R_r'}{L_r'} \psi_{\alpha r}' - \omega_r \psi_{\beta r}' \right) dt \qquad (4.3)$$

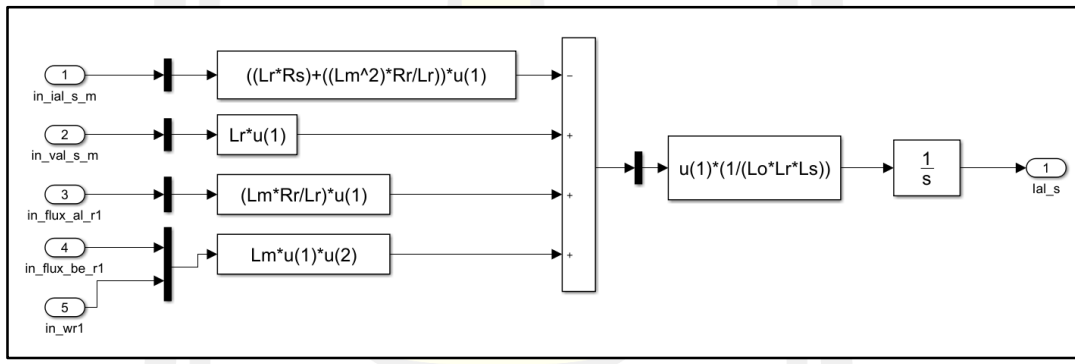
$$\psi'_{\beta r} = \int \left(\frac{L_m R'_r}{L'_r} i_{\beta s} - \frac{R'_r}{L'_r} \psi'_{\beta r} + \omega_r \psi'_{\alpha r} \right) dt \tag{4.4}$$

โดยที่

$$L_s = L_{ls} + L_m$$

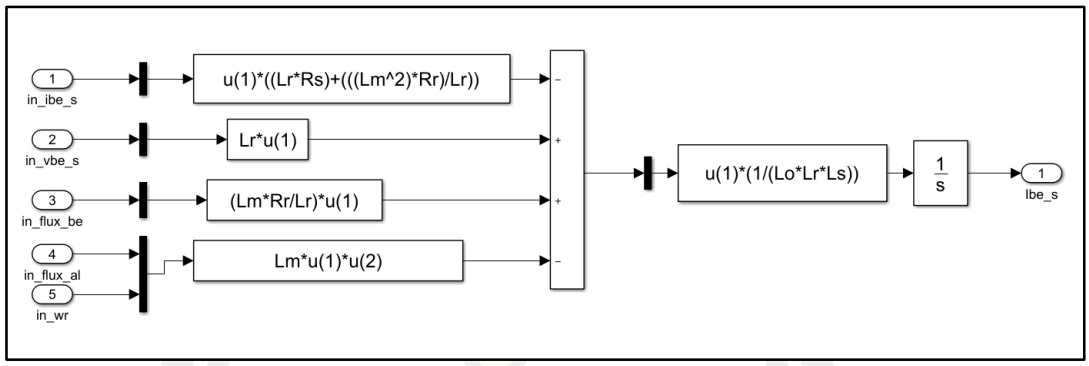
$$L'_r = L'_{lr} + L_m$$

จากสมการที่ 4.1 กระแสที่ขดลวดสเตเตอร์บนแกน α นำมาสร้างเป็นชุดบล็อกใน Simulink เพื่อจำลองผล ดังภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.55 [61]



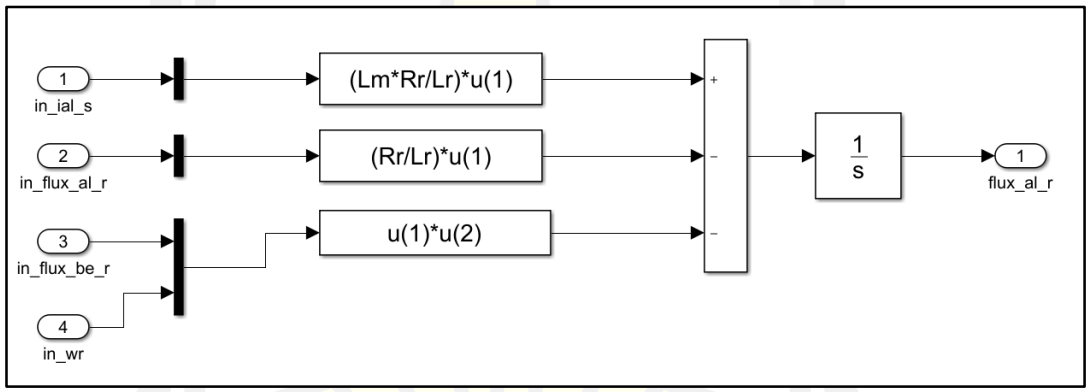
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.55 กระแสที่สเตเตอร์บนแกน α

จากสมการที่ 4.2 กระแสที่ขดลวดสเตเตอร์บนแกน β นำมาสร้างเป็นชุดบล็อกใน Simulink เพื่อจำลองผล ดังภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.56 [61]



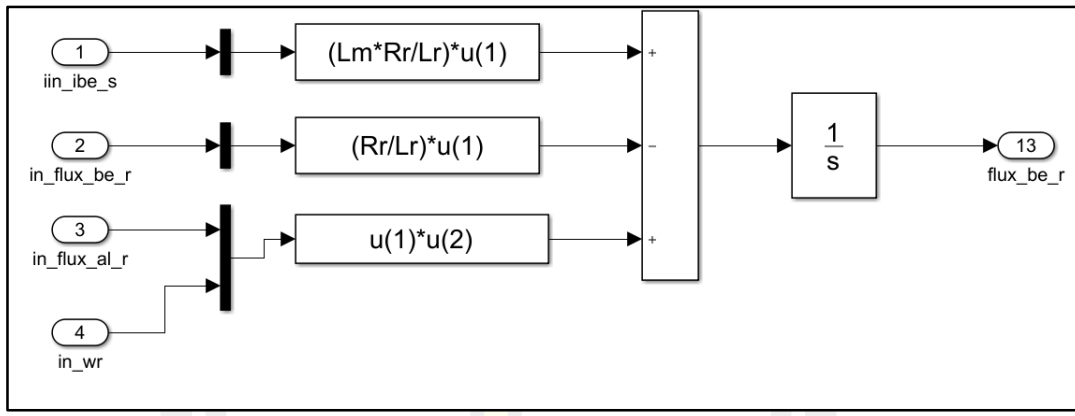
ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**56 กระแสที่สเตเตอร์บนแกน β

จากสมการที่ 4.3 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดโรเตอร์บนแกน α นำมาสร้างเป็นชุดบล๊อกใน Simulink เพื่อจำลองผล ดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**57 [61]



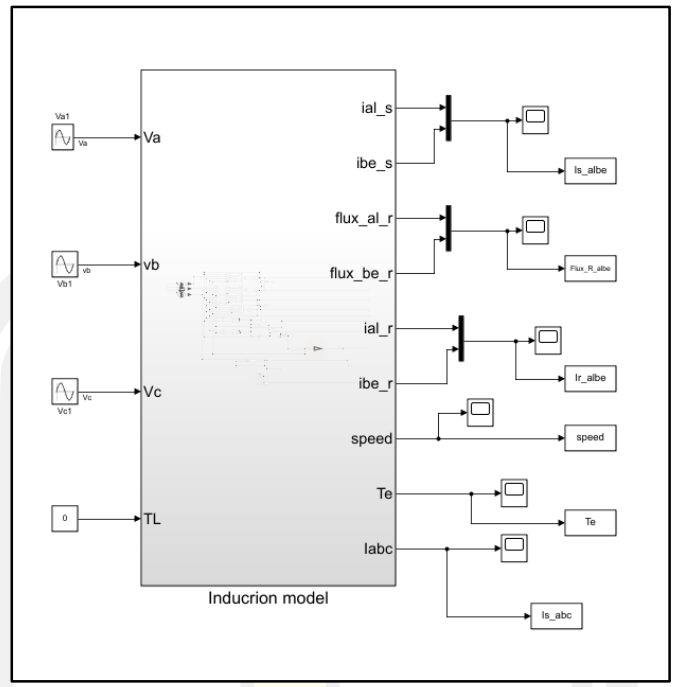
ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**57 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดโรเตอร์บนแกน α

จากสมการที่ 4.4 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดโรเตอ β นำมาสร้างเป็นชุดบล๊อกใน Simulink เพื่อจำลองผล ดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**58 [61]

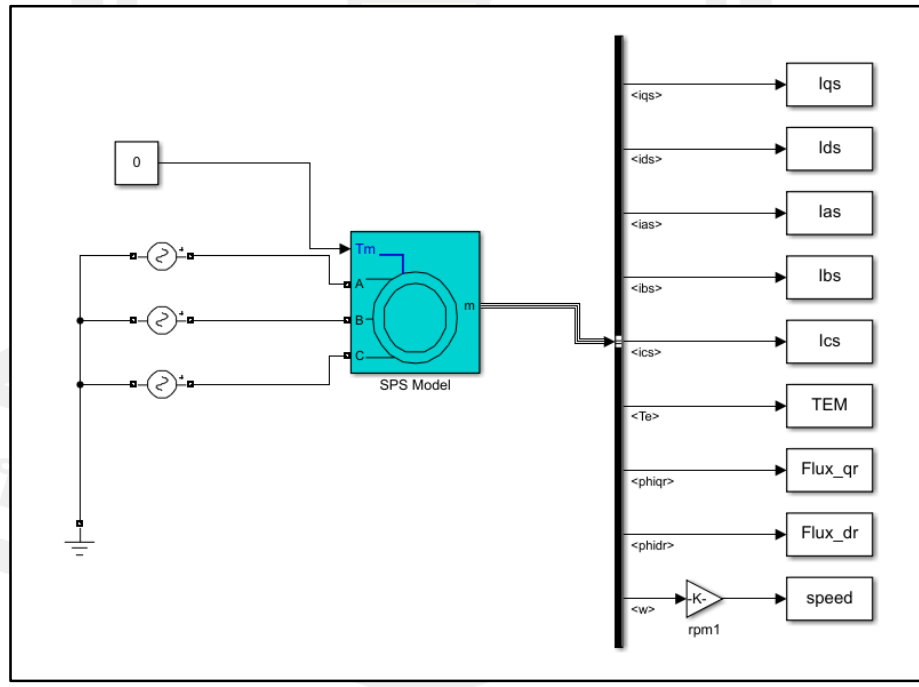


ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**58 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดโรเตอร์บนแกน β

จากภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**55-ภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**58 นำมาสร้างเป็นชุดบล็อกของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**59



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**59 ชุดบล็อกของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสบนแกน $\alpha\beta$



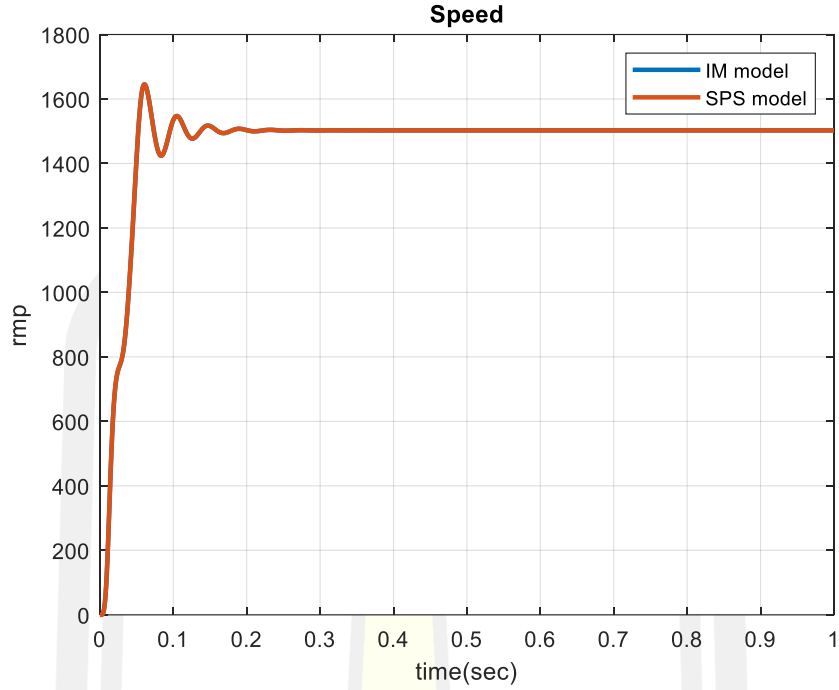
ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**60 ชุดบล็อกของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามจากโปรแกรม MATLAB (SPS model)

การสร้างแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ใน SIMULINK ตามสมการที่ 4.1-4.4 จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสบนโปรแกรม MATLAB บนชุดบล็อกใน Simulink ใน SPS ดังภาพประกอบ Error! **No text of specified style in document.**60 โดยใช้ตัวอย่างพารามิเตอร์ของมอเตอร์ใน MATLAB ขนาด 5แรงม้า เป็นตัวอย่างในการจำลองแสดงพารามิเตอร์ของมอเตอร์ดังตาราง 7

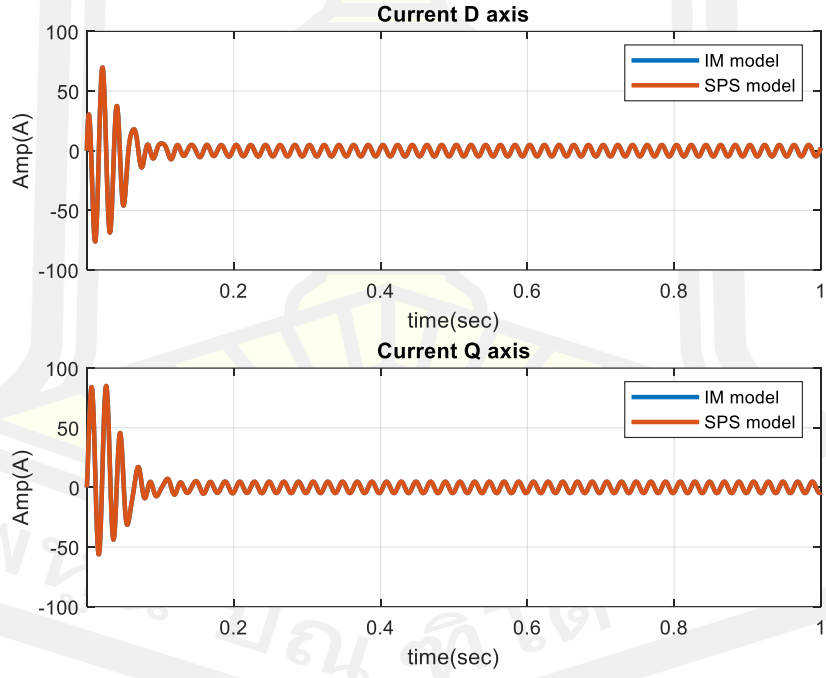
ทดสอบโดยจ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์ 380 VL-L 50 Hz เป็นเวลา 1 วินาที ผลการจำลองสภาวะแสดงดังภาพประกอบ Error! **No text of specified style in document.**61-ภาพประกอบ Error! **No text of specified style in document.**64 โดยภาพประกอบ Error! **No text of specified style in document.**61 แสดงค่าความเร็วเทียบกับเวลา ภาพประกอบ Error! **No text of specified style in document.**62 แสดงกระแสบนแกน $\alpha\beta$ ซึ่งเลือกการแกนหมุนหยุดนิ่ง ภาพประกอบ Error! **No text of specified style in document.**63 แสดงค่าแรงบิดทางไฟฟ้า ภาพประกอบ Error! **No text of specified style in document.**64 แสดงค่าฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดโรเตอร์ จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองของแบบจำลองทั้งสองเหมือนกัน

ตาราง 7 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์โดยใช้ตัวอย่างพารามิเตอร์ของมอเตอร์ใน MATLAB ขนาด 5 แรงม้า

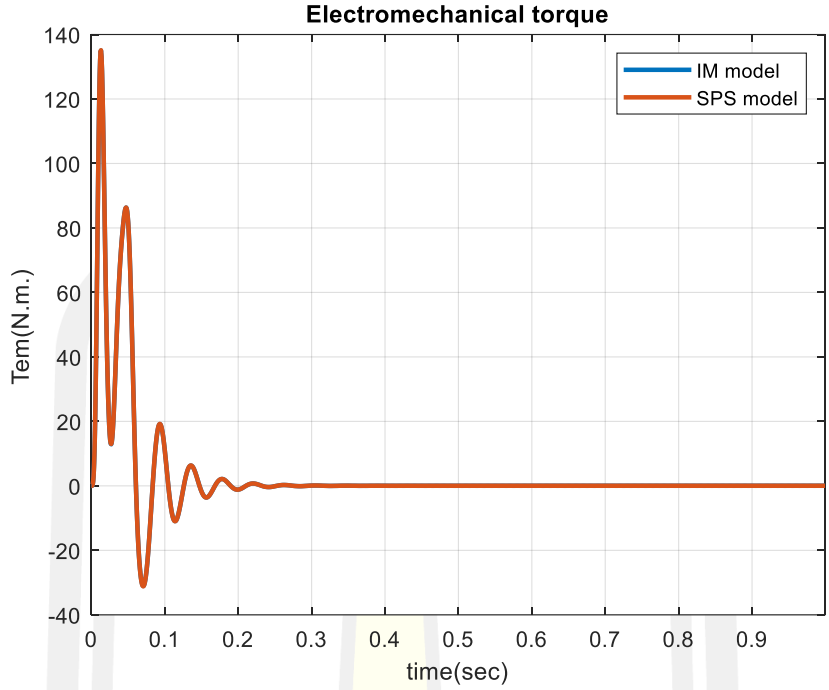
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
R_s	1.115	ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
R_r	1.083	ความต้านทานของขดลาดโรเตอร์
L_{ls}	0.005974	ความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์
L_{lr}	0.005974	ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์
L_m	0.2037	ความเหนี่ยวนำร่วม
J	0.02	โมเมนต์ความเฉื่อย
P	4	ขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า



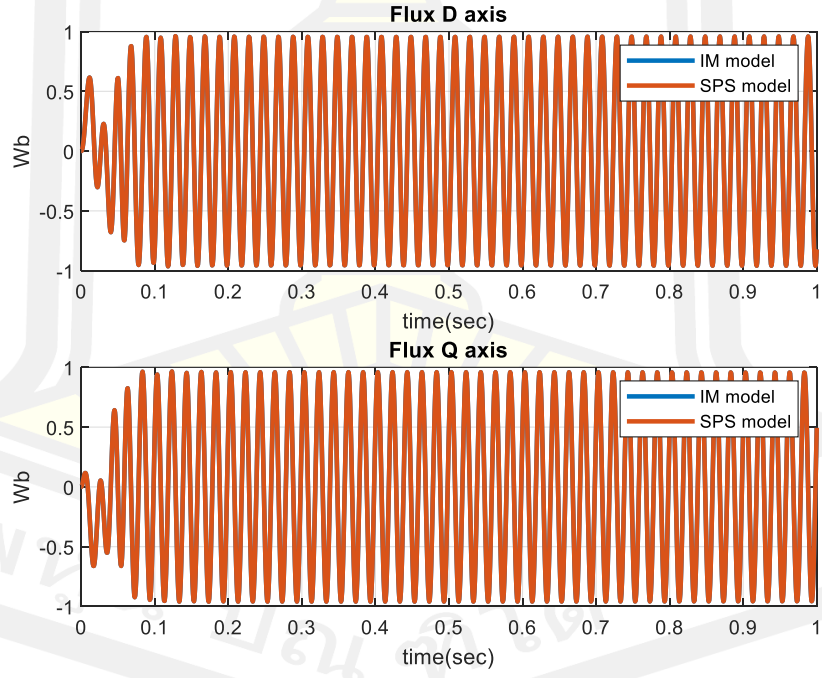
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.61 ค่าความเร็วเทียบกับเวลา



ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.62 กระแสของที่ขดลวดสเตเตอร์



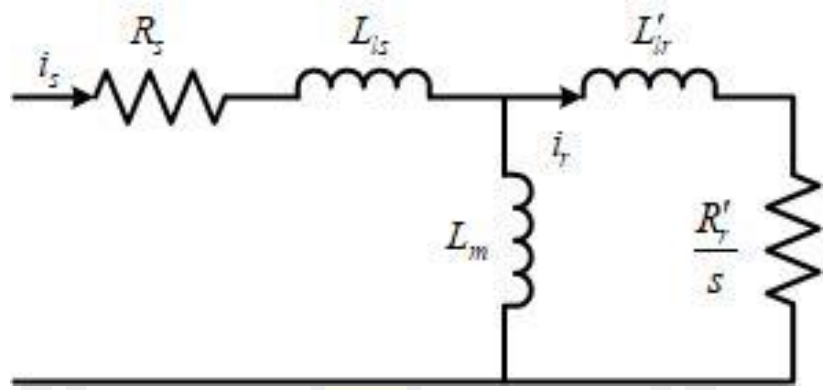
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.63 ค่า T_{em} เทียบกับเวลา



ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.64 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดโรเตอร์

4.1.2 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของการขับของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่

การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ของการขับของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ เนื่องจากการควบคุมมอเตอร์ความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์นั้นจะต้องใช้พารามิเตอร์ในการจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของการขับมอตอร์คู่ โดยจะทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสดังตาราง 8 ตามขั้นตอนดังนี้



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**65 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบแยกเฟส

ตาราง 8 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์

พารามิเตอร์	รายละเอียด	ค่า
R_s	ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์	
R_r	ความต้านทานของขดลาดโรเตอร์	
L_{ls}	ความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์	
L_{lr}	ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์	
L_m	ความเหนี่ยวนำร่วม	
J	โมเมนต์ความเฉื่อย	
P	ขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า	

1. การทดสอบกระแสตรงเรียกว่า โวลต์-แอมป์ (volt-amp method) หรือใช้มิเตอร์วัดค่าความต้านทานที่ขดลวดสเตเตอร์โดยตรง ในการทดสอบนี้จะใช้วิธีวัดค่าความต้านทานที่ขดลวดสเตเตอร์โดยตรง โดยการวัดค่าความต้านทานแต่ละเฟส ได้ผลการทดสอบดังตาราง 9

ตาราง 9 ค่าความต้าน

ขดลวด		ความต้านทาน (โอห์ม)
U		8.4
V		8.3
W		8.5

2. การทดสอบสภาวะไร้โหลด โดยต่อขดลวดของมอเตอร์แบบ Y จ่ายไฟให้กับมอเตอร์ 380VLL ได้ผลการทดสอบดังตาราง 10

ตาราง 10 ผลการทดสอบแบบไร้โหลด

$V_{s\phi}$	220.6
$I_{s\phi}$	0.968

จากการทดสอบสภาวะไร้โหลด $(s=0)$

$$Z_{nl} = \frac{V_{s\phi}}{I_{s\phi}} = X_{ls} + X_m \qquad (4.5)$$

เมื่อ $L_{ls} = \frac{X_{ls}}{2\pi f}$

$$L_M = \frac{X_M}{2\pi f}$$

$$Z_{nl} = \frac{220.6}{0.968} \approx X_{ls} + X_m = 227.27\ \Omega$$

ดังนั้นจะได้

$$L_{ls} + L_m = \frac{227.27}{2\pi f} = 0.725\,H$$

3. การทดสอบยึดโรเตอร์ (locked-rotor test) การทดสอบยึดโรเตอร์จะใช้วงจรเดียวกับการทอสอบที่สภาวะไร้โหลด จะทำการจ่ายไฟให้มอเตอร์ที่ค่าแรงดันต่าง ๆ โดยยึดไม่ให้โรเตอร์หมุน ผลการทดสอบดังตาราง 11

ตาราง 11 ผลการทดสอบแบบยึดโรเตอร์

ครั้งที่	1	2	3
$V_{s\phi}$	29.79	34.58	40.87
$I_{s\phi}$	0.998	1.214	1.501
PF	0.576	0.596	0.625
กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	51	75	115
R_{eq}	17.9	16.96	16.82
X_{eq}	24.49	22.87	21.25

จากการทดสอบสภาวะไร้โหลด $(s=1)$

$$R_{eq} = \frac{V_{s\phi}}{I_{s\phi}} cos\theta = R_s + R_r' \tag{4.6}$$

$$X_{eq} = \frac{V_{s\phi}}{I_{s\phi}} sin\theta = X_{ls} + X_{lr} \tag{4.7}$$

จะได้ค่า $R_r' = R_{eq} - R_s = 17.01 - 8.4 = 8.61\Omega$

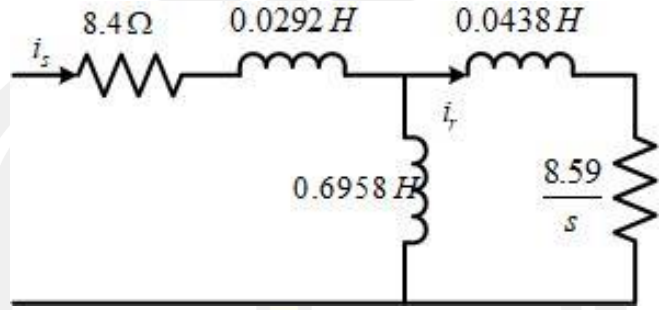
$$L_{eq} = \frac{X_{eq}}{2\pi f} = \frac{40.87}{1.501 \times 2\pi f} sin(51.31) = 0.067$$

เนื่องจากมอเตอร์เป็นแบบ คลาส B ดังนั้นจะได้

$L_{ls} = 0.4 \times 0.067 = 0.0268\,H$

$L_{lr} = 0.6 \times 0.067 = 0.0402\,H$

$$L_m = \frac{Xls + Xm}{2\pi f} - L_{ls} = \frac{V_{s\phi_Noload}}{I_{s\phi_Noload} \times 2\pi f} - L_{ls} = \frac{= 220.6}{0.968 \times 2\pi f} - 0.0268 = 0.6986H$$



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**66 แสดงค่าพารามิเตอร์ขอมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบแยกเฟส

ตาราง 12 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
R_s	8.4	ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
R_r	8.59	ความต้านทานของขดลาดโรเตอร์
L_{ls}	0.0292	ความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์
L_{lr}	0.0438	ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์
L_m	0.6958	ความเหนี่ยวนำร่วม
J		โมเมนต์ความเฉื่อย
P	4	ขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการทดสอบหาการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ (J) สามารถดูได้จากคู่มือการทำงาน หรือได้จากการทดสอบมอเตอร์โดยตรงซึ่งการทดสอบก็จะมีความซับซ้อน โดยวิธีทดสอบอาจจะทำการจากการจำลองการทำงานของมอเตอร์บนโปรแกรม MATLAB โดยสุ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยไปเรื่อยๆ จนได้ผลใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่ที่สุด หรืออาจจะใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดซึ่งจะเปรียบเทียบจากกราฟแสดงพลวัตของความเร็วมอเตอร์ ที่เปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง ดังนั้นผลการทดสอบจริงเพื่อค่าค่าในการทดสอบหาการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์จึง

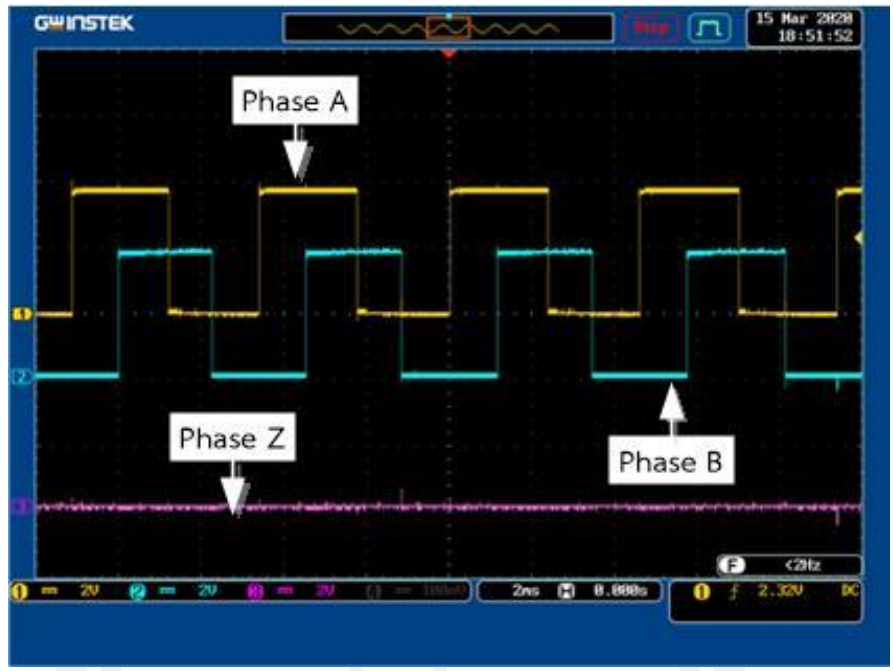
จำเป็นต้องทำการวัดความเร็วของมอเตอร์ดังนั้นจึงได้ออกแบบสร้างชุดตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ดังนี้

4.1.3 ชุดตรวจจับความเร็วมอเตอร์ด้วยเอ็นโคดเตอร์

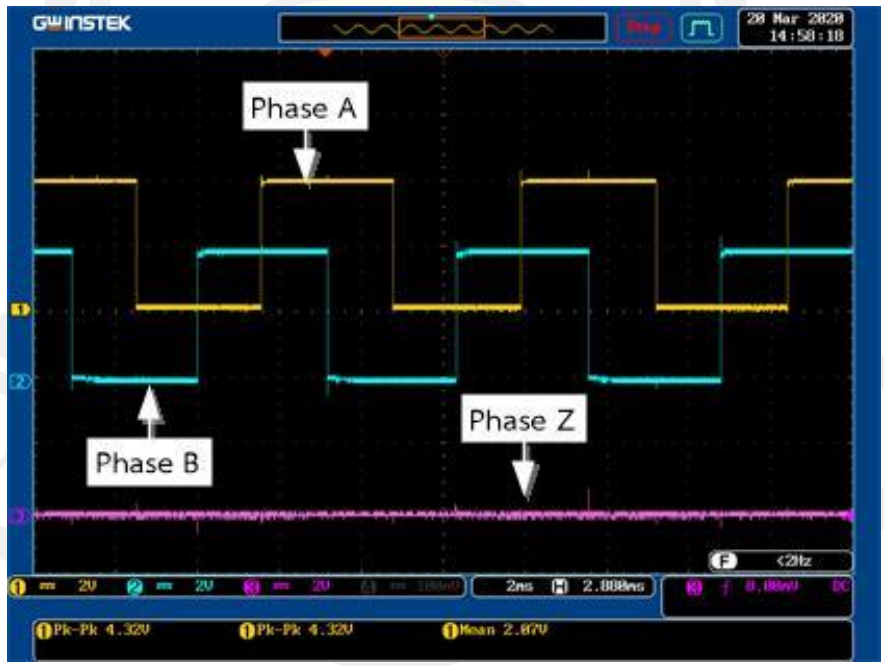
ในการวิธีดำเนินการวิจัยการออกแบบการควบคุมแรงบิดและความเร็วด้วยฟัซซี่ลอจิกสำหรับการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่เพื่อวัดสมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสำหรับการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ ซึ่งการออกแบบชุดควบคุมได้นั้น จะต้องทำการศึกษาสมรรถนะของระบบเพื่อดูพฤติกรรมการตอบสนองต่ออินพุตของระบบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงจำเป็นต้องทำการวัดความเร็วของมอเตอร์ซึ่งเป็นเอาต์พุตของระบบเพื่อศึกษาสมรรถนะ ดังนั้นจึงได้ออกแบบสร้างชุดตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยใช้โรตารี่เอ็นโคดเดอร์รุ่น รุ่น E6B2-CWZ1X และวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน ซึ่งเป็นเครื่องมือในการแปลงความถี่ซึ่งเป็นเอาต์พุตจากเอ็นโคดเดอร์แปลงให้เป็นแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้ตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยได้ใช้วงจร MIKROE-3126 ดั ความถี่ที่ตอบสนอง 200Hz ถึง 120kHz โดยแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0V ถึง 3V

4.1.3.1 ทดสอบการทำงานของอ็นโคดเดอร์

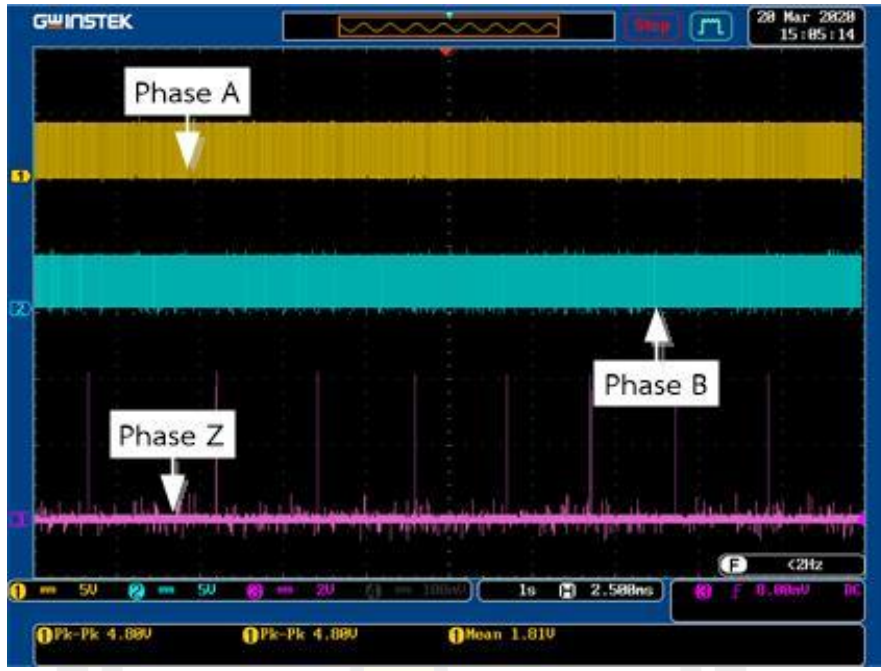
การทดสอบการทำงานของเอนโคดเดอร์ OMRON รุ่น E6B2-CWZ1X จะทำการสอบโดยการหมุนเอ็นโคดเดอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา เพื่อดูผลตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตที่เฟส A เฟส B และเฟส Z ผลการทดสอบแสดงดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**67 ถึงภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**69โดยช่องสัญญาณที่ 1 วัดสัญญาณของเฟส A ช่องสัญญาณที่ 2 วัดสัญญาณของเฟส B ช่องสัญญาณที่ 3 วัดสัญญาณของเฟส Z โดยผลการทดสอบการหมุนตามเข็มนาฬิกา ภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**67 จะพบว่าสัญญาณเอาต์พุตแบบพัลล์ของเฟส A นำเฟส B อยู่ 90 องศา ส่วนการทดสอบการหมุนทวนเข็มนาฬิกา ดังภาพประกอบที่ 68 จะพบว่าสัญญาณเอาต์พุตแบบพัลล์ของเฟส B นำเฟส A อยู่ 90 องศา สัญญาณเอาต์พุตในเฟส Z จะปรากฏเป็นพัลล์เมื่อเอ็นโคดเดอร์หมุนครบหนึ่งรอบ



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**67 ผลการทดสอบการทำงานเอนโคดเดอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**68 ผลการทดสอบการทำงานเอนโคดเดอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**69 ผลการทดสอบการทำงานเอนโคดเดอร์ของเฟส Z

จากผลทดสอบการทำงานของเอ็นโคดเดอร์นั้น เมื่อเอ็นโคดเดอร์หมุนก็จะให้ค่าเอาต์ที่เป็นความถี่ออกมาค่าหนึ่ง จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเร็วในการหมุน ซึ่งเอ็นรุ่น E6B2-CWZ1X มีสัญญาณพัลล์ 1000 พัลล์ต่อหนึ่งรอบ หมายความถ้าเอ็นโคดเดอร์หมุนครบ 1 รอบก็จะสร้างสัญญาณพัลล์ออกมา 1000 พัลล์ ดังนั้นสามารถคำนวณหาความเร็วของมอเตอร์ได้ดังนี้

$$\omega_r = 2\pi \times \frac{f_{in}}{Resolution} \quad \text{หรือ} \quad N_r = \frac{f_{in}}{Resolution} \times 60 \tag{4.8}$$

เมื่อ f_{in} คือ ความถี่ของสัญญาณพัลส์ที่เกิดจากเอ็นโคดเดอร์หมุนครบหนึ่งรอบ

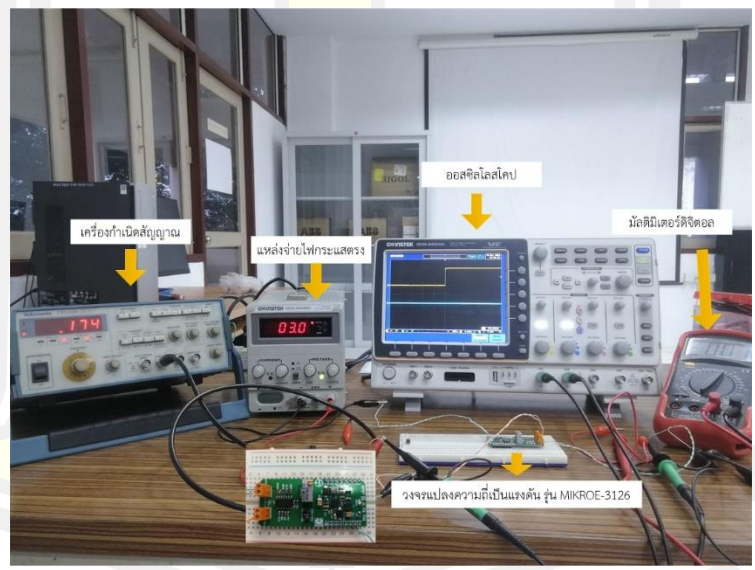
$Resolution$ คือ จำนวนพัลล์ทั้งหมดที่เอ็นโคดเดอร์หมุนครบหนึ่งรอบ

ω_r คือ ความเร็วเชิงมุมของเอ็นโคดเดอร์หรือของมอเตอร์

N_r คือ ความเร็วรอบของเอ็นโคดเดอร์หรือของมอเตอร์

4.1.3.2 ทดสอบการทำงานของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน

ทดสอบการทำงานของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน รุ่น MIKROE-3126 จากการทำงานของเอนโคดเดอร์จะเห็นว่าสัญญาณทางด้านเอาต์พุตของเฟส A และเฟส B มีลักษณะเป็นสัญญาณที่มีรอบการทำงาน (duty cycle) เท่ากับ 50% โดยความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับอัตราการหมุนของเอ็นโคดเดอร์ เช่น ถ้าอัตราการหมุนช้าความถี่ของสัญญาณก็จะน้อย และถ้าหมุนเร็วความถี่ก็จะมาก โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้เอ็นโคดเดอร์ที่มีสัญญาณ 1000 พัลส์ต่อการหมุน 1 รอบ ดังนั้นถ้า หมุนด้วยความเร็ว 1 rpm สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเอ็นโคดเดอร์ก็จะเท่ากับ 16.67Hz ดังนั้นจึงทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างวงจรการแปลงความถี่เป็นแรงดันเพื่อใช้ตรวจวัดความเร็วของมอเตอร์ โดยได้แสดงรูปวงจรทดสอบจริงดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.** 70ประกอบไปด้วย เครื่องกำเนิดสัญญาณ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ออสซิลโลสโคป มัลติมิเตอร์ดิจิตอล วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน รุ่น MIKROE-3126



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**70 ทดสอบการทำงานของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน

โดยการทดสอบได้ใช้แหล่งจ่ายสัญญาณที่สร้างความถี่เพื่อเป็นความถี่อินพุตให้กับวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน MIKROE-3126 แล้ววัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ออกจากวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน จากนั้นบันทึกค่าแรงดันเอาต์พุตลงในตาราง 13 และสามารถนำข้อมูลมาสร้างกราฟเพื่อดู

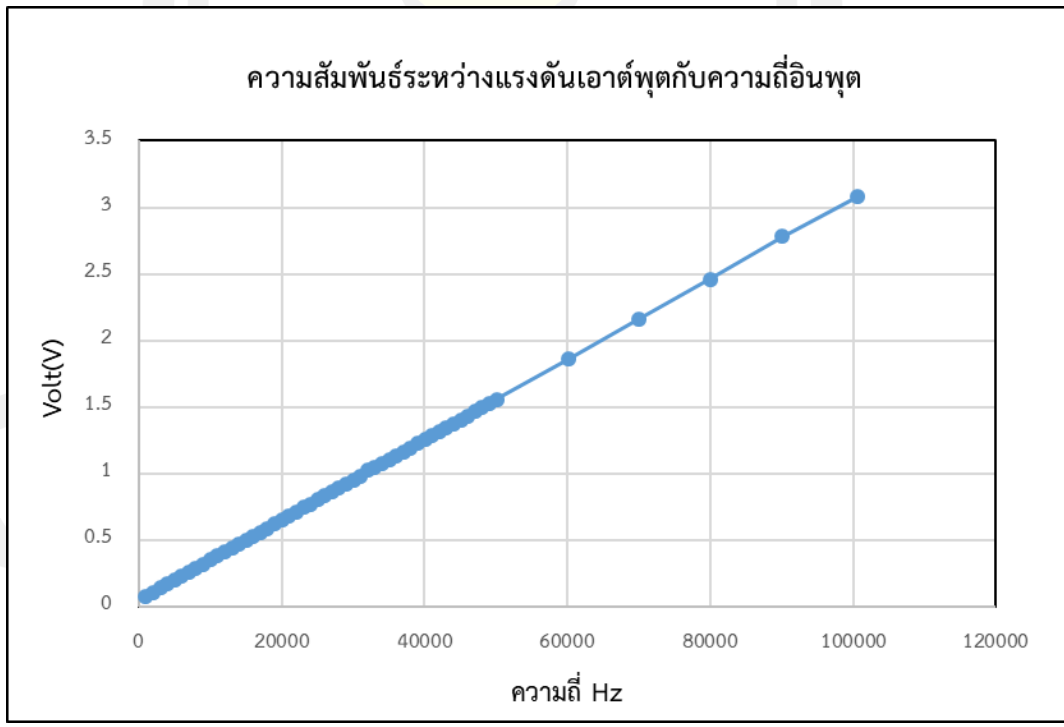
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่อินพุตดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**71

ตาราง 13 ผลการทดสอบวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน

ความถี่ (Hz)	ความถี่จริง (Hz)	แรงดัน (V)	Speed (rpm)
1000	1010	0.078	61
2000	2008	0.107	120
3000	3008	0.137	180
4000	4009	0.167	241
5000	5007	0.197	300
6000	6006	0.227	360
7000	7010	0.257	421
8000	8000	0.287	480
9000	9006	0.318	540
10000	10024	0.348	601
11000	11020	0.378	661
12000	12080	0.410	725
13000	13030	0.439	782
14000	14020	0.469	841
15000	15020	0.499	901
16000	16020	0.529	961
17000	17020	0.559	1021
18000	18000	0.588	1080
19000	19050	0.620	1143
20000	20040	0.650	1202

21000	21030	0.680	1262
22000	22030	0.710	1322
23000	23100	0.742	1386
24000	24030	0.770	1442
ความถี่ (Hz)	ความถี่จริง (Hz)	แรงดัน (V)	Speed (rpm)
25000	25050	0.801	1503
26000	26010	0.830	1561
27000	27020	0.860	1621
28000	28020	0.890	1681
29000	29000	0.920	1740
30000	30020	0.951	1801
31000	31020	0.981	1861
32000	32080	1.021	1925
33000	33020	1.041	1981
34000	34040	1.071	2042
35000	35080	1.103	2105
36000	36010	1.131	2161
37000	37090	1.163	2225
38000	38060	1.193	2284
39000	39070	1.223	2344
40000	40090	1.253	2405
41000	41050	1.282	2463
42000	42080	1.313	2525
43000	43010	1.342	2581
44000	44010	1.372	2641
45000	45060	1.403	2704

46000	46050	1.433	2763
47000	47060	1.463	2824
48000	48040	1.492	2882
49000	49090	1.524	2945
ความถี่ (Hz)	ความถี่จริง (Hz)	แรงดัน (V)	Speed (rpm)
50000	50060	1.554	3004
60000	60130	1.857	3608
70000	70060	2.160	4204
80000	80020	2.460	4801
90000	90130	2.780	5408
100000	100570	3.080	6034



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**71 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่อินพุต

จากภาพประกอบ Error! **No text of specified style in document.**71 แสดงให้เห็นว่าเอาต์พุตกับความถี่อินพุตมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น จากความสัมพันธ์ดังกล่าว จึงสามารถใช้สมการเส้นตรงในการคำนวณการตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้ดังนี้

$$y - y_0 = m(x - x_0) \tag{4.9}$$

คำนวณหาค่า โดยใช้ข้อมูล ความถี่ ที่ 20040 Hz และ 40090 Hz แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 0.650 และ 1.253 ตามลำดับ

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{1.253 - 0.650}{40090 - 20040} = 3.0075 \times 10^{-5}$$

สามารถหาสมการเส้นตรงโดยใช้ ชุดข้อมูลความถี่ที่ 15030 Hz แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 0.499

$$y - 0.499 = m(x - 15020)$$

เปลี่ยนตัวแปรเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ โดยให้ y เป็น V_{out} และให้ x เป็น F

$$V_{out} - 0.499 = 3.0075 \times 10^{-5}(F - 15020)$$

ความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถคำนวณได้จาก

$$N_r = \frac{f_{in}}{Resolution} \times 60, \quad f_{in} = \frac{N_r \times Resolution}{60}$$

ดังนั้นสามารถคำนวณความเร็วรอบของมอเตอร์ได้จากสมการ

$$V_{out} - 0.499 = 3.0075 \times 10^{-5}\left(\frac{N_r \times Resolution}{60} - 15020\right)$$

$$N_r = 1995 \times V_{out} - 94.36 \quad rpm \tag{4.10}$$

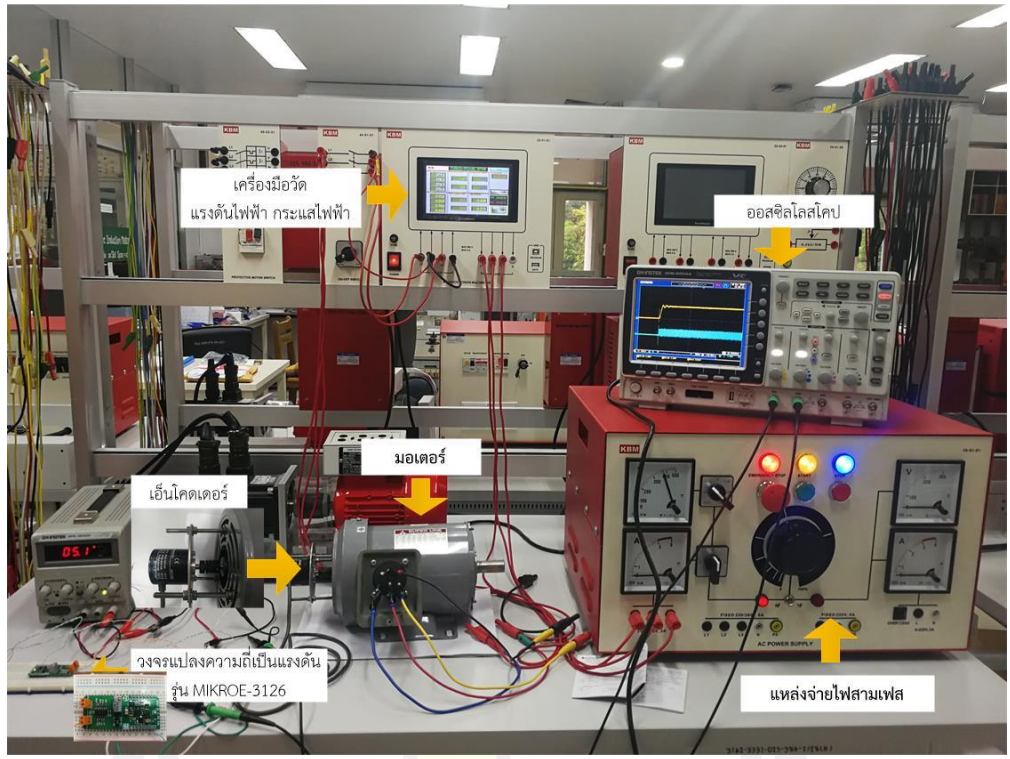
$$\omega_r = 2\pi N_r = 2\pi\left(1995 \times V_{out} - 94.36\right) \quad rad/\sec \tag{4.11}$$

เมื่อ

V_{out}	คือ	แรงดันเอาต์พุตจากวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน
$Resolution$	คือ	จำนวนพัลส์ทั้งหมดที่เอ็นโคดเดอร์หมุนครบหนึ่งรอบ
ω_r	คือ	ความเร็วเชิงมุมของเอ็นโคดเดอร์หรือของมอเตอร์
N_r	คือ	ความเร็วรอบของเอ็นโคดเดอร์หรือของมอเตอร์

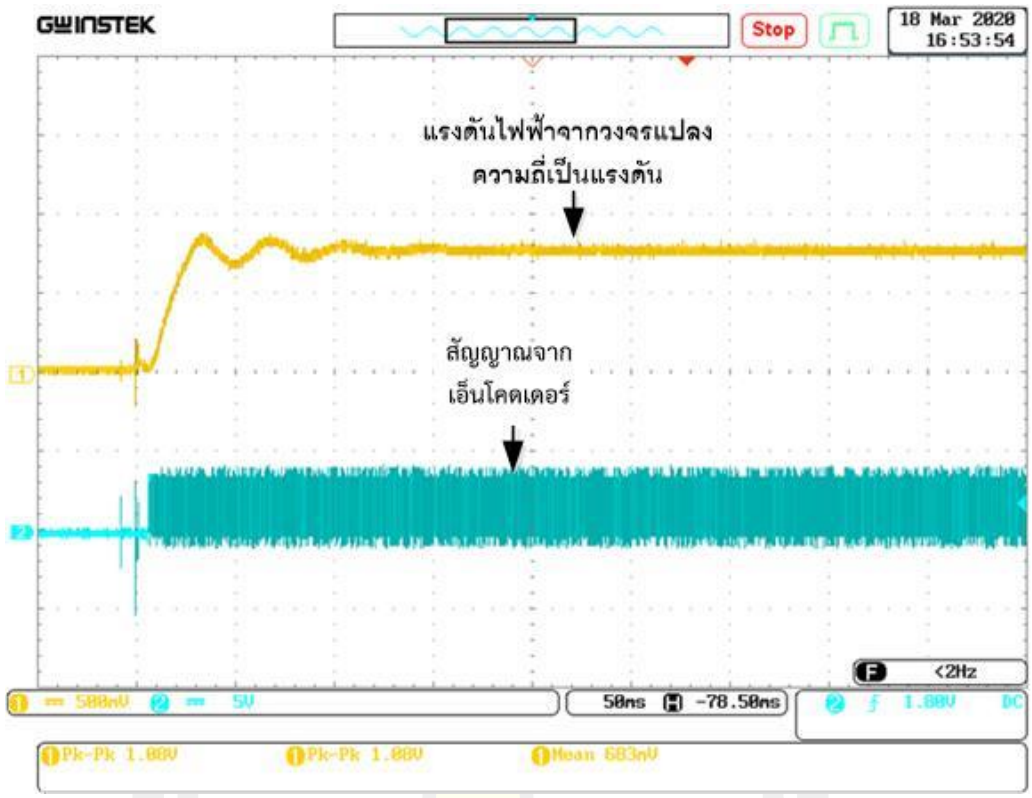
4.1.3.3 การทดสอบวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยชุดตรวจจับความเร็วด้วยเอ็นโคดเตอร์

ทดสอบการทำงานของชุดตรวจจับความเร็วมอเตอร์ด้วยเอ็นโคดเตอร์ โดยทำการต่อวงจรดังภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.72



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**72 วงจรทดสอบการทำงานของชุดตรวจจับความเร็วมอเตอร์ด้วยเอ็นโคดเตอร์

ภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**72 แสดงวงจรทดสอบการทำงานของชุดตรวจจับความเร็วมอเตอร์ด้วยเอ็นโคดเตอร์ประกอบด้วย มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส เอ็นโคดเตอร์ OMRON รุ่น E6B2-CWZ1X วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน รุ่น MIKROE-3126 ออสซิลโลสโคป เครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ดำเนินการทดสอบโดยจ่ายอินพุตที่พิกัดให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส (ต่อแบบวาย) แรงดันไฟฟ้า 380 โวลต์ ความถี่ 50 Hz ความเร็วพิกัดของมอเตอร์อยู่ที่ 1500 รอบต่อนาที จากนั้นทำการวัดความเร็วรอบมอเตอร์โดยชุดตรวจจับความเร็วมอเตอร์ด้วยเอ็นโคดเตอร์ ซึ่งสัญญาณจะผ่านวงจรแปลงความถี่ที่ออกมาจากเอ็นโคดเดอร์ให้เป็นแรงดันไฟฟ้า ผลการทดสอบแสดงดังภาพประกอบที่ 4.10 ช่องสัญญาณที่ 1 แสดงเอาต์พุตจากวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน ช่องสัญญาณที่ 2 แสดงสัญญาณของเอ็นโคดเดอร์



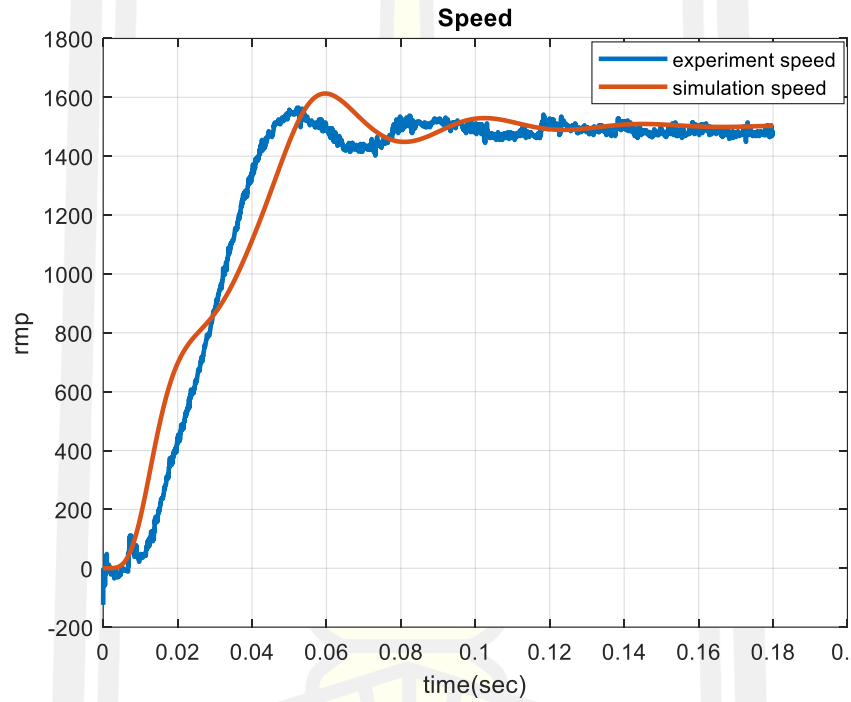
ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**73 ผลการทดสอบการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์
ด้วยชุดตรวจจับความเร็วด้วยเอ็นโคดเตอร์

จากผลการทดสอบในภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.** 73 แสดงให้เห็นว่าชุดตรวจจับความเร็วด้วยเอ็นโคดเตอร์ สามารถวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ ซึ่งจากกราฟที่ช่วงเวลาเข้าที่แรงดันไฟฟ้าจะประมาณ 0.8 โวลต์ สามารถนำไปแปลงเป็นหน่วย รอบต่อนาที และเรเดียนต่อนาที ได้ดังนี้

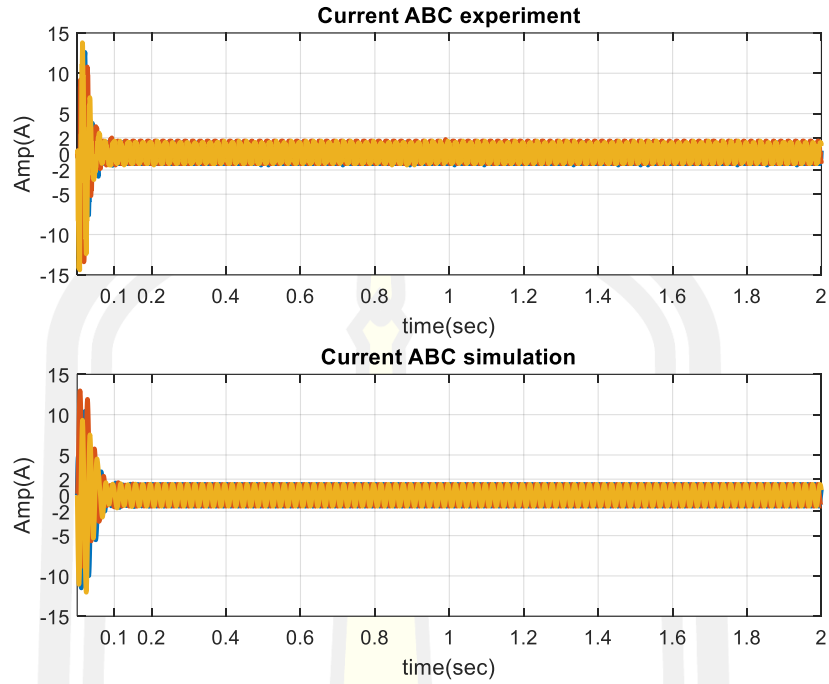
$$N_r = 1995 \times V_{out} - 94.36 \quad rpm$$
$$N_r = 1995 \times 0.8 - 94.36 \quad rpm$$
$$N_r = 1501.65 \quad rpm$$

จากการคำนวณความเร็วตามสมการ ซึ่งคำนวณได้เท่ากับ 1501.65 รอบต่อนาที จะเห็นว่าชุดตรวจจับความเร็วด้วยเอ็นโคดเตอร์ สามารถวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ และมีความถูกต้อง

ในการทดสอบหาการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ (J) ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการสุ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยไปเรื่อย ๆ จนได้ค่าใกล้เคียงกับความเร็วรอบของมอเตอร์โดยเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบจริงกับการจำลองสถาณการณ์บน MATLAB จากการสุ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงจะได้ค่า $J=0.0032$ ค่าความเร็วความเร็วมอเตอร์ขณะเดินเครื่องถึงสภาวะเข้าสู่สถานะอยู่ตัวแสดงดังภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.74 ค่ากระแสที่สเตเตอร์แสดงดังภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.75



ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.74 ความเร็วมอเตอร์ขณะเดินเครื่องถึงสภาวะเข้าสู่สถานะอยู่ตัว ใช้ค่า $J=0.0032$



ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.75 กระแสที่สเตเตอร์ ใช้ค่า

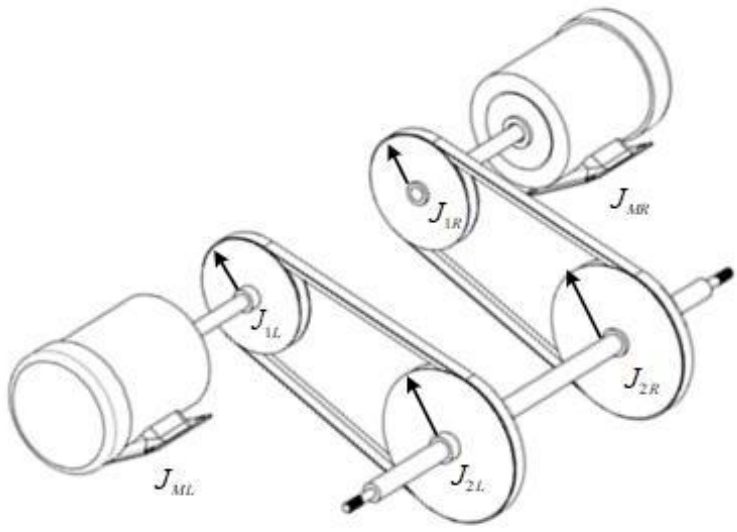
$$J = 0.0032$$

4.1.4 สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่

จากการออกแบบในบทที่ 3 ได้ดำเนินการจัดสร้างชุดทดลองที่ได้ออกแบบไว้ โครงสร้างต้นแบบที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังภาพประกอบที่ 4.21 ประกอบด้วยมอเตอร์ ขนาด 746 วัตต์ จำนวน 2 ตัว กำลังงานโดยรวมเท่ากับ 1.5 กิโลวัตต์ ขนาดโครงสร้าง กว้าง 0.5 เมตร ยาว 1 เมตร ดังภาพประกอบ 4.21 โดยได้วิเคราะห์สมการการขับมอเตอร์คู่ พิจารณาทางฝั่งของระบบทางกล แสดงความสัมพันธ์สมการแรงบิดทางไฟฟ้าและความเร็วที่โรเตอร์ ได้ดังสมการที่ 3.25 และ 3.26 นั้น ซึ่งสามารถหาสมการความเร็วที่โรเตอร์ได้ดังสมการที่ 4.2 วิเคราะห์ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบขับมอเตอร์คู่ดังภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.76 ซึ่งคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยได้ดังสมการที่

$$\omega = \int \frac{T_{em1} + T_{em2} - \frac{T_L}{k_G}}{J} dt \qquad (4.12)$$

ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**76 ต้นแบบที่ใช้ในการศึกษาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**77 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่

จากโครงสร้างดังภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.77 สามารถคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยได้ดังนี้

$$J = J_R + J_L \tag{4.13}$$

$$J_R = J_{MR} + J_{1L} + J_{2L} \tag{4.14}$$

$$J_L = J_{ML} + J_{1R} + J_{2R} \tag{4.15}$$

โดยที่ ค่า r_{1L} และ r_{1R} มีค่าเท่ากับ 3.81 เซนติเมตร ค่า r_{2L} และ r_{2R} มีค่าเท่ากับ 7.62 เซนติเมตร โดยมีมวลเท่ากับ 0.5 กิโลกรัม และ 1 กิโลกรัม แทนค่าลงในสมการ และค่า โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์เท่ากับ $0.0032\,kg.m^2$

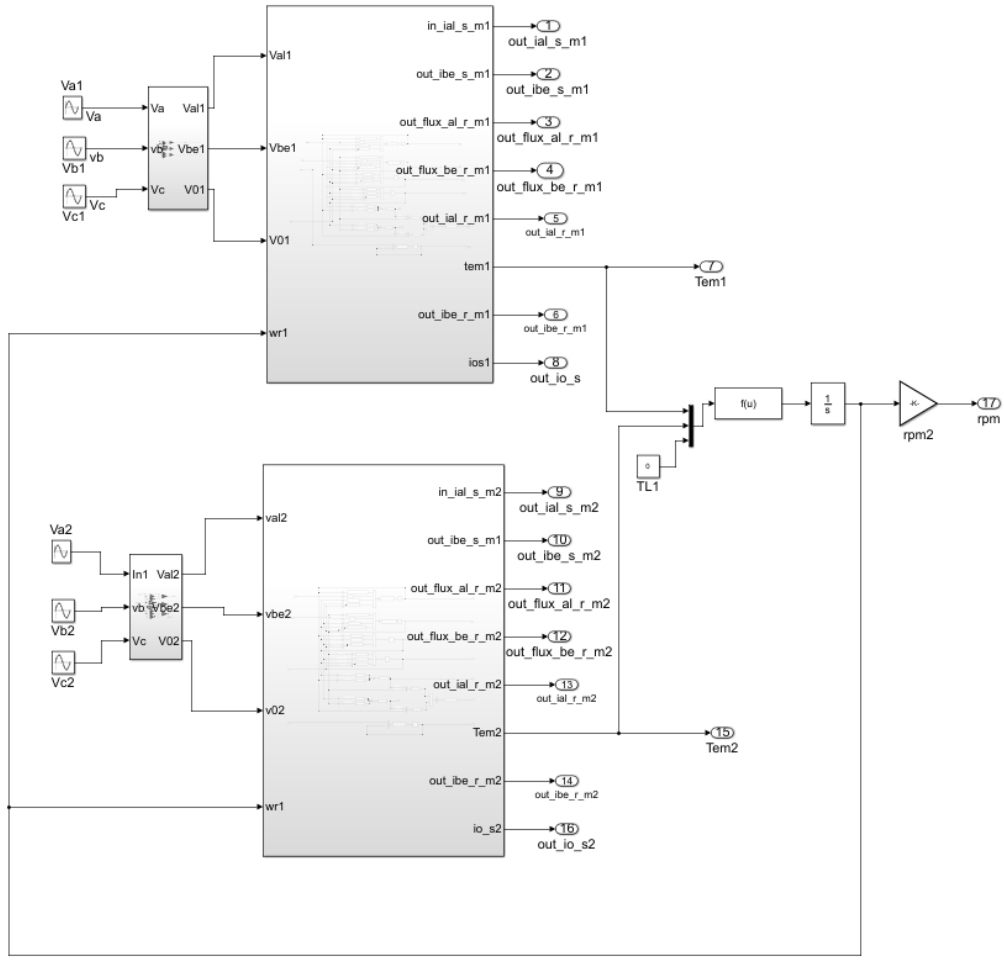
$$J_{1L} = \frac{1}{2}mr^2 = (\frac{1}{2})(0.5)(3.81\times10^{-2})^2 = 3.63\times10^{-4}$$

$$J_{2L} = \frac{1}{2}mr^2 = (\frac{1}{2})(1)(7.62\times10^{-2})^2 = 2.903\times10^{-3}$$

$$J_L = J_M + J_{1L} + J_{2L} = 0.0032 + 3.62\times10^{-4} + 2.903\times10^{-3} = 0.006462\,kg.m^2$$

$$J_{total} = 0.013\,kg.m^2$$

จากสมการที่ 4.12 สามารถนำมาสร้างเป็นนำมาสร้างเป็นชุดบล๊อกใน Simulink เพื่อจำลองผลการตอบสนอง ดังภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.78

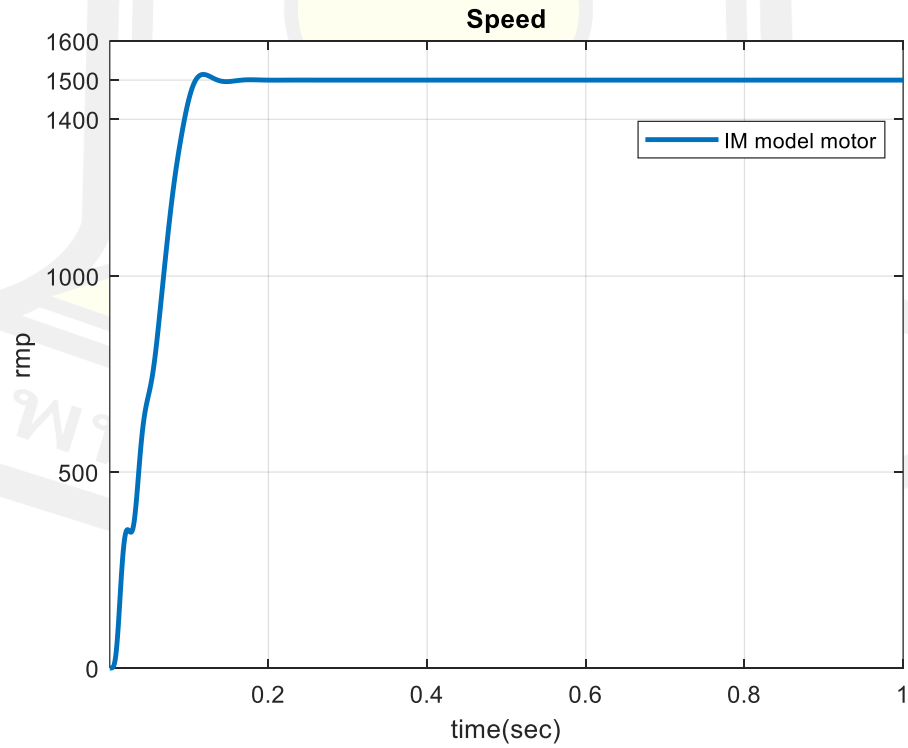


ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**78 ชุดบล็อกของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่

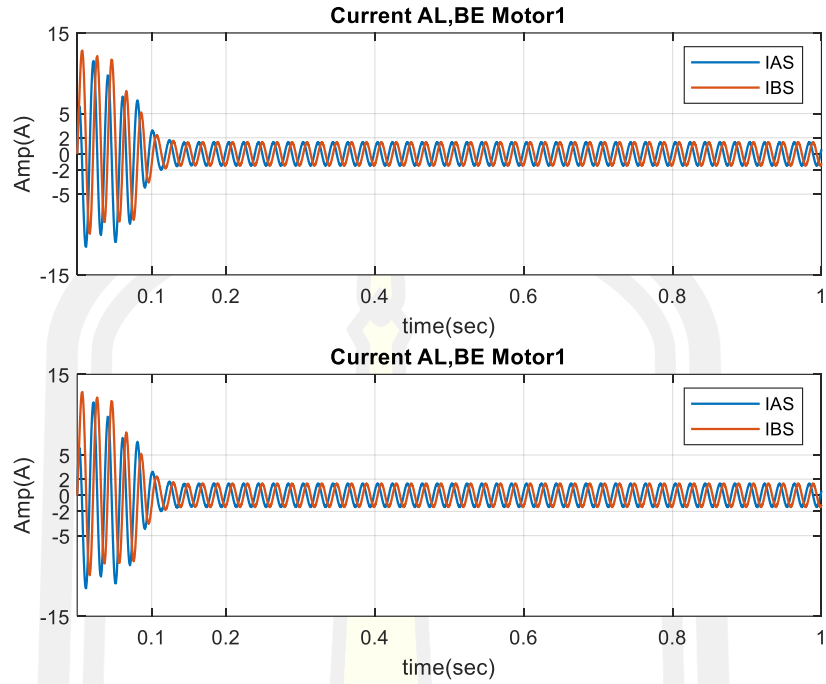
จำลองผลโดยโปรแกรม MATLAB โดยจ่ายอินพุตกับมอเตอร์ทั้งสองตัว 380 VL-L 50 Hz ผลการจำลองค่าความเร็วที่โรเตอร์ ค่ากระแสที่สเตเตอร์ ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดโรเตอร์ แสดงดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**79 ถึง ภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**84 ใช้พารามิเตอร์ในการทดสอบของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ ดังตาราง 14 เปรียบเทียบกับผลทดสอบจริงจากการทดสอบการทำงานของของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่แสดงดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**85 ผลการทดสอบค่าความเร็วที่โรเตอร์ และค่ากรแสที่สเตเตอร์แสดงดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**86 ถึง ภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**87

ตาราง 14 ค่าพารามิเตอร์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่

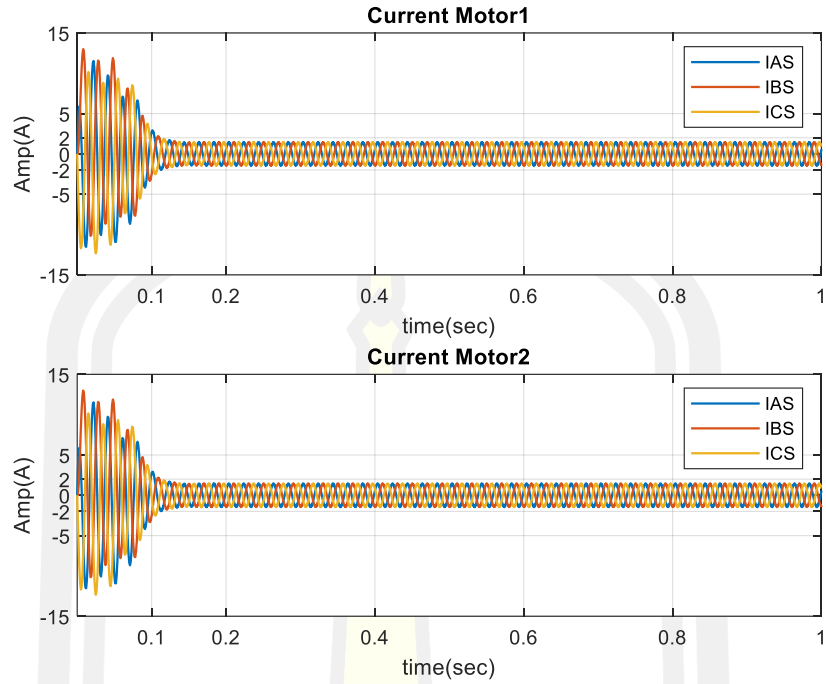
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
R_s	8.4	ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
R_r	8.59	ความต้านทานของขดลาดโรเตอร์
L_{ls}	0.0292	ความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์
L_{lr}	0.0438	ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์
L_m	0.6958	ความเหนี่ยวนำร่วม
J_{total}	0.013	โมเมนต์ความเฉื่อย
P	4	ขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า



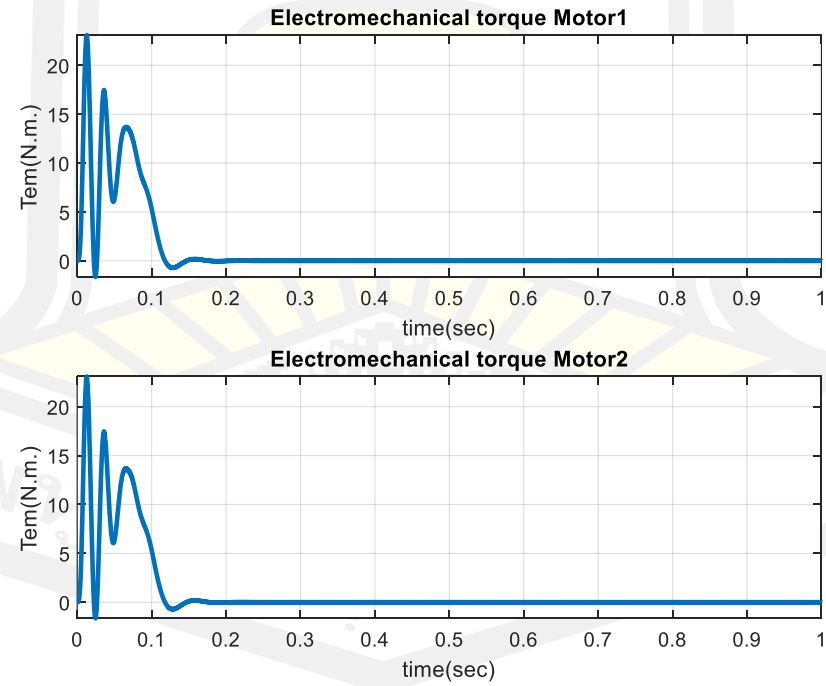
ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**79 ค่าความเร็วเทียบกับเวลา



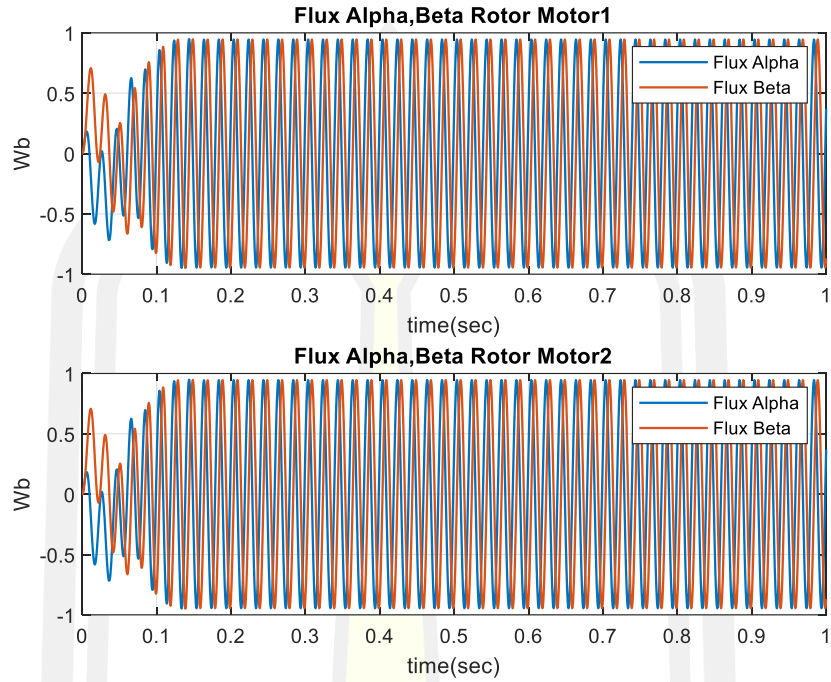
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.80 กระแสของที่ขดลวดสเตเตอร์บนแกน $\alpha\beta$



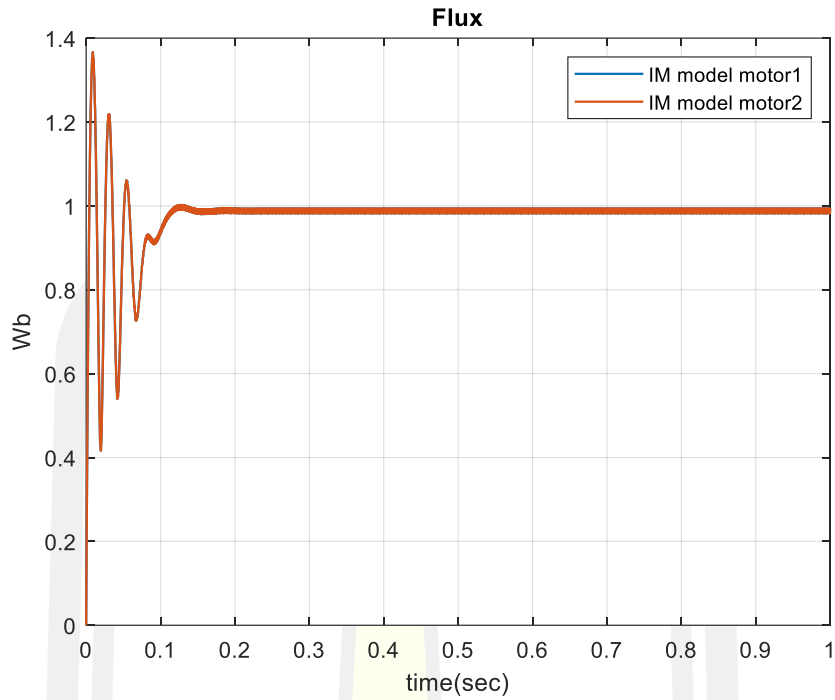
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.81 กระแสของที่ขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC



ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.82 ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_{em}) เทียบกับเวลา

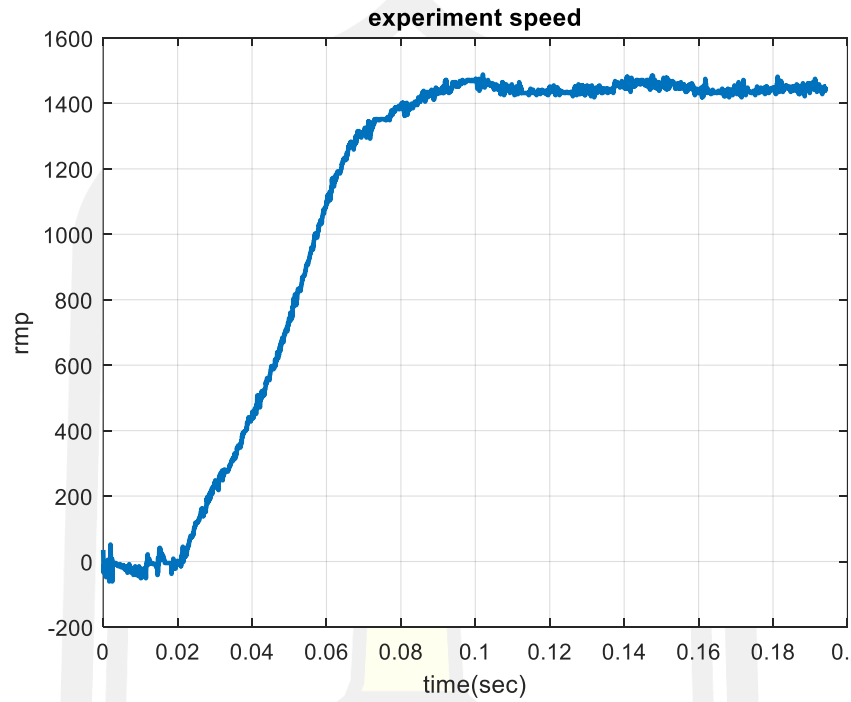


ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.83 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดโรเตอร์บนแกน $\alpha\beta$

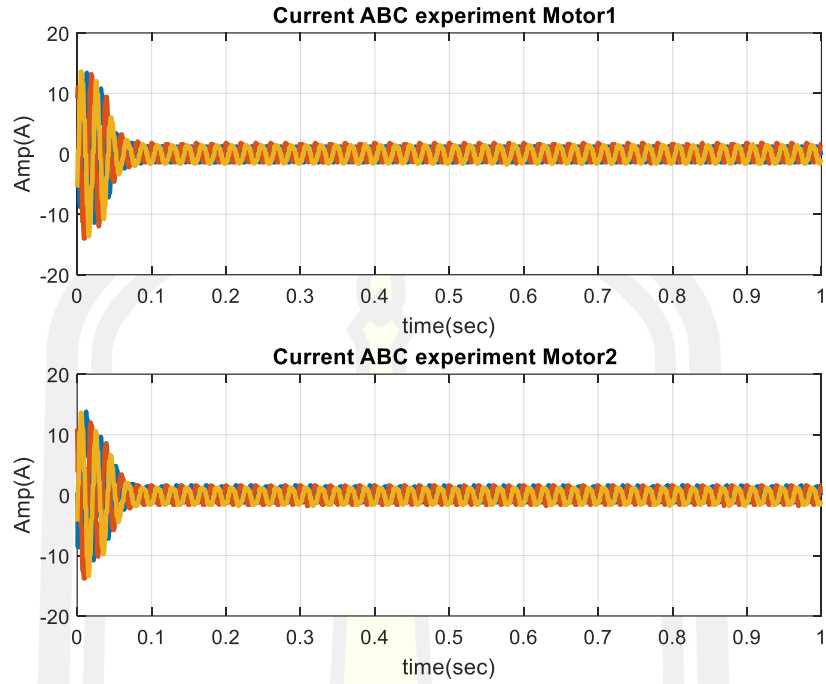


ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.84 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดสเตเตอร์บนแกน

ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.85 ทดสอบการทำงานของ
ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่



ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.86 ค่าความเร็วเทียบกับเวลา



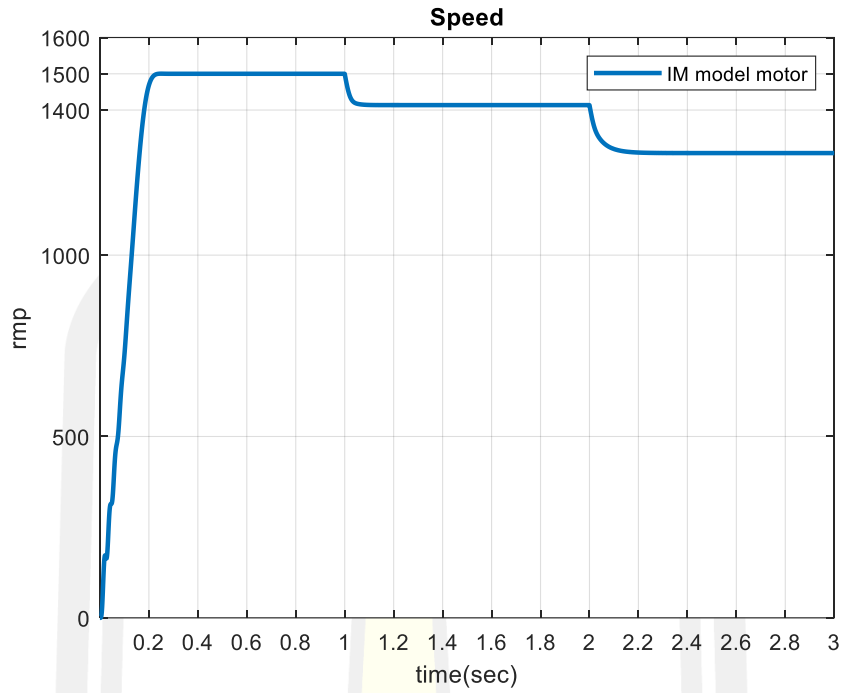
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.87 กระแสของที่ขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC

4.2 จำลองสถาณการณ์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่

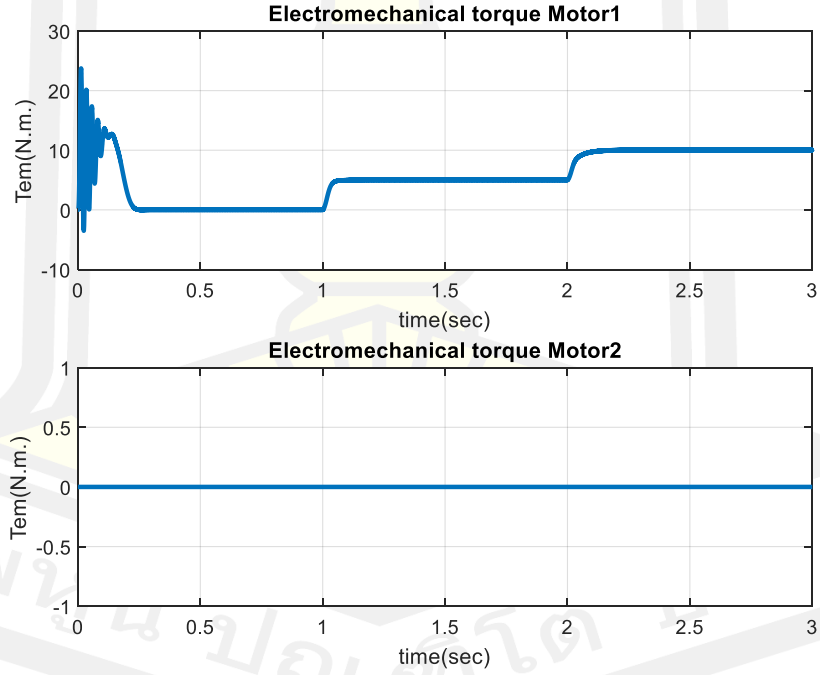
เมื่อได้พารามิเตอร์ของมอเตอร์ทั้งระบบเรียบร้อยแล้วจะทำการทดสอบสมรรถนะของระบบโดยการจำลองผลตามสถาณการณ์ต่างๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบระบบควบคุมให้กับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ในหัวข้อต่อไป โดยใช้บล็อกของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ที่ได้นำเสนอไปแล้วในหัวข้อที่ 4.1.3 ดังภาพประกอบที่ 4.24 มอเตอร์มีพิกัดแรงดันระหว่างสายที่ 380 V_{rms}

กำหนดเงื่อนไขการจำลองดังนี้คือ

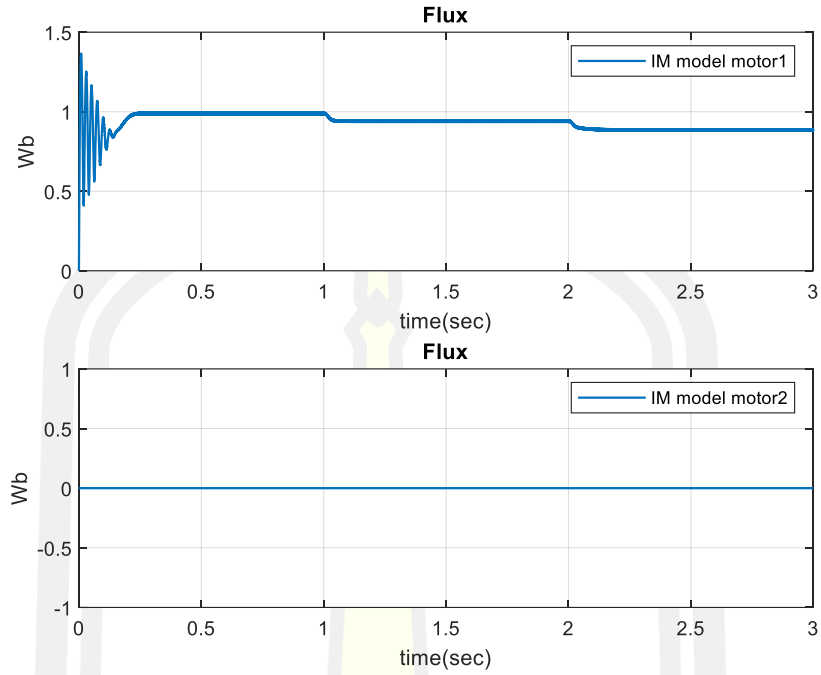
1. กำหนดให้มอเตอร์ทำงานตัวเดียว หมุนที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาที โดยไม่มีโหลด จ่ายอินพุตให้กับมอเตอร์ 380VL-L 50Hz เพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์ 5 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 1 วินาที เพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์ 10 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 2 วินาที



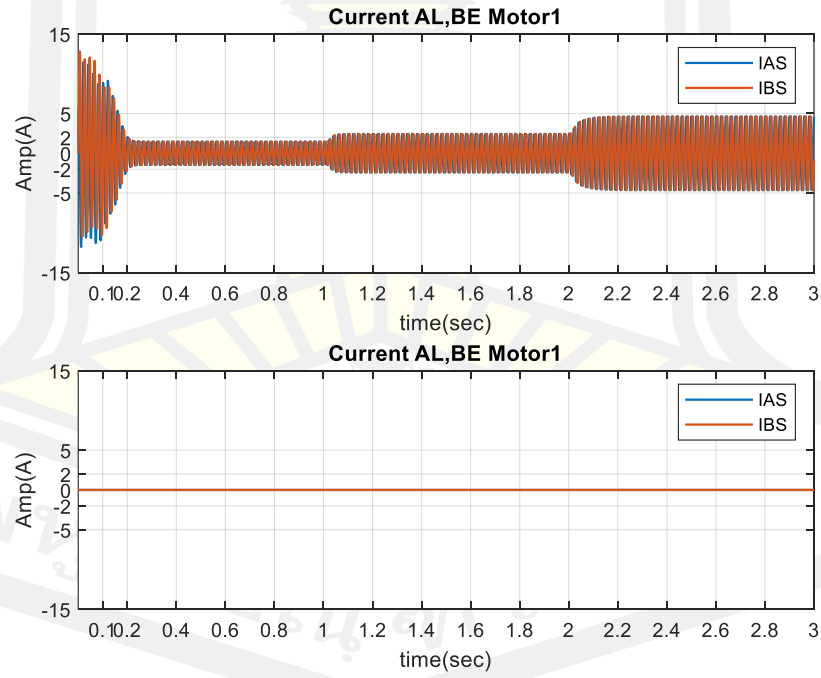
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.88 ค่าความเร็วเทียบกับเวลา



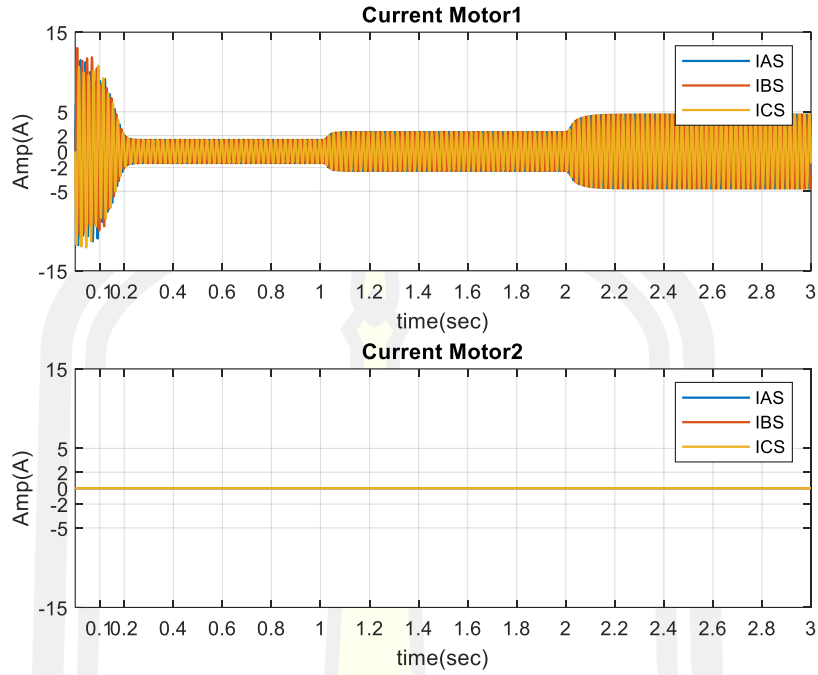
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.89 ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_{em}) เทียบกับเวลา



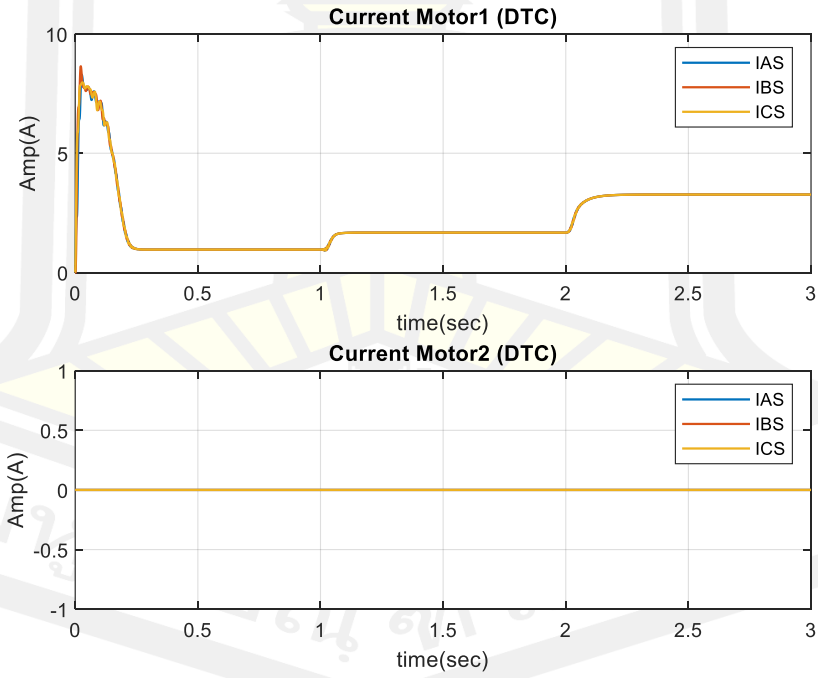
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.90 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดสเตเตอร์



ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.91 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน $\alpha\beta$

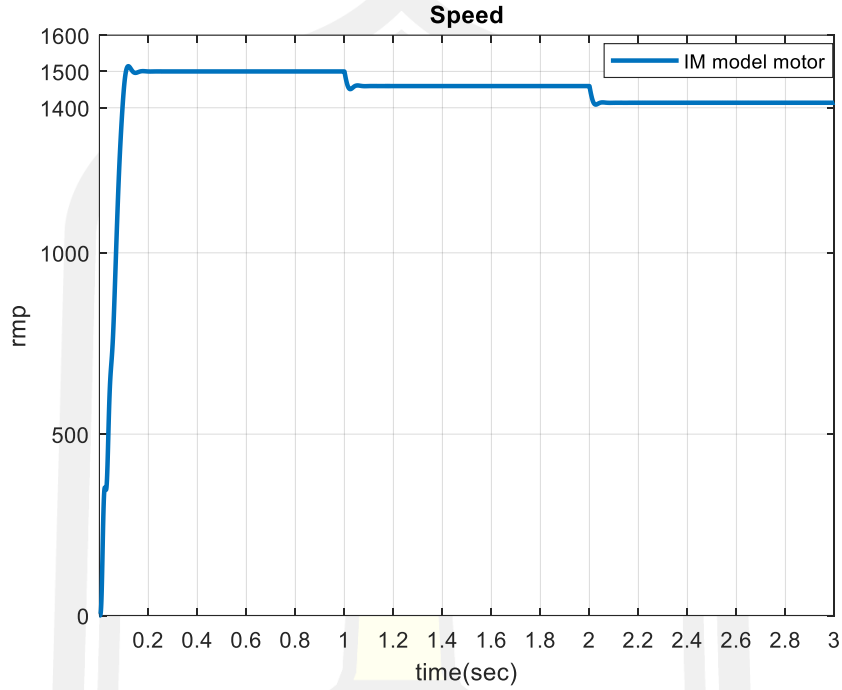


ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.92 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC

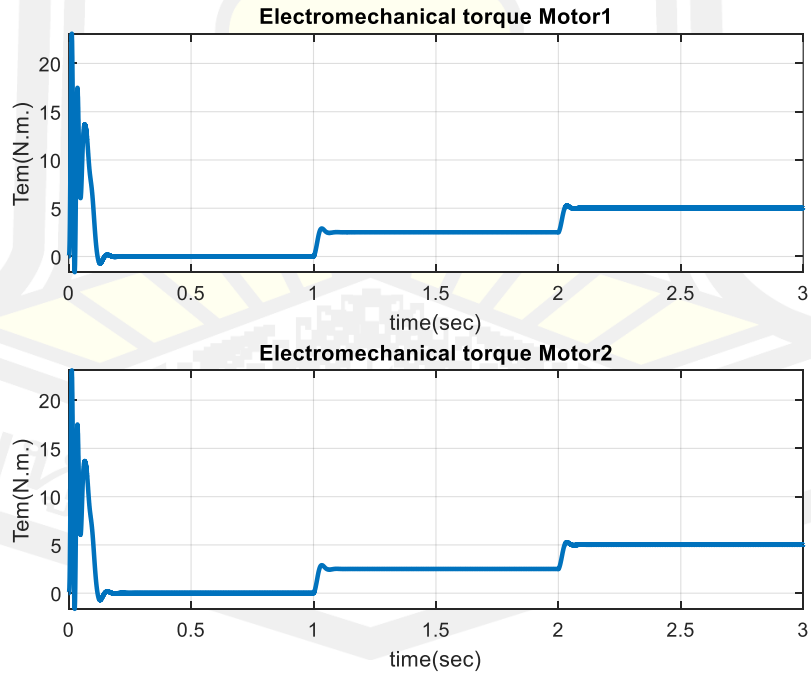


ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.93 กระแส RMS ของขดลวดสเตเตอร์ที่เฟส ABC

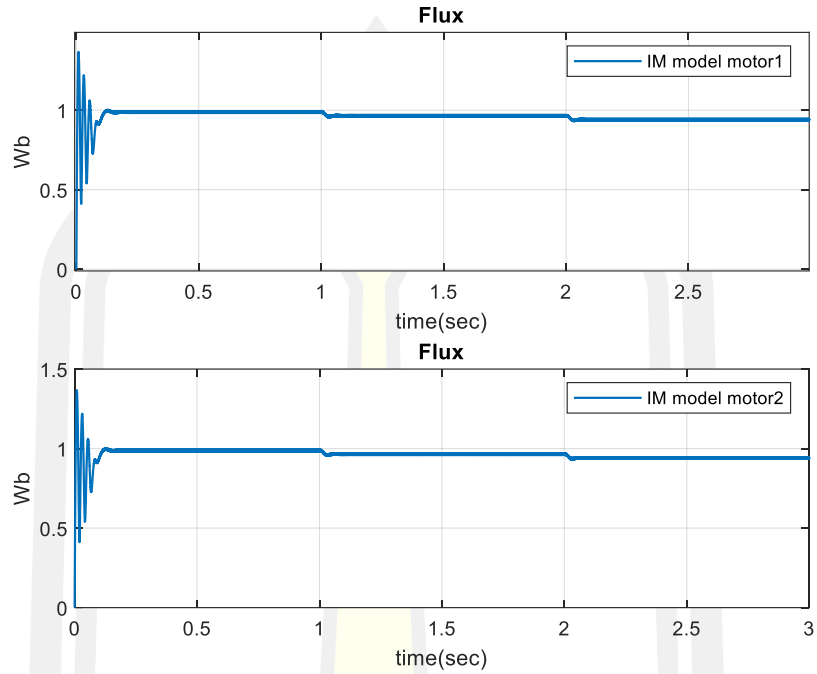
2. กำหนดให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาที โดยไม่มีโหลด จ่ายอินพุตให้กับมอเตอร์ 380VL-L 50Hz เพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์ 5Nm. ที่เวลา 1 วินาที



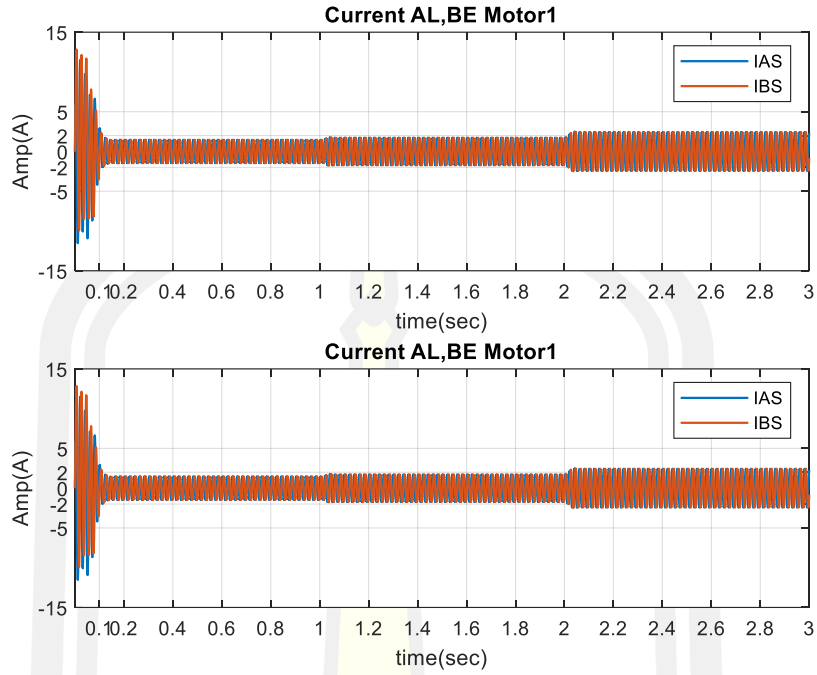
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.94 ค่าความเร็วเทียบกับเวลา



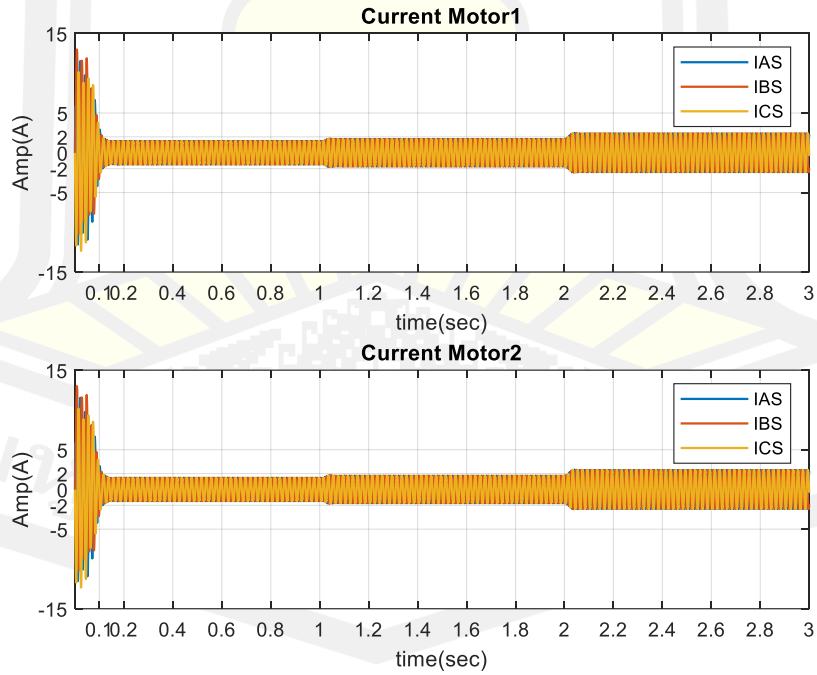
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.95 ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_{em}) เทียบกับเวลา



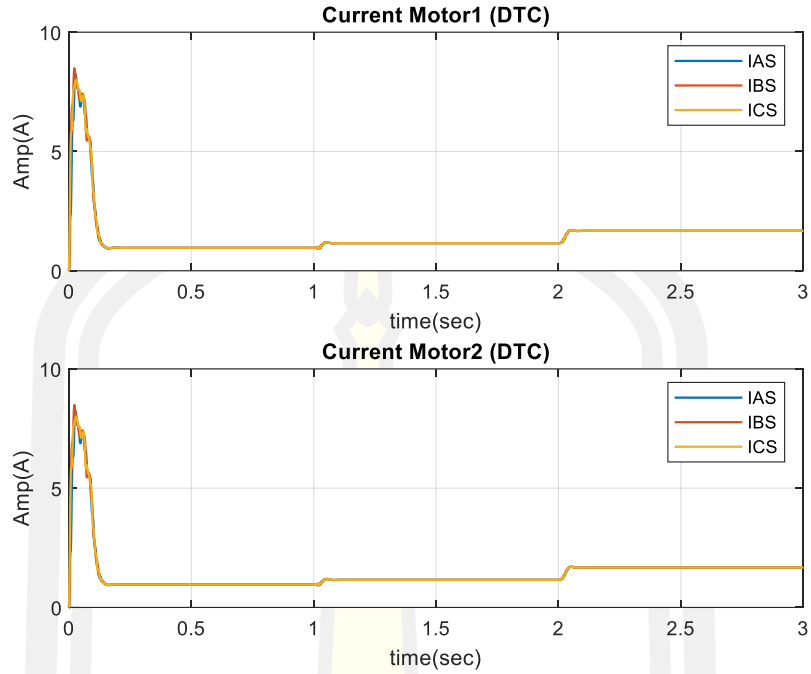
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.96 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดสเตเตอร์บนแกน



ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.97 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน $\alpha\beta$



ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.98 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**99 กระแส RMS ของขดลวดสเตเตอร์ที่เฟส A

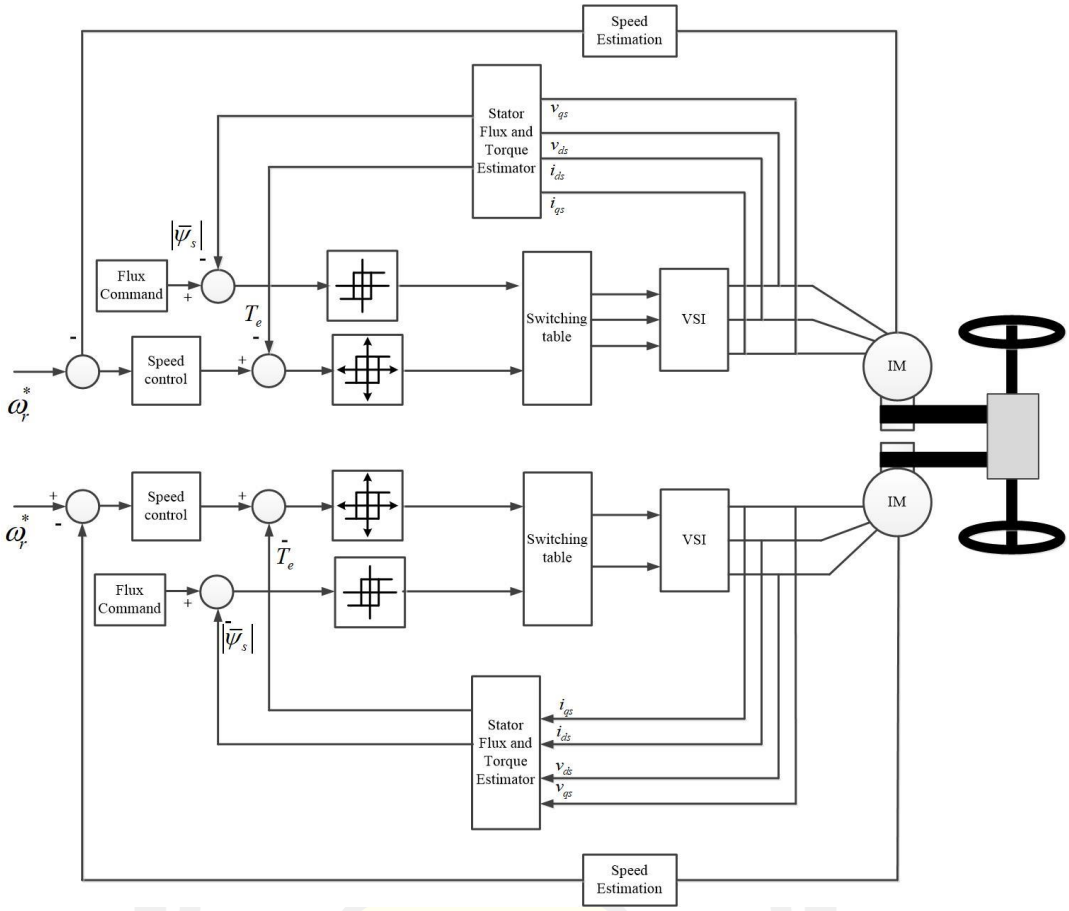
จากผลการจำลองสถาณการณ์จากเงื่อนไขการจำลอง โดยให้มอเตอร์ทำงานเพียง 1 ตัว กำหนดให้ความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 1500 รอบต่อนาที ที่เวลา 1 วินาที จ่ายโหลดให้มอเตอร์ เท่ากับ 5 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 1 วินาที จากนั้นเพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์ 10 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 2 วินาที ผลการทดสอบแสดงดังภาพประกอบ Error! **No text of specified style in document.**88 ถึง ภาพประกอบ Error! **No text of specified style in document.**93 จะเห็นว่ามอเตอร์ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่ ที่เวลา $t =$ วินาที จากนั้นจ่ายโหลดให้กับมอเตอร์ 5 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 1 วินาที ซึ่งทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลดลงมาเหลือ 1414 รอบต่อนาที กระแสในแกน $\alpha\beta$ เพิ่มขึ้นจาก 0.96 A เป็น 1.67 A จากนั้นจ่ายโหลดให้กับมอเตอร์ 10 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 2 วินาที ซึ่งทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลงลงมาเหลือ 1281 รอบต่อนาที กระแสในแกน $\alpha\beta$ เพิ่มขึ้นจาก 0.96 A เป็น 3.27 A

จากผลการจำลองเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์พร้อมกันทั้ง 2 ตัว โดยไม่ได้ใส่โหลด จากเงื่อนไขการจำลองโดยกำหนดให้ความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 1500 รอบต่อนาที จากผลการทดสอบภาพประกอบ Error! **No text of specified style in document.**94ถึง ภาพประกอบ Error! **No text of specified style in document.**99 จะเห็นว่ามอเตอร์ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่ ที่เวลา $t =$

วินาที จากนั้นจ่ายโหลดให้กับมอเตอร์ 5 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 1 วินาที ซึ่งทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลดลงมาเหลือ 1460 รอบต่อนาที กระแสในแกน $\alpha\beta$ เพิ่มขึ้นจาก 0.96 A เป็น 1.16 A จากนั้นจ่ายโหลดให้กับมอเตอร์ 10 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 2 วินาที ซึ่งทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลดลงมาเหลือ 1414 รอบต่อนาที กระแสในแกน $\alpha\beta$ เพิ่มขึ้นจาก 0.96 A เป็น 1.67 A

4.3 จำลองสถาณการณ์การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่แบบควบคุมแรงบิดโดยตรง

การจำลองสถาณการณ์การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่แบบควบคุมแรงบิดโดยตรง จะทำการจำลองสถาณการณ์โดยอาศัยตัวควบคุมด้วยการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอร์รีซิสที่ได้ออกแบบมาแล้วดังรายละเอียดที่ได้นำเสนอมาแล้วในหัวข้อที่ 3.2 ภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**100 โครงสร้างของการควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**100 โครงสร้างของการควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่

กำหนดเงื่อนไขการจำลองดังนี้คือ

กรณีที่ 1

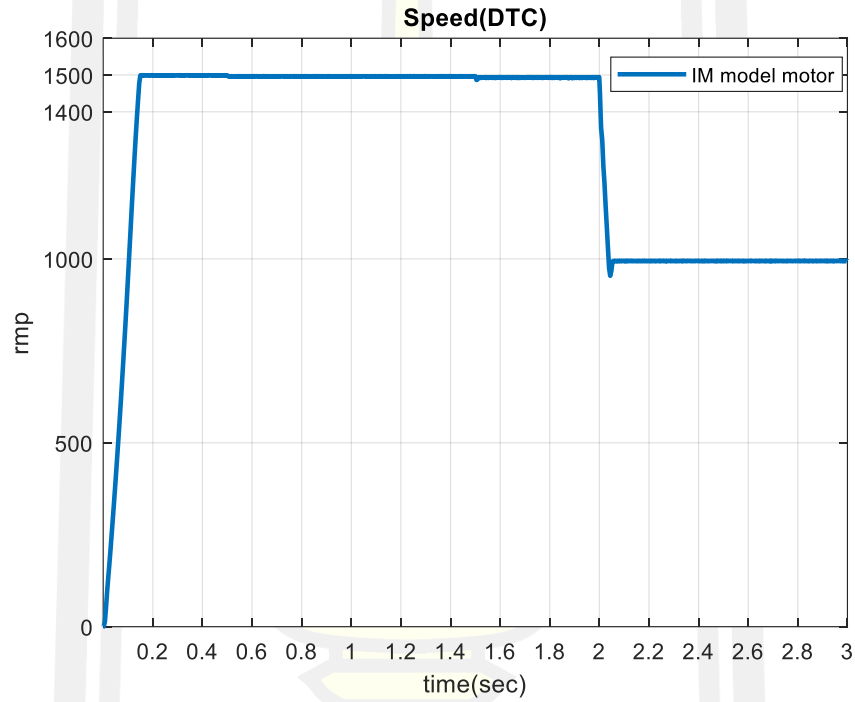
- กำหนดให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาที โดยไม่มีโหลด
- กำหนดโหลดที่ 5 นิวตัน-เมตร ที่ 0.5 วินาที
- เพิ่มโหลดเป็น 10 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 1.5 วินาที
- ลดความเร็วลง 1000 รอบ/นาที ที่เวลา 2 วินาที

กรณีที่ 2

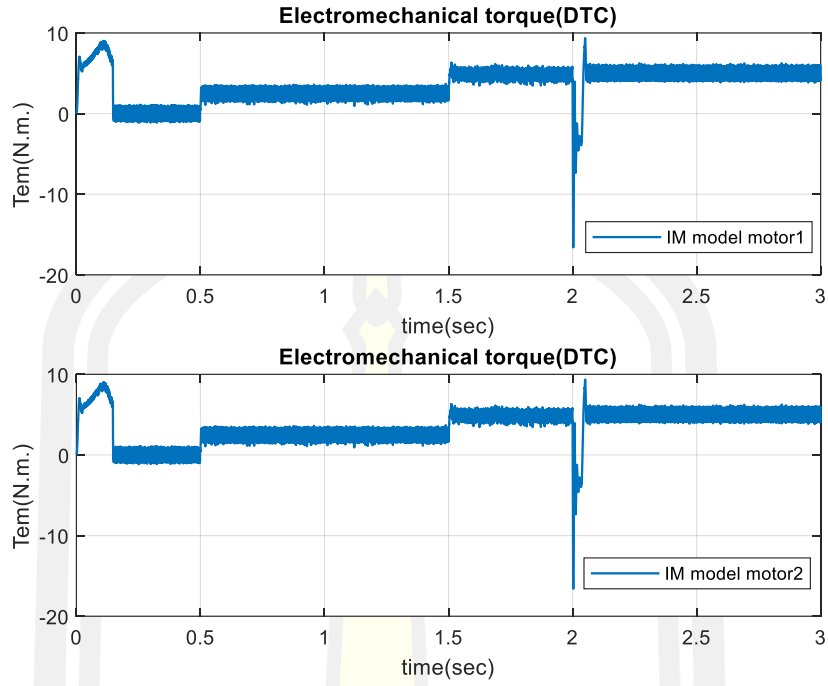
- กำหนดให้มอเตอร์ทำงานตัวเดียว จำลองผลที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาที

- กำหนดโหลดที่ 5 นิวตัน-เมตร ที่ 0.5 วินาที
- สตาร์ทมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่เวลา 1 วินาที
- เพิ่มโหลดเป็น 10 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 1.5 วินาที
- ลดความเร็วลง 1000 รอบ/นาที ที่เวลา 2 วินาที

ผลการจำลองสถาณการณ์ กรณีที่ 1

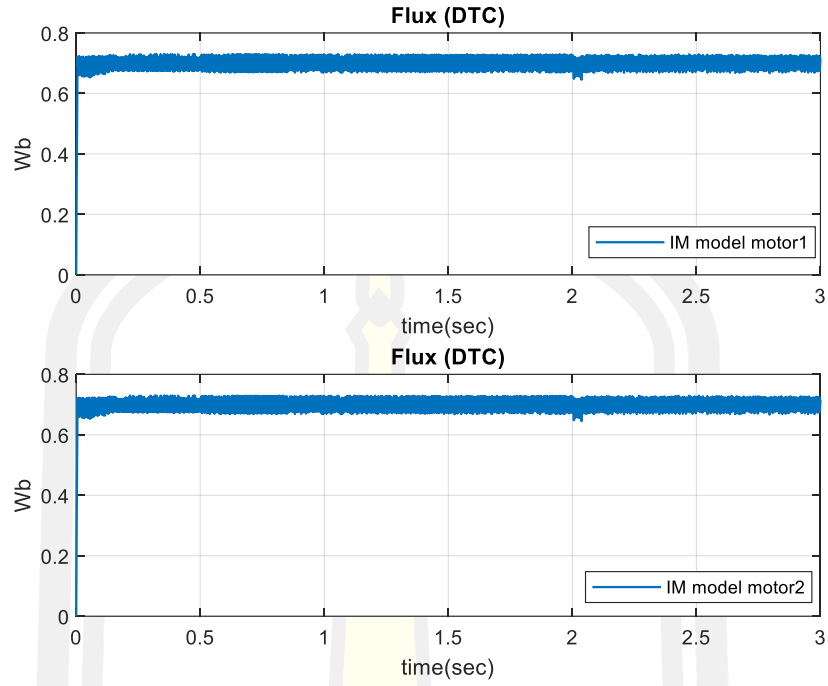


ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**101 ค่าความเร็วเทียบกับเวลา ของการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส

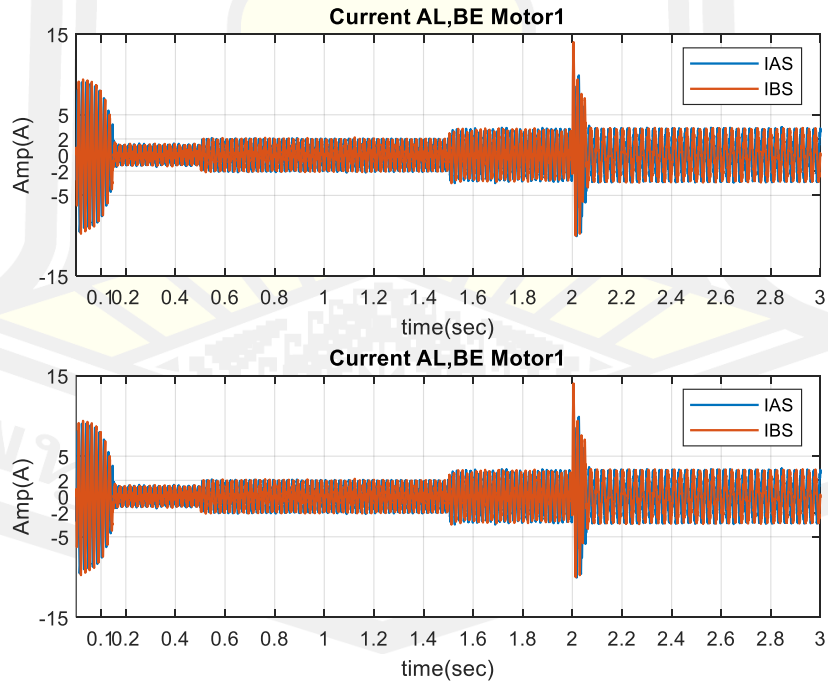


.

ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.102 ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_{em}) เทียบกับเวลา
ของการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส

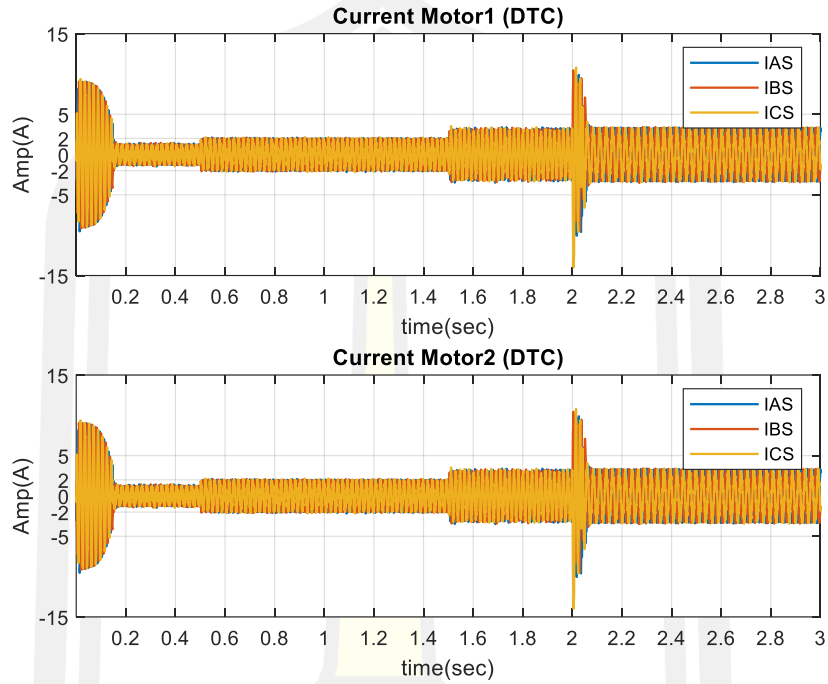


ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.103 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดสเตเตอร์บนแกน
ของการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส



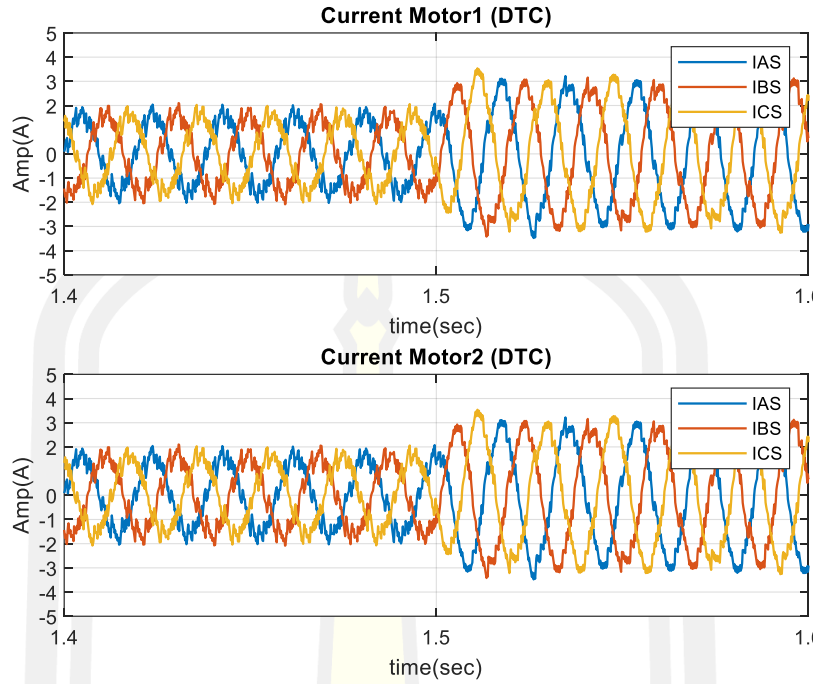
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.104 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน $\alpha\beta$

ของการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส

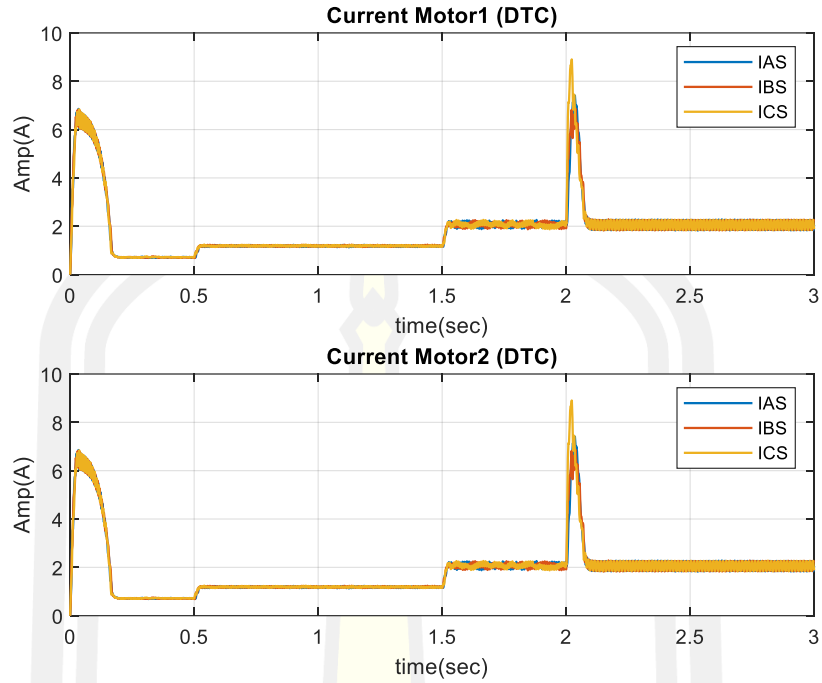


ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.105 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC

ของการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส

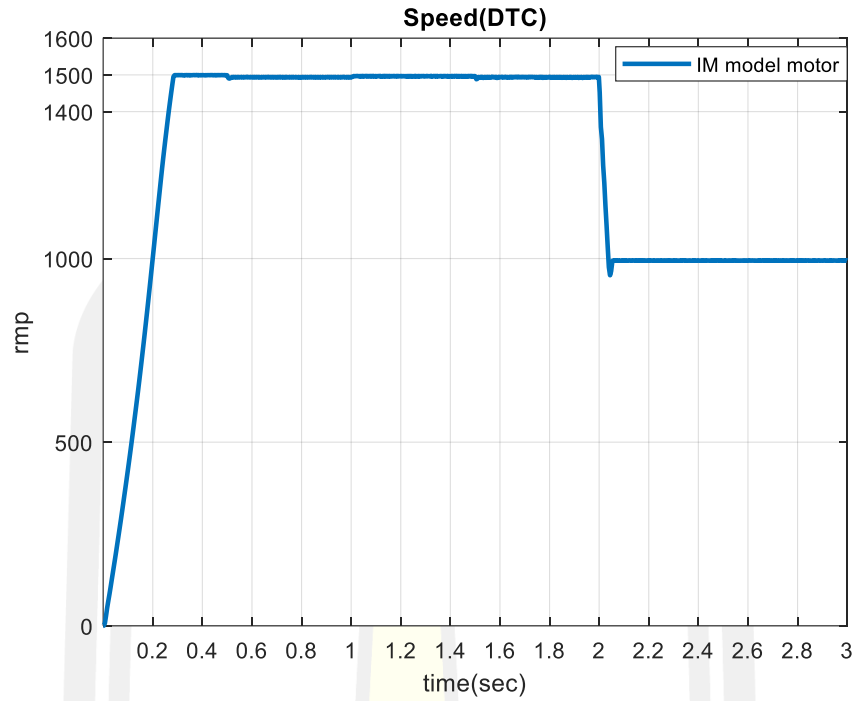


ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.106 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC ของการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส

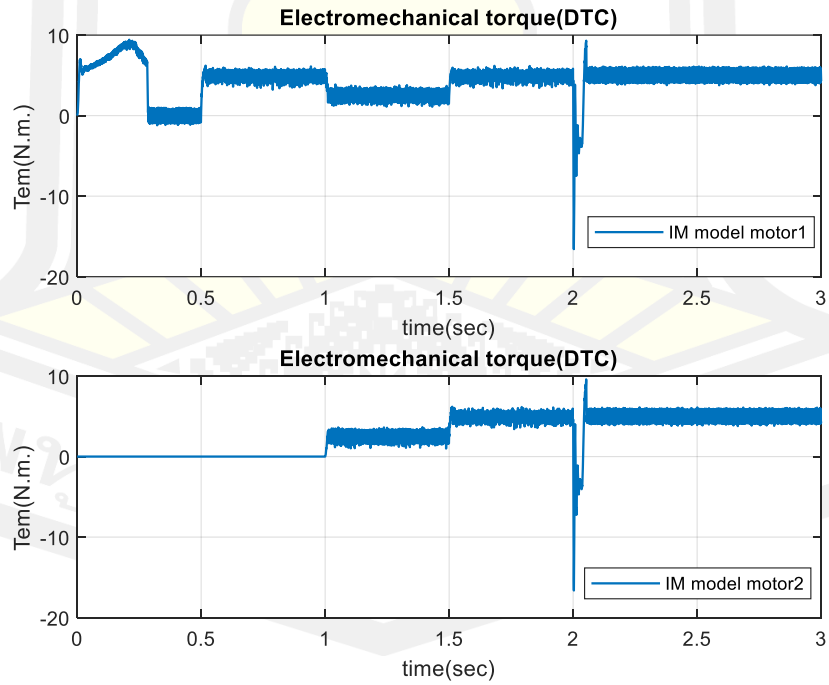


ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**107 กระแส RMS ของขดลวดสเตเตอร์ที่เฟส A ของการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส

ผลการจำลองสถาณการณ์ กรณีที่ 2

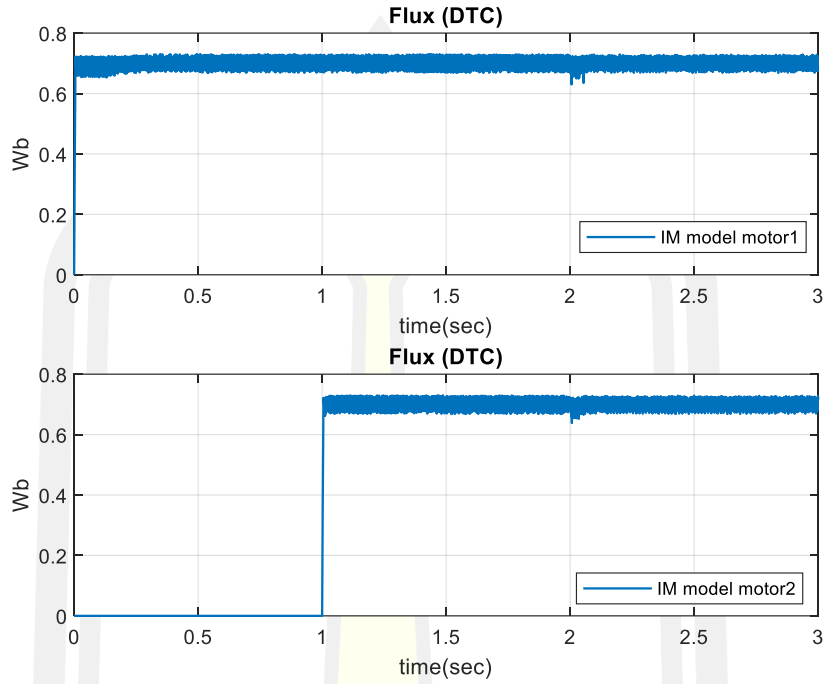


ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**108 ค่าความเร็วเทียบกับเวลา
ของการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส

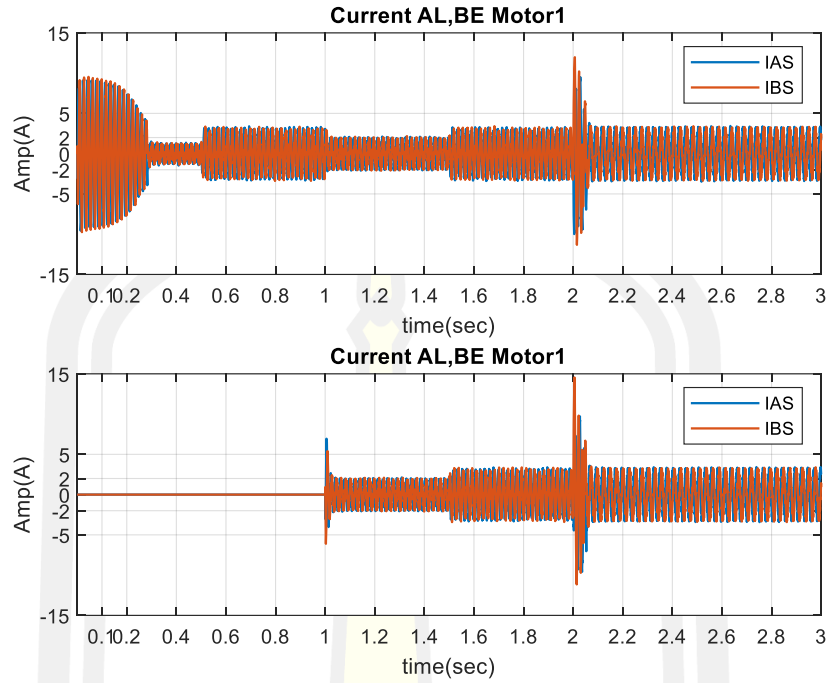


ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**109 ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_{em}) เทียบกับเวลา

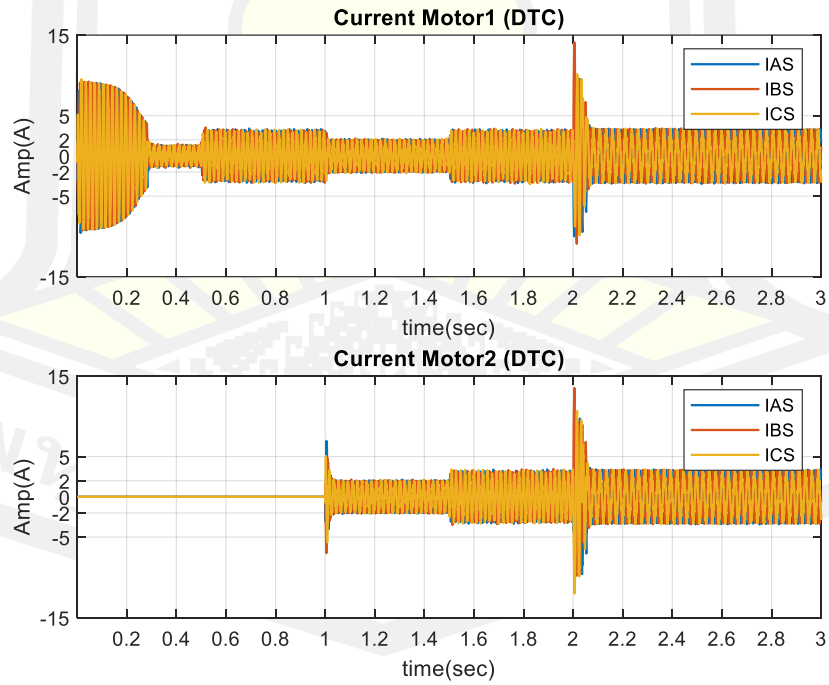
ของการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส



ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.110 ฟลักซ์เชื่อมโยงที่ขดลวดสเตเตอร์
ของการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส

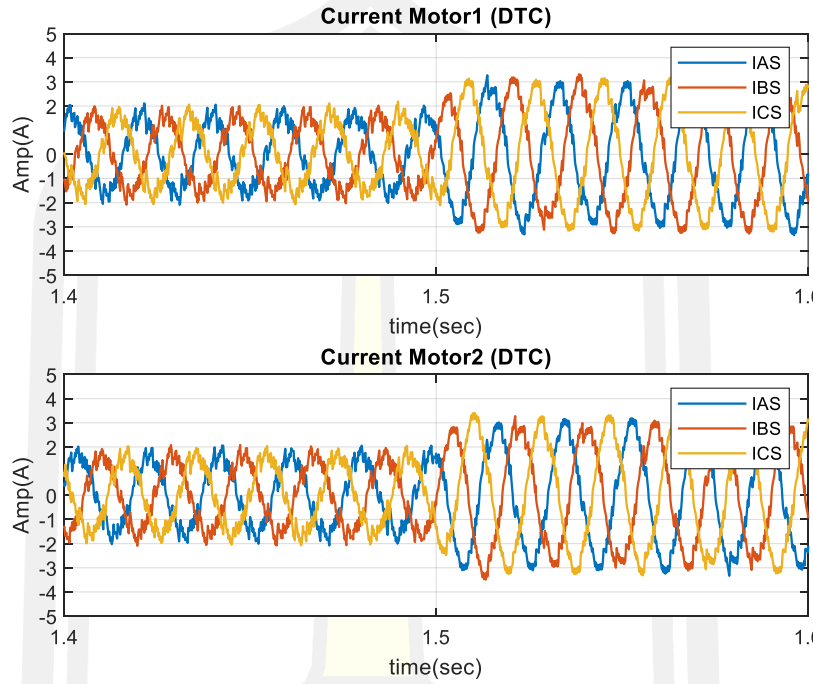


ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.111 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน $\alpha\beta$ ขององการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส



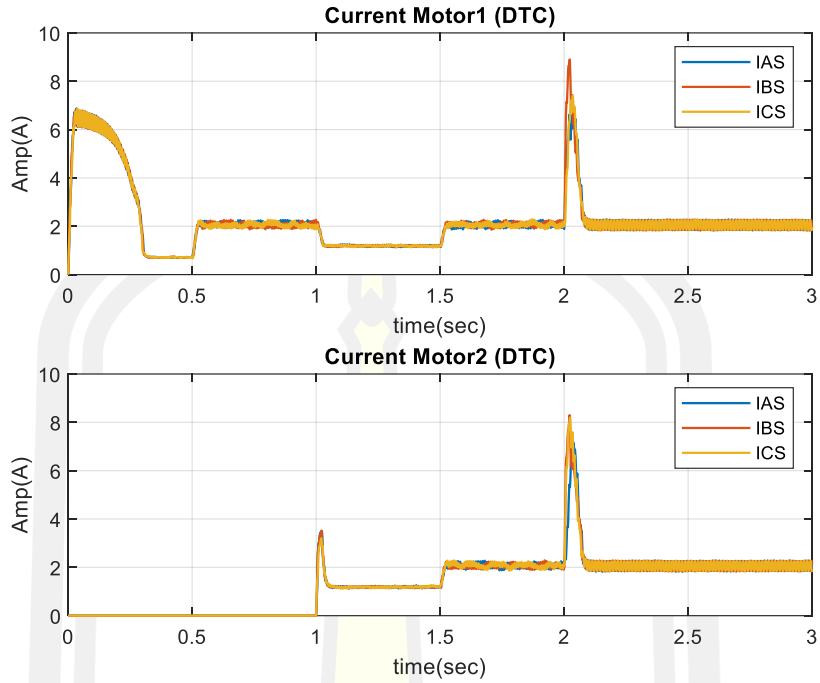
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.112 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC

ของการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส



ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.113 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC

องการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส



ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**114 กระแส RMS ของขดลวดสเตเตอร์ที่เฟส A ของการควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส

ผลการจำลองเริ่มกรณีที่ 1 ผลการจำลองสถาณการณ์จากเงื่อนไขการจำลอง กำหนดให้มอเตอร์เริ่มเดินเครื่องมอเตอร์พร้อมกันทั้ง 2 ตัว กำหนดให้ความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 1500 รอบต่อนาที ที่เวลา 1 วินาที จ่ายโหลดให้มอเตอร์ เท่ากับ 5 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 1 วินาที จากนั้นเพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์ 10 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 2 วินาที ผลการทดสอบแสดงดังภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**101 ถึง ภาพประกอบ Error**! No text of specified style in document.**107 จะเห็นว่ามอเตอร์ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่ ที่เวลา $t = 0.1476$ วินาที โดยไม่มีการพุ่งเกิน จากนั้นจ่ายโหลดให้กับมอเตอร์ 5 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 0.5 วินาที กระแสในแกน $\alpha\beta$ ของมอเตอร์ตัวที่ 1และตัวที่ 2 เพิ่มขึ้นจาก 0.711 A เป็น 1.197 A เพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์ 10 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 2 วินาที ซึ่งกระแสในแกน $\alpha\beta$ เพิ่มขึ้นเป็น 2.08 A จากนั้นลดความเร็วลงเหลือ 1000 รอบต่อนาที ที่เวลา 2 วินาที ซึ่งความเร็วของมอเตอร์ก็สามารถรักษาระดับให้คงที่ได้ตามที่กำหนด จะเห็นว่ามอเตอร์ทั้งสองตัวจะช่วยกันรับภาระโหลดที่เพิ่มขึ้น กระแสบนแกน $\alpha\beta$ ก็น้อยกว่าตอนให้มอเตอร์รับภาระโหลดตัวเดียว

ผลการจำลองกรณีที่ 2 แสดงดังภาพประกอบ Error! **No text of specified style in document.**108 ถึง ภาพประกอบ Error! **No text of specified style in document.**114 สตาร์ทมอเตอร์ตัวเดียว กำหนดความกำหนดให้ความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 1500 รอบต่อนาที จะเห็นว่ามอเตอร์ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่ ที่เวลา $t = 0.2846$ วินาที โดยไม่มีการพุ่งเกิน จากนั้นจ่ายโหลดให้กับมอเตอร์ 5 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 0.5 วินาที กระแสในแกน $\alpha\beta$ ของมอเตอร์ตัวที่ 1 เพิ่มขึ้นจาก 0.7162 A เป็น 2.161 A ความเร็วของมอเตอร์ยังคงรักษาระดับได้ที่ 1500 รอบต่อนาที จากนั้นสตาร์ทมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่เวลา 1 วินาที กระแสในแกน $\alpha\beta$ ของมอเตอร์เป็น 1.195 A เพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์ 10 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 1.5 วินาที กระแสในแกน $\alpha\beta$ ของมอเตอร์เป็น 2.094 A จากนั้นลดความเร็วลงเหลือ 1000 รอบต่อนาที ที่เวลา 2 วินาที แต่ความเร็วของมอเตอร์ก็สามารถรักษาระดับให้คงที่ได้

จากผลการจำลองทั้ง 2 กรณีจะเห็นว่าตัวควบคุมแบบ DTC สามารถควบคุมได้ทั้งความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ แต่ค่าแรงบิดและฟลักซ์ที่โรเตอร์มีการกระเพื่อมค่อนข้างมากดังนั้นจึงมีแนวคิดที่นำตัวควบคุมฟัซซีลอจิกมาช่วยปรับปรุงสมรรถนะให้ดีขึ้น

4.4 การทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมของการขับของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกด้วยการจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB

การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกสำหรับระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ในบทนี้จะทำการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมด้วยการจำลองในโปรแกรม MATLAB สำหรับการควบคุมระบบควบคุมแบบวงปิดจะแยกการออกแบบตัวควบคุมเป็นสองลูป คือ ลูปการควบคุมฟลักซ์และแรงบิด ลูปการควบคุมความเร็วรอบ การควบคุมฟลักซ์และแรงบิดด้วยฟัซซี่ลอจิก การควบคุมควบคุมฟลักซ์และแรงบิด ควบคุมด้วยฟัซซี่ลอจิกโดยการออกแบบได้ออกแบบให้มี 3 อินพุต 1 เอาต์พุต ตัวแปรเงื่อนไขในส่วนของอินพุตประกอบไปด้วย ความผิดพลาดของสเตเตอร์ฟลักซ์ $(e\psi)$ ค่าความผิดพลาดของแรงบิด (eT_e) และตำแหน่งเซกเตอร์ (θ) ตัวแปรเงื่อนไขในส่วนของเอาต์พุตคือ สถานะการสวิตช์เวกเตอร์แรงดัน (U) โครงสร้างของระบบควบคุมของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ แสดงดัง
ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**115

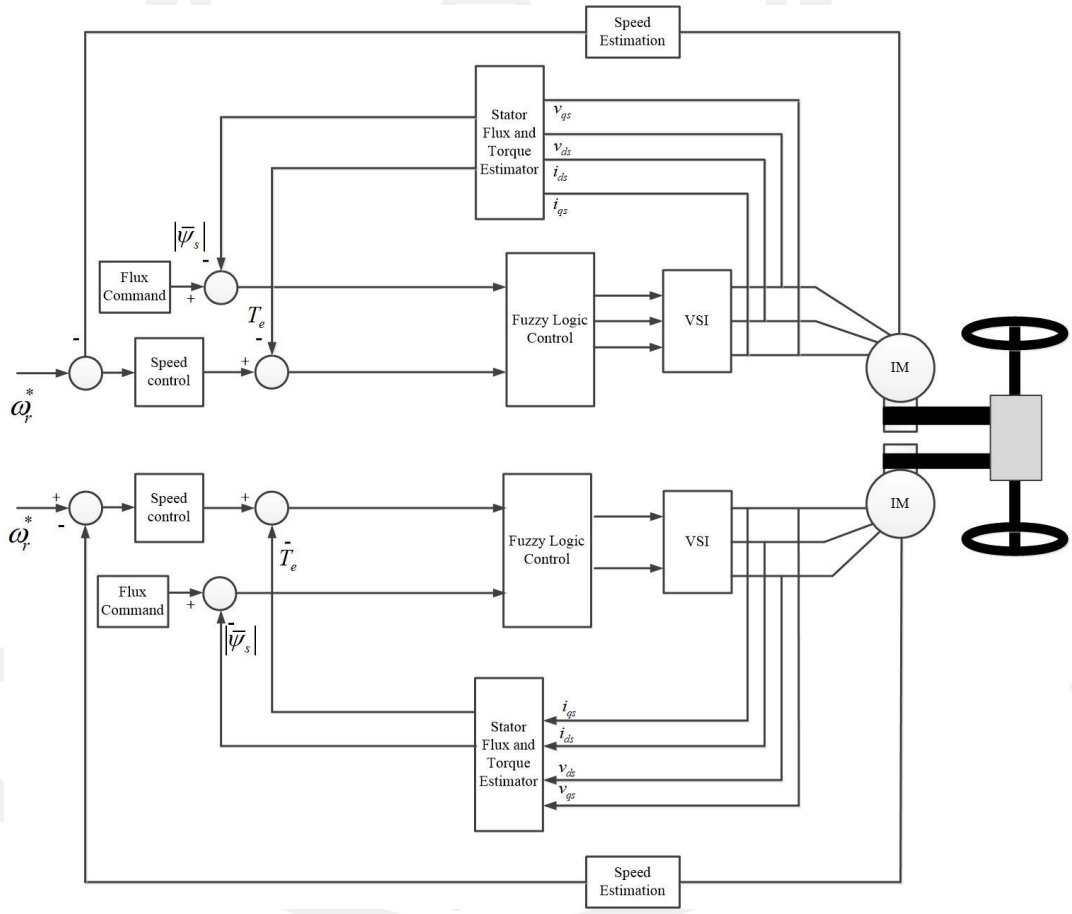
กำหนดเงื่อนไขของการจำลองสถาณการณ์ของระบบควบคุมของการขับของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก ดังนี้

กรณีที่ 1

- กำหนดให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาที โดยไม่มีโหลด
- กำหนดโหลดที่ 5 นิวตัน-เมตร ที่ 0.5 วินาที
- เพิ่มโหลดเป็น 10 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 1.5 วินาที
- ลดความเร็วลง 1000 รอบ/นาที ที่เวลา 2 วินาที

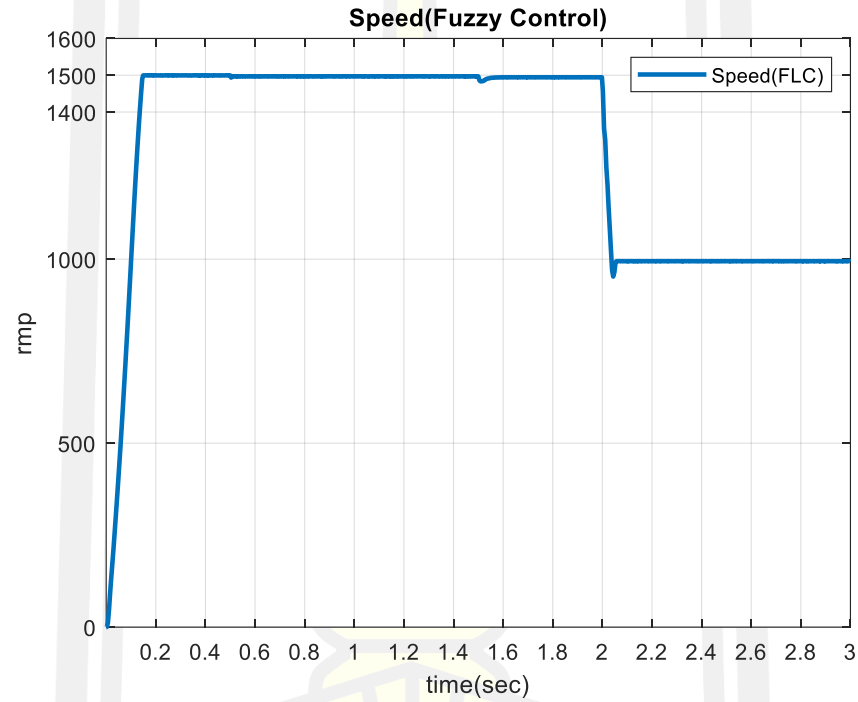
กรณีที่ 2

- กำหนดให้มอเตอร์ทำงานตัวเดียว จำลองผลที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาที
- กำหนดโหลดที่ 5 นิวตัน-เมตร ที่ 0.5 วินาที
- สตาร์ทมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่เวลา 1 วินาที
- เพิ่มโหลดเป็น 10 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 1.5 วินาที

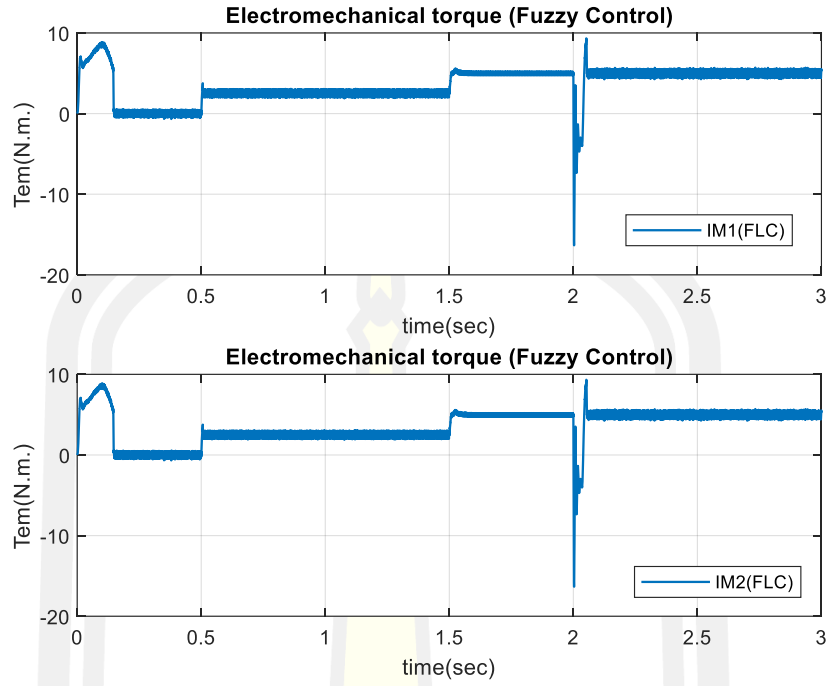


ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**115 โครงสร้างของระบบควบคุมของการขับของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่
ด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก

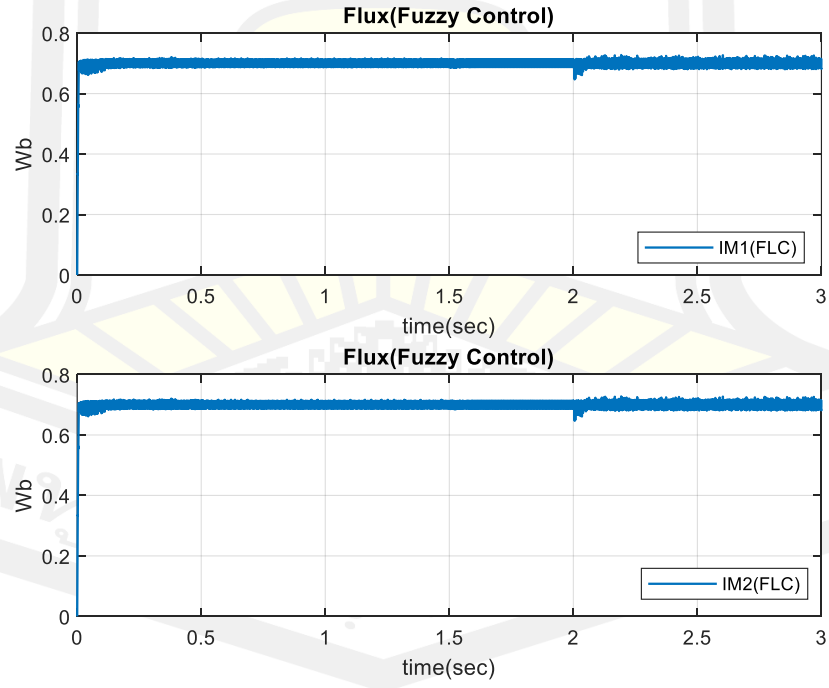
ผลการจำลองสถาณการณ์กรณีที่ 1



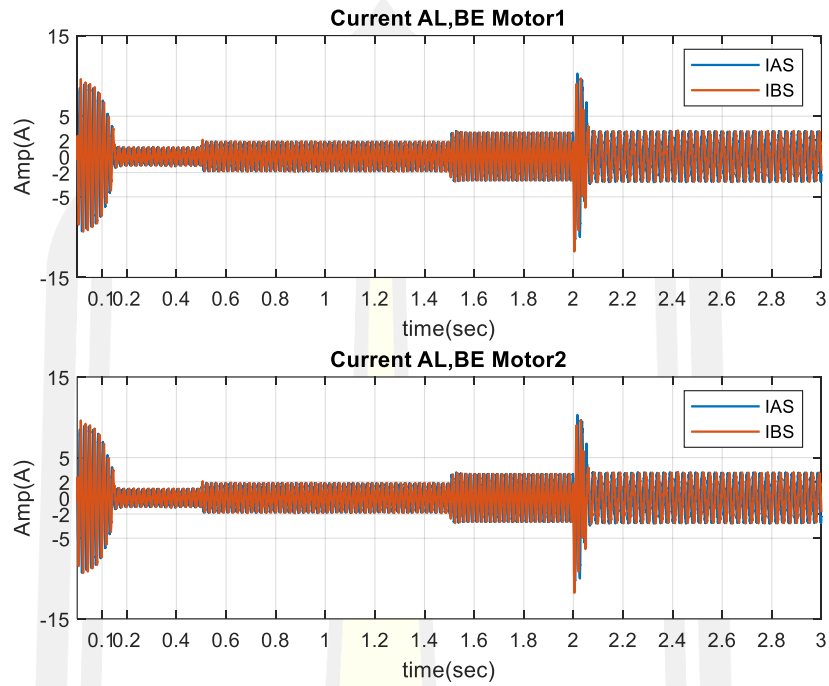
ภาพประกอบ **Error! No text of specified style in document.**116 ค่าความเร็วเทียบกับเวลาของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก



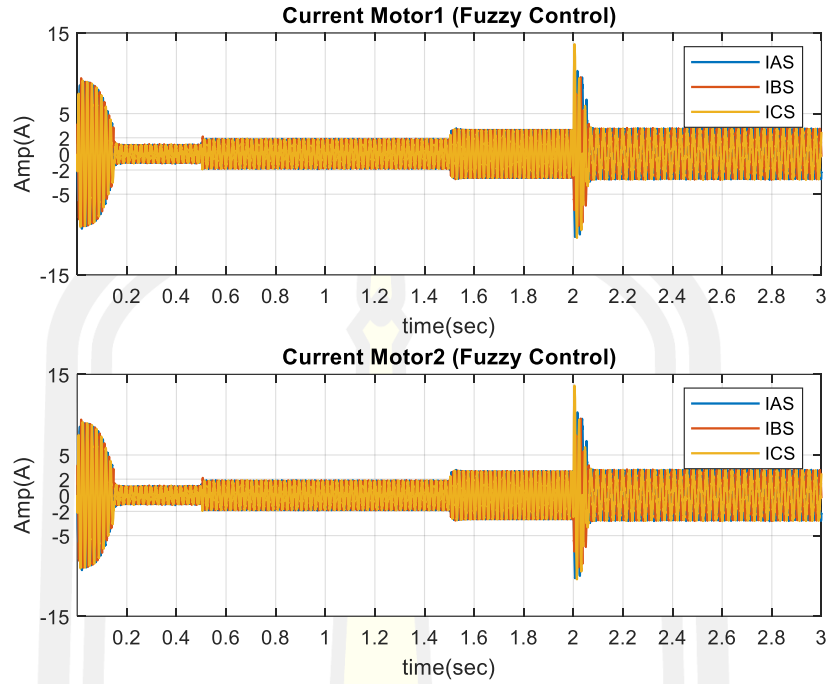
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.117 ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_{em}) เทียบกับเวลาของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก



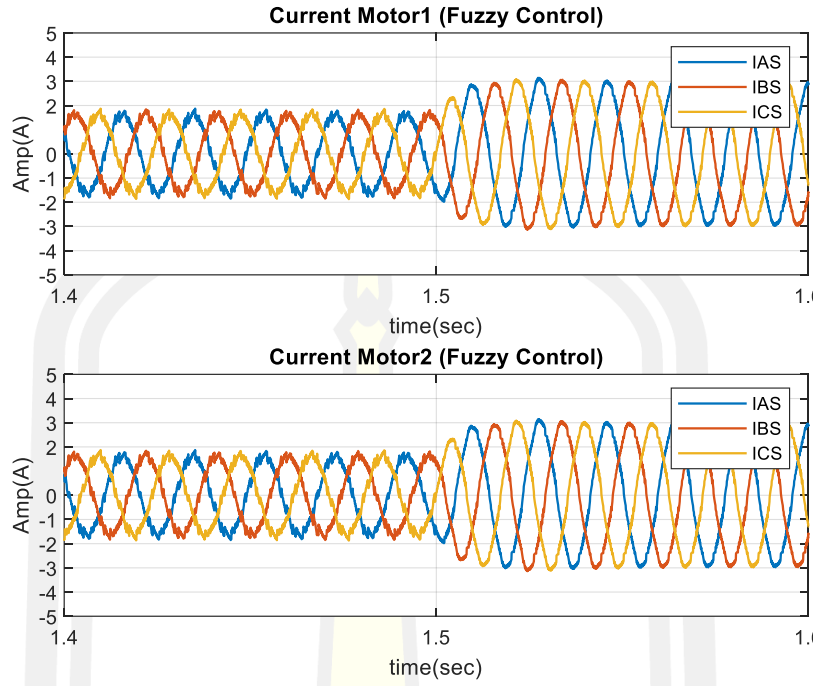
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.118 ฟลักซ์เชื่อโยงขดลวดสเตเตอร์ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก



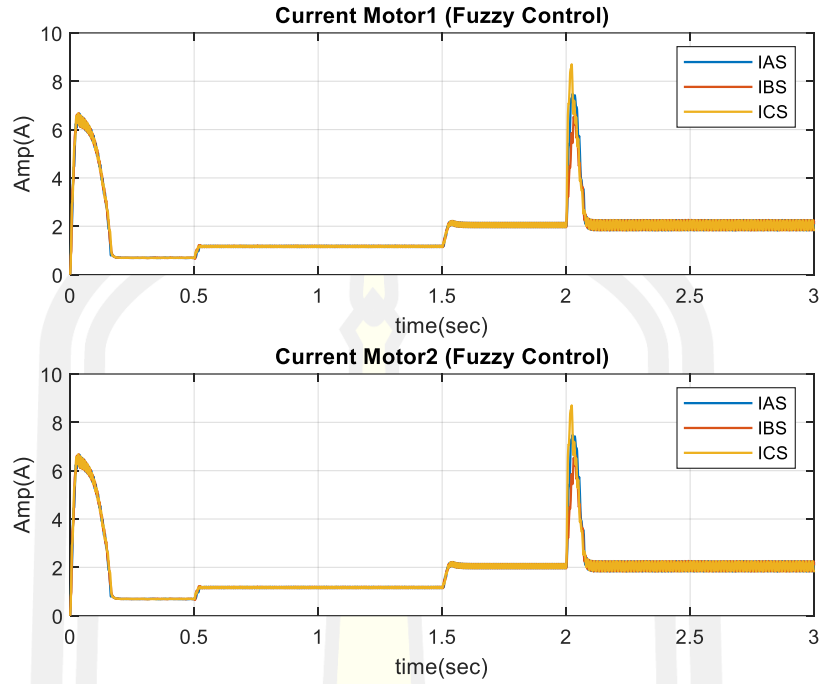
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.119 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน $\alpha\beta$ ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก



ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.120 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

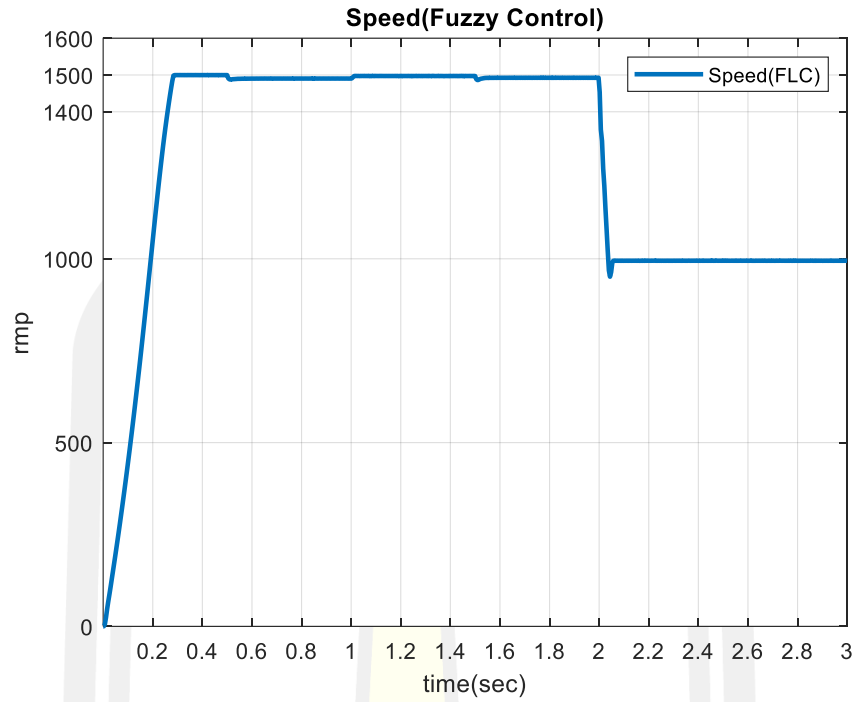


ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.121 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

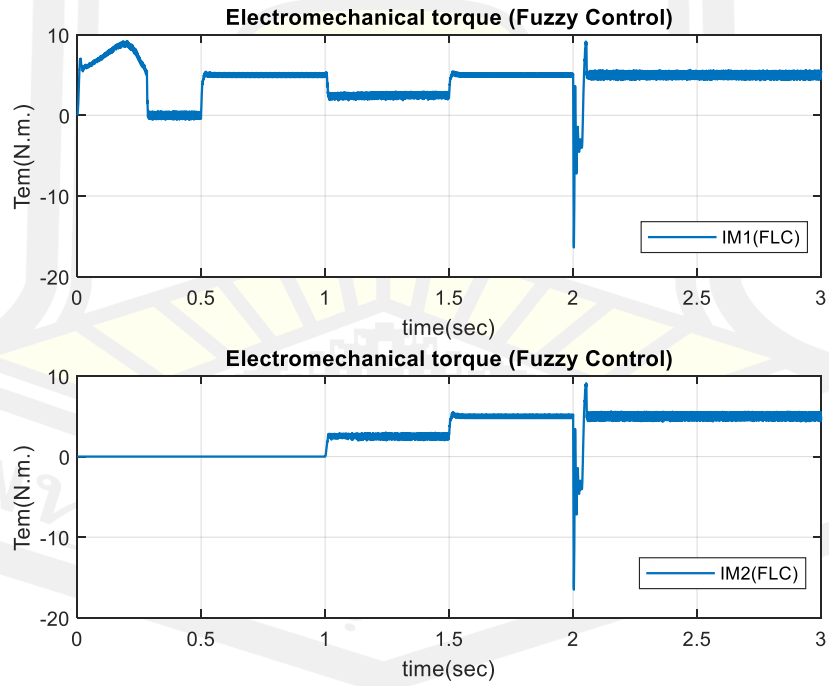


ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.122 กระแส RMS ของขดลวดสเตเตอร์ที่เฟส A ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

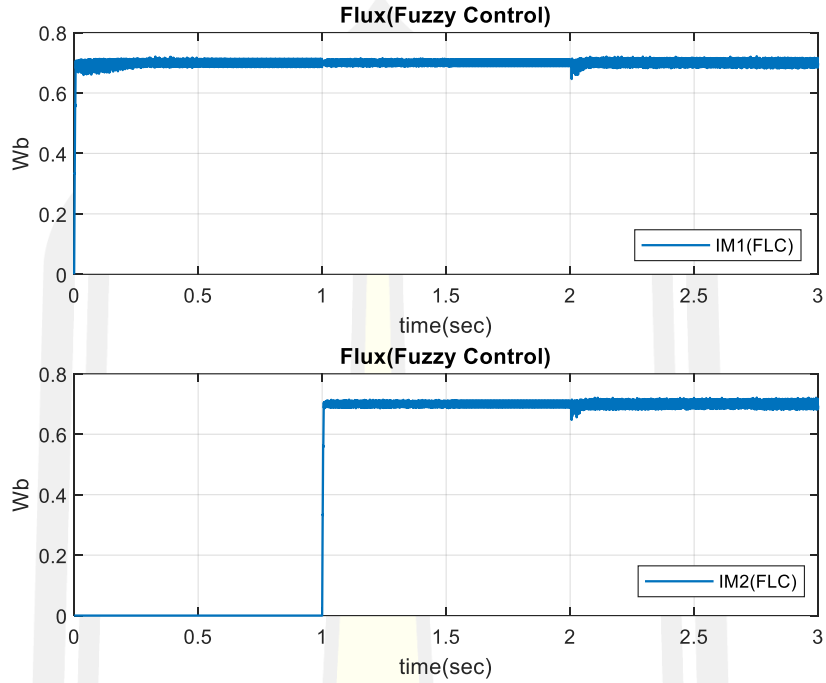
ผลการจำลองสถาณการณ์กรณีที่ 2 ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก



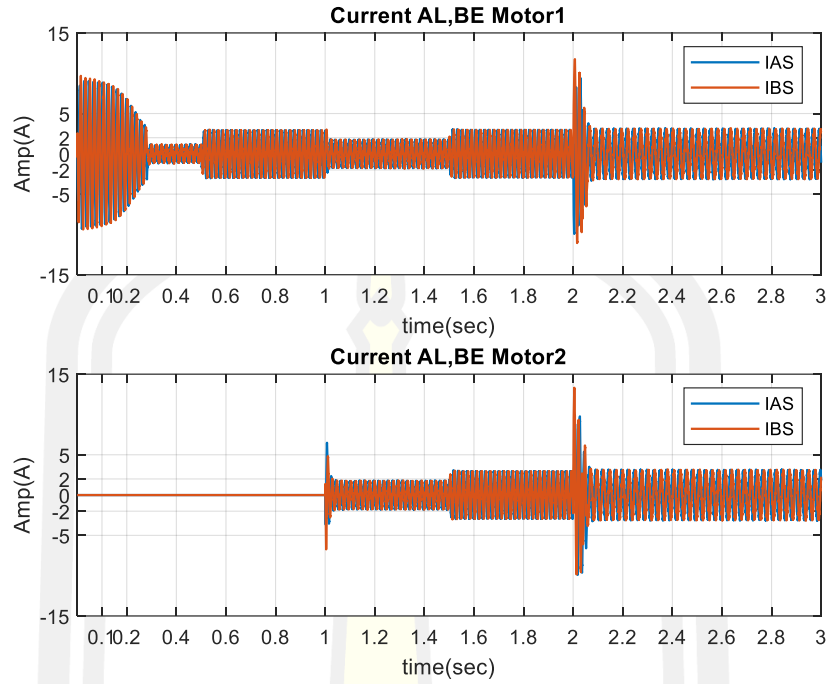
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.123 ค่าความเร็วเทียบกับเวลาของการควบคุมของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก



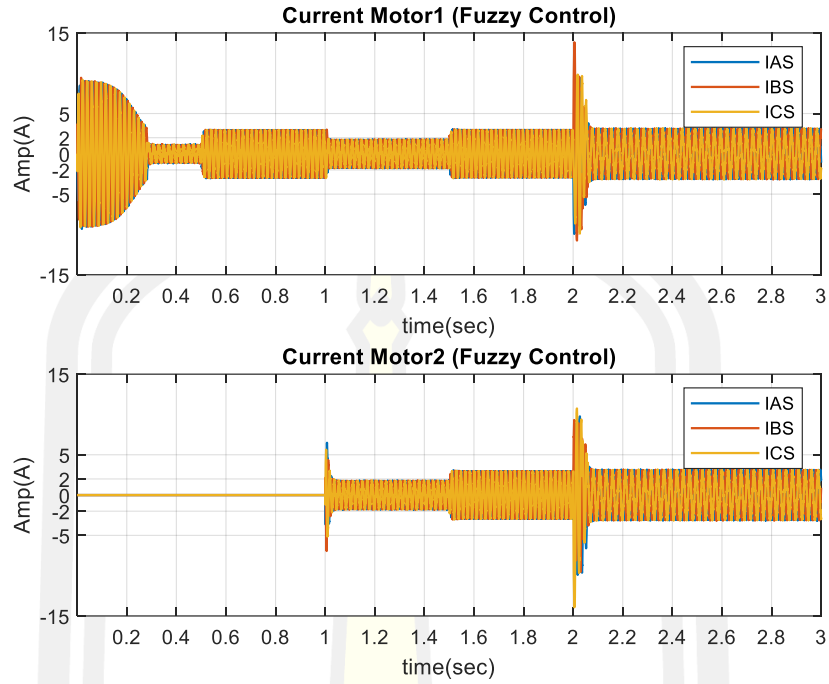
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.124ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_{em}) เทียบกับเวลาของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก



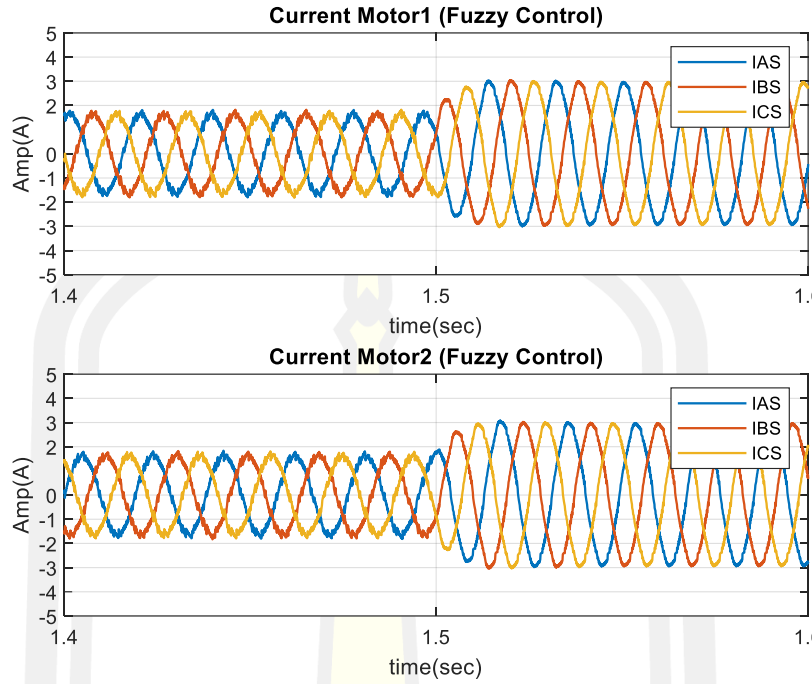
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.125 ฟลักซ์เชื่อมโยงขดลวดสเตเตอร์ ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก



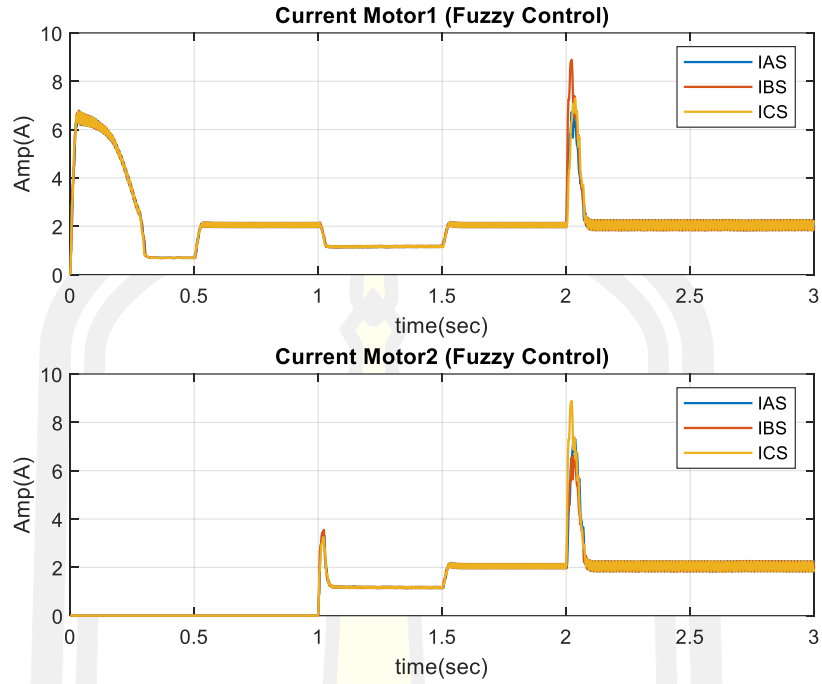
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.126 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน $\alpha\beta$ ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก



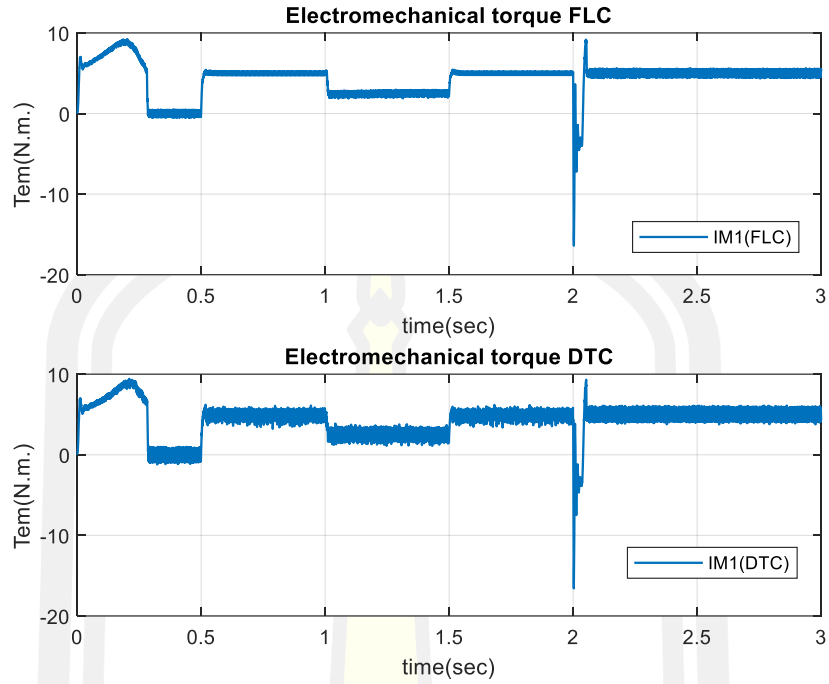
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.127 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก



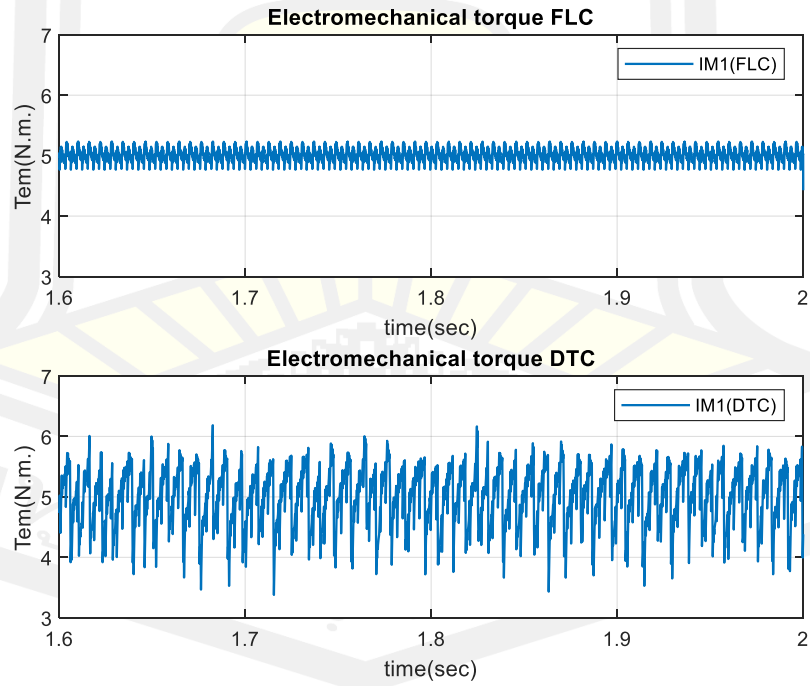
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.128 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก



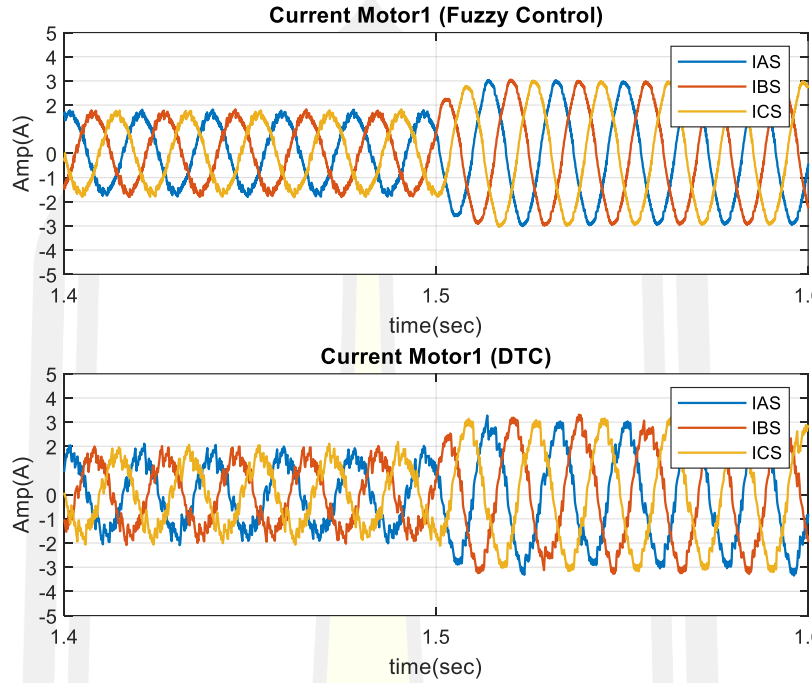
ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.129 กระแส RMS ของขดลวดสเตเตอร์ที่เฟส Aของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก



ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.130 ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_{em}) เทียบกับเวลาของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิกกับการควบคุมด้วยฮิสเตอริซิส



ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.131 ค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_{em}) เทียบกับเวลาของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิกกับการควบคุมด้วยฮิสเตอริซิส



ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.132 กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC
ของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิกกับการควบคุมด้วยฮิสเตอริซิส

ลองสถาณการณ์ของระบบควบคุมของการขับของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิก กรณีที่ 1 ผลการจำลองสถาณการณ์จากเงื่อนไขการจำลอง กำหนดให้มอเตอร์เริ่มเดินเครื่องมอเตอร์พร้อมกันทั้ง 2 ตัว กำหนดให้ความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 1500 รอบต่อนาที ที่เวลา 1 วินาที จ่ายโหลดให้มอเตอร์ เท่ากับ 5 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 1 วินาที จากนั้นเพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์ 10 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 2 วินาที ผลการทดสอบแสดงดังภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.116 ถึง ภาพประกอบ Error! No text of specified style in document.122-จะเห็นว่ามอเตอร์ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่ ที่เวลา $t = 0.1460$ วินาที โดยไม่มีการพุ่งเกิน จากนั้นจ่ายโหลดให้กับมอเตอร์ 5 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 0.5 วินาที กระแสในแกน ABC ของมอเตอร์ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 เพิ่มขึ้นจาก 0.7059 A เป็น 1.185 A เพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์ 10 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 2 วินาที ซึ่งกระแสในแกน ABC เพิ่มขึ้นเป็น 2.018 A จากนั้นลดความเร็วลงเหลือ 1000 รอบต่อนาที ที่เวลา 2 วินาที ซึ่งความเร็วของมอเตอร์ก็สามารถรักษาระดับให้คงที่ได้

ตามที่กำหนด จะเห็นว่ามอเตอร์ทั้งสองตัวจะช่วยกันรับภาระโหลดที่เพิ่มขึ้น กระแสบนแกน ABC ก็น้อยกว่าตอนให้มอเตอร์รับภาระโหลดตัวเดียว

ผลการจำลองกรณีที่ 2 แสดงดังภาพประกอบ Error! **No text of specified style in document.**123 ถึง ภาพประกอบ Error! **No text of specified style in document.**129 สตาร์ทมอเตอร์ตัวเดียว กำหนดความกำหนดให้ความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 1500 รอบต่อนาที จะเห็นว่ามอเตอร์ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่ ที่เวลา $t = 0.2846$ วินาที โดยไม่มีการพุ่งเกิน จากนั้นจ่ายโหลดให้กับมอเตอร์ 5 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 0.5 วินาที กระแสในแกน ABC ของมอเตอร์ตัวที่ 1 เพิ่มขึ้นจาก 0.6868 A เป็น 2.138 A ความเร็วของมอเตอร์ยังคงรักษาระดับได้ที่ 1500 รอบต่อนาที จากนั้นสตาร์ทมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่เวลา 1 วินาที กระแสในแกน ABC ของมอเตอร์ทั้งสองตัวเป็น 1.167 A เพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์ 10 นิวตัน-เมตร ที่เวลา 1.5 วินาที กระแสในแกน ABC ของมอเตอร์เป็น 2.138 A จากนั้นลดความเร็วลงเหลือ 1000 รอบต่อนาที ที่เวลา 2 วินาที ซึ่งความเร็วของมอเตอร์ก็สามารถรักษาระดับให้คงที่ได้

จากผลการจำลองทั้ง 2 กรณี เมื่อนำมาเปรียบเทียบระหว่างการควบคุม DTC และการควบคุมด้วย FLC จะเห็นว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก สามารถควบคุมได้ทั้งความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ พิจารณาภาพประกอบ Error! **No text of specified style in document.**130 ถึง ภาพประกอบ Error! **No text of specified style in document.**132 แสดงค่าแรงบิดทางไฟฟ้า (T_{em}) เทียบกับเวลาของวิธีควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส และวิธีควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ จะเห็นว่าที่เวลา 1.5-2 วินาที ค่าการกระเพื่อมของแรงบิดต่ำสุด ของวิธีควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส เท่ากับ 3.377 นิวตัน-เมตร ค่าการกระเพื่อมของแรงบิดสูงสุดเท่ากับ 6.186 นิวตัน-เมตร ค่าการกระเพื่อมของแรงบิดต่ำสุดของวิธีควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฟัซซีลอจิก เท่ากับ 4.766 นิวตัน-เมตร ค่าการกระเพื่อมของแรงบิดสูงสุดเท่ากับ 5.232 นิวตัน-เมตร พิจารณาภาพประกอบ Error! **No text of specified style in document.**132 แสดงค่ากระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกน ABC เทียบกับเวลาของวิธีควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส และวิธีควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ จะเห็นว่าค่ากระแสบนแกน ABC ด้วยตัวควบคุมฟัซซี่มีการกระเพื่อมน้อยกว่าควบคุมแบบฮิสเตอริซิส

4.5 สรุป

จากการจำลองการทำงานของการขับของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ด้วยการควบคุมแรงบิดโดยตรง แบ่งเป็น 2กรณีคือ การจำลองให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาที โดยไม่มีโหลด จากนั้นที่

เวลา 0.5 วินาทีเพิ่มโหลดเป็น 5 นิวตัน-เมตรและที่ 1.5 วินาที เพิ่มโหลดเป็น 10 นิวตัน-เมตร ลดความเร็ววของมอเตอร์ลงเหลือ 1000 รอบ/นาที ที่เวลา 2 วินาที การจำลองให้มอเตอร์ทำงานตัวเดียวหมุนที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาที โดยไม่มีโหลด จากนั้นที่เวลา 0.5 วินาทีเพิ่มโหลดเป็น 5 นิวตัน-เมตร สตาร์ทมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่เวลา 1 วินาที และ เพิ่มโหลดเป็น 10 นิวตัน-เมตร ที่ 1.5 วินาที และลดความเร็ววของมอเตอร์ลงเหลือ 1000 รอบ/นาที โดยวิธีควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส และวิธีควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ จากผลการจำลองสรุปได้ว่า วิธีควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยตัวควบคุมฟัซซี่สามารถลดการกระเพื่อมของแรงบิด และลดการกระเพื่อมของกระแสสเตเตอร์ได้ดีกว่าวิธีควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการจำลองการทำงานของการขับของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ด้วยการควบคุมแรงบิดโดยตรง แบ่งเป็น 2 กรณีคือ การจำลองให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาที โดยไม่มีโหลด จากนั้นที่เวลา 0.5 วินาทีเพิ่มโหลดเป็น 5 นิวตัน-เมตรและที่ 1.5 วินาที เพิ่มโหลดเป็น 10 นิวตัน-เมตร ลดความเร็ววของมอเตอร์ลงเหลือ 1000 รอบ/นาที ที่เวลา 2 วินาที การจำลองให้มอเตอร์ทำงานตัวเดียวหมุนที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาที โดยไม่มีโหลด จากนั้นที่เวลา 0.5 วินาทีเพิ่มโหลดเป็น 5 นิวตัน-เมตร สตาร์ทมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่เวลา 1 วินาที และ เพิ่มโหลดเป็น 10 นิวตัน-เมตร ที่ 1.5 วินาที และลดความเร็ววของมอเตอร์ลงเหลือ 1000 รอบ/นาที

โดยวิธีควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส และวิธีควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ จากผลการจำลองพบว่า การควบคุมทั้งสองวิธีสามารถสามารถควบคุมให้การทำงานของระบบการขับของมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ให้ความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์เป็นไปตามที่ต้องการ เมื่อพิจารณาค่าการกระเพื่อมของกระแสสเตเตอร์และการกระเพื่อมของแรงบิดพบว่าวิธีควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยตัวควบคุมฟัซซี่สามารถลดลดการกระเพื่อมได้ดีกว่าวิธีควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยฮิสเตอริซิส

5.2 อภิปรายผล

จากการออกแบบระบบควบคุมการขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ ผู้วิจัยได้ออกแบบให้ระบบควบคุมแบบเป็นแบบควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ โดยออกแบบให้มี 3 อินพุต 1 เอาต์พุต ตัวแปรเงื่อนไขในส่วนของอินพุตประกอบไปด้วย ความผิดพลาดของสเตเตอร์ฟลักซ์ $(e\psi)$ ค่าความผิดพลาดของแรงบิด (eT_e) และตำแหน่งเซกเตอร์ (θ) ตัวแปรเงื่อนไขในส่วนของเอาต์พุต คือ สถานะการสวิตช์เวกเตอร์แรงดัน (U) เพื่อควบคุมการขับเคลื่อนของระบบมอเตอร์คู่ให้มีสมรรถนะที่ดี ให้เป็นไปตามความมุ่งหมายของงานวิจัย กล่าวคือ สามารถควบคุมแรงบิดและความเร็วของระบบการขับมอเตอร์คู่ให้เป็นไปตามที่ต้องการและยังลดการกระเพื่อมของกระเพื่อมของกระแสสเตเตอร์และการกระเพื่อมของแรงบิดได้ด้วย

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. การหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสนั้นมีความจำเป็นอย่างสูง ในการควบคุมแรงบิดโดยตรงจำเป็นต้องทดสอบหาพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น เพื่อที่จะทำให้การจำลองผลการควบคุมหรือการควบคุมมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

2. การหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสนั้นสามารถใช้วิธีการค้นหาค่าที่เหมาะที่สุดมาช่วยในการค้นหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์

3. ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีสามารถใช้วิธีการค้นหาค่าที่เหมาะที่สุด อย่างเช่น การค้นหาค่าเหมาะที่สุด มาช่วยในการค้นหาฟังก์ชันความเป็นสมาชิกหรือกฎฟัซซีได้

บรรณานุกรม

[1] Z. Boulghasoul, A. Elbacha, and E. Elwarraki, “Combined Vector Control and Direct Torque Control.” pp. 1–6, 2010.

[2] C. Chakraborty and Y. Hori, “Fast Efficiency Optimization Techniques for the Indirect Vector-Controlled Induction Motor Drives,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 4. pp. 1070–1076, 2003, doi: 10.1109/TIA.2003.814550.

[3] T. Ito, Y. Nakamura, K. Mohri, and T. Uchiyama, “Accurate low-speed and torque controls for induction motor with secondary current feedback using MI sensor installed in shaft hole,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 10. pp. 3515–3517, 2006, doi: 10.1109/TMAG.2006.879667.

[4] L. Ben-Brahim, “Improvement of the stability of the V/f controlled induction motor drive systems,” *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, vol. 2. pp. 859–864, 1998.

[5] A. T. Y. A. Kentaro Suzuki, Suzuo Saito, Toshiaki Kudor, “Stability Improvement of VF Controlled Large Capacity Voltage Source Inverter Fed Induction Motor.pdf.” 2006.

[6] W. Chen, D. Xu, R. Yang, Y. Yu, and Z. Xu, “A novel stator voltage oriented V/F control method capable of high output torque at low speed,” *Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. pp. 228–233, 2009, doi: 10.1109/PEDS.2009.5385840.

[7] R. J. Kerkman, T. M. Rowan, and D. Leggate, “Indirect Field-Oriented Control of an Induction Motor in the Field-Weakening Region,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, no. 4. pp. 850–857, 1992, doi: 10.1109/28.148451.

[8] and Z. M. B. Zhang, Y. Lu, *Bifurcations and chaos in indirect field-oriented control of induction motors*. 2004.

[9] R. Bojoi, P. Guglielmi, and G. M. Pellegrino, “Sensorless direct field-oriented control of three-phase induction motor drives for low-cost applications,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 2. pp. 475–481, 2008, doi: 10.1109/TIA.2008.916735.

[10] J. K. Kang and S. K. Sul, “New direct torque control of induction motor for minimum torque ripple and constant switching frequency,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 5. pp. 1076–1082, 1999, doi: 10.1109/28.793368.

[11] K. K. Shyu, L. J. Shang, H. Z. Chen, and K. W. Jwo, “Flux compensated direct

torque control of induction motor drives for low speed operation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 6. pp. 1608–1613, 2004, doi: 10.1109/TPEL.2004.836618.

[12] B. El Badsi, B. Bouzidi, and A. Masmoudi, "DTC scheme for a four-switch inverter-fed induction motor emulating the six-switch inverter operation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 7. pp. 3528–3538, 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2225449.

[13] T. I and N. T., "A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 22, no. 5. pp. 820–827, 1986.

[14] M. A. Johnson, *PID Control Technology*. .

[15] S. Pati, A. Panda, and S. Mohanty, "A comparative performance study of scalar controlled induction motor using PID controller and fuzzy PID controller," *2014 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies, ICCPCT 2014*. pp. 904–909, 2014, doi: 10.1109/ICCPCT.2014.7054798.

[16] L. A. Zadeh, "Fuzzy logic Compution with word.pdf," *IEEE Trans. FUZZY Syst.*, vol. 4, 1996.

[17] L. A. Zadeh, "From computing with numbers to computing with words-from manipulation of measurements to manipulation of perceptions!," *Advances in Soft Computing*, vol. 6. pp. 3–37, 2000, doi: 10.1007/978-3-7908-1841-3_1.

[18] B. Tabbache, A. Kheloui, and M. E. H. Benbouzid, "An adaptive electric differential for electric vehicles motion stabilization," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 1. pp. 104–110, 2011, doi: 10.1109/TVT.2010.2090949.

[19] P. Panmuang, T. Thongsan, N. Suwapaet, J. Laohavanich, and C. Photong, "A novel dual motor drive system for three wheel electric vehicles," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1941. 2018, doi: 10.1063/1.5028077.

[20] A. Haddoun, M. E. H. Benbouzid, D. Diallo, R. Abdessemed, J. Ghouili, and K. Srairi, "A loss-minimization DTC scheme for EV induction motors," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 1. pp. 81–88, 2007, doi: 10.1109/TVT.2006.889562.

[21] J. J. Eckert, L. C. A. Silva, E. S. Costa, F. M. Santiciolli, F. G. Dedini, and F. C. Corrêa, "Electric vehicle drivetrain optimisation," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 7, no. 1. pp. 32–40, 2017, doi: 10.1049/iet-est.2016.0022.

[22] C. W. de Silva, *Conventional and Intelligent Control*. .

[23] T. F. Chan and K. Shi, “Applied Intelligent Control of Induction Motor Drives,” *Applied Intelligent Control of Induction Motor Drives*. 2011, doi: 10.1002/9780470825587.

[24] E. A. A.Arias, J.L.Romeral, “Fuzzy logic direct torque control.pdf.” pp. 253–258, 2000.

[25] M. N. Uddin, T. S. Radwan, and M. A. Rahman, “Performances of fuzzy-logic-based indirect vector control for induction motor drive,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 5. pp. 1219–1225, 2002, doi: 10.1109/TIA.2002.802990.

[26] M. A. Hannan, J. A. Ali, P. J. Ker, A. Mohamed, M. S. H. Lipu, and A. Hussain, “Switching techniques and intelligent controllers for induction motor drive: Issues and recommendations,” *IEEE Access*, vol. 6. pp. 47489–47510, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2867214.

[27] S. Omatu, M. Yoshioka, and T. Kosaka, “PID control of speed and torque of electric vehicle,” *3rd International Conference on Advanced Engineering Computing and Applications in Sciences, ADVCOMP 2009*. pp. 157–162, 2009, doi: 10.1109/ADVCOMP.2009.31.

[28] Jian-Bo Cao and Bing-Gang, “Fuzzy-Logic-Based Sliding-Mode Controller Design for Position-Sensorless Electric Vehicle.pdf,” vol. 24, pp. 2068–2377, 2009.

[29] O. Ellabban, J. Van Mierlo, and P. Lataire, “Direct torque controlled space vector modulated induction motor fed by a Z-source inverter for electric vehicles,” *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. 2011, doi: 10.1109/PowerEng.2011.6036568.

[30] K. T. Chau, “Electric Vehicle Machines and Drives,” *Electric Vehicle Machines and Drives*. 2015, doi: 10.1002/9781118752555.

[31] Chee-Mun Ong, *Dynamic Simulations of Electric Machinery : Using MATLAB/SIMULINK*. PRENTICE HALL PTR, 1997.

[32] A. Muñoz-García, T. A. Lipo, and D. W. Novotny, “A New induction motor v/f control method capable of high-performance regulation at low speeds,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 4. pp. 813–821, 1998, doi: 10.1109/28.703982.

[33] T. Yamada, K. Matsuse, and K. Sasagawa, “Sensorless control of direct-field-oriented induction motor operating at high efficiency using adaptive rotor flux

observer," *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, vol. 2. pp. 1149–1154, 1996.

[34] H. Kubota and K. Matsuse, "Speed Sensorless Field-Oriented Control of Induction Motor with Rotor Resistance Adaptation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, no. 5. pp. 1219–1224, 1994, doi: 10.1109/28.315232.

[35] J. N. Nash, "Direct torque control, induction motor vector control without an encoder," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 2. pp. 333–341, 1997, doi: 10.1109/28.567792.

[36] D. Casadei, G. Serra, and A. Tani, "Implementation of a direct torque control algorithm for induction motors based on discrete space vector modulation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, no. 4. pp. 769–777, 2000, doi: 10.1109/63.849048.

[37] H. Sudheer, S. F. Kodad, and B. Sarvesh, "Direct Torque and Flux control of induction machine using Fuzzy Logic controller," *Proceeding of IEEE - 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics, IEEE - AEEICB 2016*. pp. 193–197, 2016, doi: 10.1109/AEEICB.2016.7538271.

[38] D. W. Bernhart, D. T. Schlick, I. Olschewski, A. Busse, J. Garrelfs, and International Energy Agency, "E-mobility Index Q1 2017," *IEA Publications*, no. January. p. 5, 2017, doi: 10.1787/9789264278882-en.

[39] สราวุฒิ สุจิตจร, "ฟัซซี่ลอจิกกับระบบควบคุม," *วารสารเทคโนโลยีสุรนารี*, pp. 171–196, 2538.

[40] วิไลพร เงินบาท, "การชดเชยการเสียดทานและสภาพไม่เป็นเชิงเส้นในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาดจิ๋วด้วยฟัซซีลอจิก," มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2551.

[41] M. S. and M. Nishida, "Fuzzy control of model car," *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 16, pp. 103–113, 1985.

[42] W. Ngernbaht, K. Areerak, and S. Sujitjorn, "Resonance and friction compensations in a micro hard drive," *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*, vol. 6, no. 5. pp. 736–745, 2009.

[43] สุดารัตน์ ขวัญอ่อน, "โครงสร้างการควบคุมแบบนิวโร-ตาบู-ฟัซซี่," มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2547.

[44] E. H. Mamdani and S. Assilian, “An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller,” *Int. J. Man. Mach. Stud.*, vol. 7, pp. 1–13, 1975.

[45] C. Schauder, “Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motors Without Rotational Transducers,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, no. 5. pp. 1054–1061, 1992, doi: 10.1109/28.158829.

[46] I. Benlaloui, S. Drid, L. Chrifi-Alaoui, and M. Ouriagli, “Implementation of a new MRAS speed sensorless vector control of induction machine,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, no. 2. pp. 588–595, 2015, doi: 10.1109/TEC.2014.2366473.

[47] C. Lascu, I. Boldea, and F. Blaabjerg, “A modified direct torque control for induction motor sensorless drive,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 1. pp. 122–130, 2000, doi: 10.1109/28.821806.

[48] Y. S. Lai and J. H. Chen, “A new approach to direct torque control of induction motor drives for constant inverter switching frequency and torque ripple reduction,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 16, no. 3. pp. 220–227, 2001, doi: 10.1109/60.937200.

[49] B. Tabbache, M. E. H. Benbouzid, A. Kheloui, and J. M. Bourgeot, “Virtual-sensor-based maximum-likelihood voting approach for fault-tolerant control of electric vehicle powertrains,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 3. pp. 1075–1083, 2013, doi: 10.1109/TVT.2012.2230200.

[50] P. P. D. Rai, Ms. Tripti, “Generalized modeling model of three phase induction motor.pdf.”

[51] M. Jafarboland and J. Faiz, “Modelling and designing controller of two different mechanical coupled motors for enhancement of underwater vehicles performance,” *IET Electric Power Applications*, vol. 4, no. 7. pp. 525–538, 2010, doi: 10.1049/iet-epa.2010.0005.

[52] K. G. Simba, F. L. Quilumba, and N. V. Granda, “Parameter estimation of a three-phase induction motor from direct starting stator transient measurements,” *2020 Ieee Andescon, Andescon 2020*. 2020, doi: 10.1109/ANDESCON50619.2020.9272098.

[53] C. Djamila and M. Yahia, “Direct Torque Control Strategies of Induction Machine: Comparative Studies,” *Direct Torque Control Strategies of Electrical Machines*. 2021, doi: 10.5772/intechopen.90199.

[54] K. S. and S. B. H, Sudheer, “Direct Torque and Flux control of Induction Machine using Fuzzy Logic controller,” *Control of Induction Motors*. pp. 137–

157, 2001, doi: 10.1016/b978-012701510-1/50008-8.

[55] P. J. Koratkar and A. Sabnis, “Comparative analysis of different control approaches of direct torque control induction motor drive,” *2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies, ICICICT 2017*, vol. 2018-Janua. pp. 831–835, 2018, doi: 10.1109/ICICICT1.2017.8342672.

[56] น. ชูชิต, “อัลกอริทึมการควบคุมแรงบิดโดยตรงไร้เซนเซอร์สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบแยกเฟส,” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

[57] “MITSUBISHI ELECTRIC,” *MITSUBISHI ELECTRIC*. https://www.meath-co.com/web/product_list2.asp?series_no=42&model_no=42&language=en&gn=01mitsu&sn=002&mn=003&code_no=291#291.

[58] Arduinoall, “Current sensor.” https://www.arduinoall.com/product/162/20a-current-sensor-module-acs712-20a?fbclid=IwAR17Y95sAg_IHrts0SteNgSSc6XNG7HCUOD2PF3RYvQqhf07Vav9o6Sf90E.

[59] Gearbest, “UNI-UT52 Digital Multimeter.” https://www.gearbest.com/multimeters-fitting/pp_357775.html?vip=21144721&gclid=Cj0KCQjwuZDtBRDvARIsAPXFx3CEcUx_K8B_pdM6ROBKDL1wXi1sHyKuHhlT42edDx4j1BcWBBeMEhwaAjy0EALw_wcB.

[60] “Oscilloscope GDS-2074A,” *TEM Electronic Components*. https://www.tme.eu/en/details/gds-2074a/digital-oscilloscopes/gw-instek/.

[61] ภ. สวัสดิ์นะที, “การสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม”, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	วิไลพร เงินบาท
วันเกิด	6 ธันวาคม พศ.2525
สถานที่เกิด	กาญจนบุรี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	117/2 หมู่ 7 ต.พระลับ อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	พนักงานในสถาบันอุดมศึกษา
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ประวัติการศึกษา	หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถานศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีที่จบการศึกษา 2551 หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถานศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีที่จบการศึกษา 2547 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ จากสถานศึกษา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม