

การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวต่อขานานด้วยพีชซีลอจิก  
และการประยุกต์กับเครื่องลับพีช

นายศักดิ์ระวี ระวีกุล

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2552

**CONTROL OF SINGLE-PHASE INDUCTION MOTORS  
IN PARALLEL CONNECTION USING FUZZY LOGIC  
AND AN APPLICATION TO A CROP  
CHOPPING MACHINE**

**Sakrawee Raweekul**

**A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2009**

การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวต่อขานด้วยฟิซซีลจิก  
และการประยุกต์กับเครื่องสับฟิซ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับขึ้นบัญชีสำหรับการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กิติ อรรถกมล)

ประธานกรรมการ

(ศ. น.ท. ดร.สรวิศ สุจิตจร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. น.อ. ดร.สมชาย หาญกล้า)

กรรมการ

(รศ. ดร.โกสินทร์ จันทน์)

กรรมการ

(อ. ดร.นิมิต ชมนาวัง)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูเกียรติ ลิ้มปัญญา)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วราภรณ์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศักดิ์ระวี ระวิกุล : การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวต่อขนานด้วยฟuzzy logic และการประยุกต์กับเครื่องสับฟิช (CONTROL OF SINGLE-PHASE INDUCTION MOTORS IN PARALLEL CONNECTION USING FUZZY LOGIC AND AN APPLICATION TO A CROP CHOPPING MACHINE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรารุณี สุจิตจร, 193 หน้า.

การวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาองค์ความรู้การขับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวพิกัดกำลังต่ำ ที่นำมาต่อขนานกันหลายตัวและขับด้วยอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันชุดเดียว ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์อาศัยหลักการโครงแบบ d-q เป็นพื้นฐานดำเนินการ จำลองผล เพื่อหาผลตอบสนองพลวัตของระบบที่ได้พัฒนาขึ้น องค์ความรู้ดังกล่าวนี้ได้นำมาประยุกต์กับเครื่องสับฟิชผลทางการเกษตรที่ได้พัฒนาขึ้น เครื่องจักรดังกล่าวประกอบด้วยใบมีดสามชุด แต่ละชุดขับด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว มอเตอร์ทั้งสามตัวต่อขนานกันรับกำลังจากอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันตัวเดียว การควบคุมเครื่องสับฟิชดังกล่าวกระทำเพื่อคุมค่าอัตราเร็วรอบของมอเตอร์ทั้งสามตัวไว้ที่ 1200 รอบต่อนาที โดยยอมให้มีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวของอัตราเร็วได้  $\pm 5\%$  ตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นเป็นตัวควบคุมฟิชซีแบบจัดการตัวเอง ใช้กฎการควบคุมฟิชซีแบบ 2 อินพุต และ 1 เอาต์พุต องค์ประกอบของฮาร์ดแวร์ที่ใช้ทดสอบแนวคิดประกอบด้วยเครื่องสับฟิชอินเวอร์เตอร์ (Frecon 3.7 kW) และไมโครคอนโทรลเลอร์ (ARM7024) จากการทดสอบเครื่องจักรด้วยระบบควบคุมฟิชซีที่ได้พัฒนาขึ้น โดยการสับฟิชผลทางการเกษตรหลากชนิด ให้ผลอย่างน่าพึงพอใจดังที่ได้อธิบายไว้ในวิทยานิพนธ์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

SAKRAWEE RAWEEKUL : CONTROL OF SINGLE-PHASE INDUCTION MOTORS IN PARALLEL CONNECTION USING FUZZY LOGIC AND AN APPLICATION TO A CROP CHOPPING MACHINE. THESIS ADVISOR : PROF. WNG. CMDR. SARAWUT SUJITJORN, Ph.D., 193 PP.

#### CROP CHOPPING MACHINE/SELF-ORGANIZING FUZZY CONTROL

This research thesis has developed some new knowledge on driving multiple single-phase induction motors of fractional horsepower in parallel connection using a voltage-source inverter. Mathematical models based on the dq-frame system have been developed with corresponding simulation tasks carried out to investigate the system dynamic responses. The knowledge gained is applied to a novel agricultural crop chopping machine developed. The machine comprises three sets of blades each of which is driven by a single-phase induction motor. The three motors in parallel connection are fed by a single inverter. To control the chopping machine, the motor speeds are regulated to 1,200 rpm with  $\pm 5\%$  allowance of steady-state speed errors. The developed controller is a self-organizing fuzzy controller using two-input-single-output fuzzy rule sets. The main hardware components for testing the concepts include the crop chopping machine, an inverter (Frecon 3.7 kW) and a microcontroller (ARM7024). Testing of the machine with the developed fuzzy control to chop various kinds of crops renders very satisfactory results as the details are elaborated by this thesis.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2009

Student's Signature\_\_\_\_\_

Advisor's Signature\_\_\_\_\_

Co-advisor's Signature\_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรวิชัย สุจิตจร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนัชชัย กุลวรรณิชพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่เมตตาให้การอบรมสั่งสอน ชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน รวมถึงรองศาสตราจารย์ สุภชัย ประเสริฐสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดชา พวงดาวเรือง อาจารย์วิชัย ศรีสุรภัย และ คุณกัมภีร์ ศิริคะเนรัตน์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา และแนะนำความรู้ทางวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอบคุณ คุณอัญชุลี รักด่านกลาง และ คุณภัทรวรรณ สิทธิกวินกุล ที่ให้ความช่วยเหลือดูแลเรื่องเอกสาร และขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่อำนวยความสะดวกให้กับผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

ขอบคุณบริษัท A.P.Y Engineering และวิศวกรที่ปรึกษา ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านเทคนิคและข้อมูลที่เกี่ยวข้องสำหรับระบบฮาร์ดแวร์

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำในการทำวิจัย ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัย

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อวีระ คุณแม่จรัส ระวีกุล รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้ และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ศักดิ์ระวี ระวีกุล

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฅ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฒ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
<b>2 ปรีกัณฑ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 บทนำ.....	5
2.2 เครื่องสับพีช.....	5
2.3 การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานกันหลายตัว ด้วยอินเวอร์เตอร์เพียงชุดเดียว.....	7
2.4 การควบคุมอัตราเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยพีชซีลอจิก.....	9
2.5 สรุป.....	13
<b>3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว     ที่ต่อขนานกันหลายตัวสำหรับการจำลองผล.....</b>	<b>15</b>
3.1 บทนำ.....	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....16
3.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ที่ต่อขนานกัน $n$ ตัว.....29
3.4	การจำลองผล.....33
3.5	อภิปรายผล.....44
<b>4</b>	<b>การควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์ที่ต่อขนานกันหลายตัว</b>
	<b>ด้วยตัวควบคุมพีชซีแบบจัดการตัวเอง</b> .....45
4.1	บทนำ.....45
4.2	ระบบควบคุมแบบพีชซีลอจิก.....46
4.3	ระบบควบคุมพีชซีแบบจัดการตัวเอง.....47
4.4	การออกแบบตัวควบคุมพีชซีแบบจัดการตัวเองในงานวิจัยนี้.....48
4.5	สรุป.....58
<b>5</b>	<b>การจำลองผลระบบควบคุมการขับมอเตอร์ต่อขนาน</b> .....60
5.1	บทนำ.....60
5.2	การจำลองผลระบบควบคุมพีชซีแบบจัดการตัวเอง ขับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัว.....60
5.3	สรุป.....74
<b>6</b>	<b>เครื่องสับพีชผลทางการเกษตรและระบบควบคุม</b> .....75
6.1	บทนำ.....75
6.2	เครื่องสับพีชผลทางการเกษตร.....75
6.2.1	การทดสอบวัสดุ.....76
6.2.2	การทดสอบเหล็กเชื่อมสภาพ ก่อนและหลังผ่านกระบวนการ.....77
6.2.3	กระบวนการนำเหล็กเชื่อมสภาพกลับมาใช้ใหม่ และขึ้นรูปใบมีด.....81
6.2.4	เครื่องสับพีชผลทางการเกษตร.....85



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.3 ระบบควบคุม.....	93
6.3.1 วงจรตัวตรวจรู้อัตราเร็ว.....	94
6.3.2 วงจรถอดรหัสตัวตรวจรู้อัตราเร็ว.....	95
6.3.3 ตัวประมวลผลระบบควบคุม.....	97
6.3.4 วงจรขยายสัญญาณ.....	98
6.3.5 อินเวอร์เตอร์.....	99
6.4 โปรแกรมประมวลผลระบบควบคุม ด้วยตัวควบคุมพีซีแบบจัดการตัวเอง.....	100
6.5 สรุป.....	105
<b>7 การทดสอบระบบและอภิปรายผล.....</b>	<b>107</b>
7.1 บทนำ.....	107
7.2 ผลการทดสอบเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์.....	108
7.3 ผลทดสอบการขับ โหลด.....	112
7.4 การจำลองผลเลียนแบบการทดสอบจริง	
117	
7.5 อภิปรายด้านเสถียรภาพ.....	121
7.6 สรุป.....	127
<b>8 สรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>129</b>
8.1 บทสรุป.....	129
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	131
รายการอ้างอิง.....	132
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบหลักจากห้องปฏิบัติการ.....	134
ภาคผนวก ข. โปรแกรมพีซีแบบจัดการตัวเองสำหรับควบคุม การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ที่ต่อขนานกัน 3 ตัวด้วยอินเวอร์เตอร์ชุดเดียว.....	137

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค.	บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ และผลงานการจดสิทธิบัตรการประดิษฐ์.....	154
	1. Modelling and Simulation of Multiple Single - Phase Induction Motors in Parallel Operation.....	157
	2. Fuzzy Control of Parallel Induction Motors Drive.....	163
	3. Parallel-Connected Single-Phase Induction Motor.....	169
	4. แบบจำลองและการจำลองผลมอเตอร์เหนี่ยวนำ เฟสเดียวที่เชื่อมต่อหลายตัวแบบขนาน.....	177
ประวัติผู้เขียน.....		193

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	พารามิเตอร์ของมอเตอร์.....	37
3.2	ผลการจำลองในแต่ละสภาวะ.....	37
4.1	กฎการควบคุมฟuzzyในตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบธรรมดา.....	49
4.2	ฐานกฎฟuzzyของตัวควบคุมฟuzzyแบบจัดการตัวเอง.....	53
5.1	แสดงช่วงเวลาและขนาดของโหลดที่กระทำกับมอเตอร์แต่ละตัว.....	63
5.2	เปรียบเทียบผลการควบคุมอัตราเร็วขณะขับโหลด ระหว่างตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบธรรมดา กับตัวควบคุมฟuzzyจัดการตัวเอง.....	64
6.1	ผลการทดสอบสับหัวมันสำปะหลัง.....	77

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	เครื่องย่อยขนาดวัสดุพืชผลทางการเกษตรแบบใบมีดโยกกลับ.....	6
2.2	เครื่องย่อยขนาดหัวมันสำปะหลังเพื่อผลิตอาหารสัตว์.....	7
2.3	แผนภาพการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยตัวควบคุมพีซีลจิก.....	9
2.4	แผนภาพฟังก์ชันความเป็นสมาชิกภาพของอินพุตและเอาต์พุต.....	10
2.5	แผนภาพแสดงขั้นตอนทำงานของโปรแกรมควบคุมมอเตอร์.....	11
2.6	แผนภาพแสดงระบบควบคุมพีซีแบบสองชั้น.....	12
2.7	แผนภาพฟังก์ชันความเป็นสมาชิกภาพของอินพุต ทั้งค่าผิดพลาดและค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าผิดพลาด.....	13
3.1	ชุดขดลวดหลัก ขดลวดช่วยบนสเตเตอร์ และขดลวดโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....	16
3.2	แผนภาพขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	17
3.3	การต่อขานานมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ขับเคลื่อนด้วยอุปกรณ์ควบคุมเพียงชุดเดียว.....	29
3.4	มอเตอร์ที่ประกอบไปด้วยขดลวด 3 ชุด ต่อขานานกันสองตัวเข้ากับแหล่งจ่ายเพียงชุดเดียว.....	30
3.5	อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์.....	33
3.6	กระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสถานะที่ 1.....	38
3.7	กระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสถานะที่ 1.....	38
3.8	ความเร็วของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสถานะที่ 1.....	39
3.9	กระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสถานะที่ 2.....	39
3.10	กระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสถานะที่ 2.....	40
3.11	ความเร็วของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสถานะที่ 2.....	40
3.12	กระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสถานะที่ 3.....	41
3.13	กระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสถานะที่ 3.....	41
3.14	ความเร็วของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสถานะที่ 3.....	42

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.15	กระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสภาวะที่ 4.....	42
3.16	กระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสภาวะที่ 4.....	43
3.17	ความเร็วของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสภาวะที่ 4.....	43
4.1	ลักษณะพื้นฐานของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบฟuzzyลอจิก.....	46
4.2	โครงสร้างของระบบควบคุมฟuzzyแบบจัดการตัวเอง.....	47
4.3	สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzyแบบจัดการตัวเอง.....	48
4.4	แผนภาพระบบควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ที่ต่อขนานกันหลายตัวรับพลังงานจากอินเวอร์เตอร์เพียงชุดเดียว ด้วยตัวควบคุมฟuzzy.....	49
4.5	กราฟฟังก์ชันสมาชิกภาพสำหรับ $e_1$ , $e_2$ และ $u_1$ .....	51
4.6	ตัวควบคุมฟuzzyแบบจัดการตัวเอง.....	53
4.7	การหาค่าสัญญาณการควบคุมโดยวิธีการหาค่าจากจุดศูนย์กลางพื้นที่.....	56
5.1	แผนภาพการทำงานของโปรแกรมการควบคุมมอเตอร์ ที่ต่อขนานกันหลายตัวรับพลังงานจากอินเวอร์เตอร์เพียงชุดเดียว ควบคุมด้วยตัวควบคุมฟuzzyแบบจัดการตัวเอง.....	61
5.2	ผลการจำลองการควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์ขณะไม่มีโหลด ด้วยตัวควบคุมฟuzzyแบบจัดการตัวเองที่ระดับอัตราเร็ว 800 1000 1200 และ 1300 รอบต่อนาที เปรียบเทียบกับแบบไม่มีตัวควบคุม แสดงเพียงกราฟเดียวเนื่องจากมอเตอร์ที่ต่อขนานกันอีก 2 ตัว มีการตอบสนองทางความเร็วที่คล้ายคลึงกัน.....	62
5.3	ผลการจำลองการควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์ขนานกัน 3 ตัว ขับโหลดที่ระดับ อัตราเร็ว 1200 รอบต่อนาที รับพลังงานจากอินเวอร์เตอร์เพียงชุดเดียว ด้วยตัวควบคุมฟuzzyแบบจัดการตัวเองเปรียบเทียบกับ ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบธรรมดา และไม่มีตัวควบคุม.....	63
5.4	รูปคลื่นกระแสที่ขั้วของมอเตอร์แต่ละตัวขับโหลดแบบไม่มีตัวควบคุม.....	65
5.5	รูปคลื่นกระแสที่ขั้วของมอเตอร์แต่ละตัวขับ โหลดด้วยตัวควบคุมฟuzzyแบบจัดการตัวเอง.....	65

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
5.6	ควบคุมการจับโหลด 20 Nm ด้วยตัวควบคุมพีชซีจัดการตัวเอง เปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีชซีลอคแบบธรรมดาและไม่มีตัวควบคุม.....	66
5.7	การจำลองการทำงานของเครื่องจักรเมื่อได้รับโหลดตาม โครงรูปที่กำหนด (กรณี ที่ 1).....	69
5.8	การจำลองการทำงานของเครื่องจักรเมื่อได้รับโหลดตาม โครงรูปที่กำหนด (กรณี ที่ 2).....	70
5.9	การจำลองการทำงานของเครื่องจักรเมื่อได้รับโหลดตาม โครงรูปที่กำหนด (กรณี ที่ 3).....	71
5.10	การจำลองการทำงานของเครื่องจักรเมื่อได้รับโหลดตาม โครงรูปที่กำหนด (กรณี ที่ 4).....	72
5.11	การจำลองการทำงานของเครื่องจักรเมื่อได้รับโหลดตาม โครงรูปที่กำหนด (กรณี ที่ 5).....	73
6.1	ทดสอบแรงต้านทานการตัดเนื้องของมันสำปะหลังด้วยเครื่องชีวะคราก.....	76
6.2	เครื่องทดสอบความแข็งของเนื้อวัสดุ (hardness tester).....	78
6.3	การทดสอบความแข็งบนพื้นผิวเหล็กเชื่อมสภาพ.....	78
6.4	การเตรียมเหล็กเชื่อมสภาพสำหรับเข้าเครื่องทดสอบความยึดตัว.....	80
6.5	เครื่องทดสอบความยึดตัวของเหล็กเชื่อมสภาพ.....	80
6.6 (ก)	เหล็กเชื่อมสภาพก่อนผ่านการอบชุบที่ถูกดึงจนขาดออกจากกัน โดยเครื่องทดสอบการยึดตัวของวัสดุ เนื้อเหล็กเกิดการแตกบิ่น.....	81
6.6 (ข)	เหล็กเชื่อมสภาพผ่านการอบชุบที่ถูกดึงจนขาดออกจากกัน โดยเครื่องทดสอบการยึดตัวของวัสดุ เนื้อเหล็กจะไม่แตกแต่จะแยกเป็นแนว.....	81
6.7	กล้องกำลังขยายสูงสำหรับตรวจดูเนื้อเหล็ก.....	83
6.8	เนื้อเหล็กเชื่อมสภาพก่อนผ่านกระบวนการ (กำลังขยาย 1000 เท่า).....	84
6.9	เนื้อเหล็กเชื่อมสภาพเมื่อผ่านกระบวนการอบชุบในขั้นตอนที่ 1 (กำลังขยาย 1000 เท่า).....	84

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.10 เนื้อเหล็กเชื่อมสภาพเมื่อผ่านกระบวนการอบชุบแข็งในขั้นตอนที่ 6 (กำลังขยาย 1000 เท่า).....	85
6.11 รูปลักษณะภายนอกของเครื่องสับพีชผลทางการเกษตร สิทธิบัตรการประดิษฐ์ เลขที่คำขอ 0701002473.....	87
6.12 ส่วนประกอบภายในของเครื่องสับพีชผลทางการเกษตร สิทธิบัตรการประดิษฐ์ เลขที่คำขอ 0701002473.....	88
6.13 โครงสร้างของระบบควบคุมเครื่องสับพีชผลทางการเกษตร.....	93
6.14 แผนภาพบล็อกแทนฮาร์ดแวร์โดยรวมของระบบ.....	94
6.15 วงจรตัวตรวจรู้อัตราเร็ว.....	95
6.16 รูปคลื่นสัญญาณอัตราเร็วมอเตอร์และเอาต์พุตของตัวตรวจรู้อัตราเร็ว.....	95
6.17 วงจรถอดรหัสตัวตรวจรู้อัตราเร็ว.....	96
6.18 วงจรขยายสัญญาณ (ปรับความชัน).....	98
6.19 โครงสร้างภายในของอินเวอร์เตอร์ รุ่น Frecon F005i-2x ขนาดพิกัด 5 HP 3.7 kW 17A.....	99
6.20 ส่วนของโปรแกรมหลักสำหรับกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ.....	101
6.21 โปรแกรมส่วนของการรับค่าจากตัวตรวจรู้เข้ามาดำเนินการทางพีซี.....	101
6.22 โปรแกรมส่วนของการกระบวนการพีซีแบบจัดการตัวเอง.....	102
6.23 โปรแกรมส่วนของการเปิดตารางพีซีเพื่อใช้ในการคำนวณค่าการควบคุม.....	102
6.24 โปรแกรมส่วนของการตารางดีพีซีพีเคชั้นชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ของพีซีแบบจัดการตัวเอง.....	103
6.25 โปรแกรมควบคุมการทำงานส่วนของการแปลงสัญญาณแอนะล็อก เป็นสัญญาณดิจิทัล.....	103
6.26 โปรแกรมควบคุมการทำงานส่วนของการแปลงสัญญาณดิจิทัล เป็นสัญญาณ แอนะล็อก 104	
6.27 โปรแกรมส่วนของการเชื่อมต่อสัญญาณรับและส่งแบบอนุกรม RS232.....	104
7.1 อุปกรณ์สำหรับใช้ในการทดสอบระบบพร้อมทั้งวัสดุทดสอบระบบ.....	107

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.2 การติดตั้งแถบรหัสสะท้อนแสงและตัวตรวจรู้อัตราเร็วรอบมอเตอร์ พร้อมทั้งสายนำสัญญาณ.....	108
7.3 กราฟอัตราเร็วรอบมอเตอร์ที่สภาวะต่าง ๆ.....	109
7.4 จุดที่เริ่มทำการควบคุมอัตราเร็วให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย.....	110
7.5 กราฟกระแสขณะเริ่มออกตัวของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว.....	110
7.6 กระแสช่วงเชื่อมต่omotorตัวบนเข้าแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์.....	111
7.7 กระแสของมอเตอร์ขณะเริ่มถูกควบคุม ให้มีอัตราเร็วมอเตอร์เข้าสู่ค่าเป้าหมาย.....	112
7.8 การเทสต์ทดสอบเข้าไปรบกวนสภาวะการทำงานของระบบควบคุม.....	113
7.9 อัตราเร็วรอบมอเตอร์ช่วงที่ระบบมีสภาวะรบกวนจากภายนอก.....	114
7.10 อัตราเร็วรอบมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวในสภาวะต่าง ๆ ของการทดสอบ.....	115
7.11 อัตราเร็วรอบมอเตอร์ช่วงเกิดสภาวะรบกวนระบบ.....	115
7.12 กระแสมอเตอร์ในการทดสอบสับกะลามาะพร้าวปั่นด้วยโยมะพร้าว.....	116
7.13 กระแสมอเตอร์เมื่อทดสอบให้สับกะลามาะพร้าว.....	117
7.14 ผลการจำลองผลด้วยโหลดคล้ายการทดสอบจริง (วัตถุบิชนิดที่ 1) ของมอเตอร์ตัวบน.....	118
7.15 ผลการจำลองผลด้วยโหลดคล้ายการทดสอบจริง (วัตถุบิชนิดที่ 1) ของมอเตอร์ตัวกลาง.....	118
7.16 ผลการจำลองผลด้วยโหลดคล้ายการทดสอบจริง (วัตถุบิชนิดที่ 1) ของมอเตอร์ตัวล่าง.....	119
7.17 ผลการจำลองผลด้วยโหลดคล้ายการทดสอบจริง (วัตถุบิชนิดที่ 2) ของมอเตอร์ตัวบน.....	120
7.18 ผลการจำลองผลด้วยโหลดคล้ายการทดสอบจริง (วัตถุบิชนิดที่ 2) ของมอเตอร์ตัวกลาง.....	120
7.19 ผลการจำลองผลด้วยโหลดคล้ายการทดสอบจริง (วัตถุบิชนิดที่ 2) ของมอเตอร์ตัวล่าง.....	121
7.20 ผลการจำลองอัตราเร็วเทียบกับเวลาขณะไม่มีโหลด.....	122



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.21 ผลการจำลองอัตราเร่งเทียบกับเวลาขณะไม่มีโหลด.....	123
7.22 ผลการจำลองอัตราเร็วเทียบกับอัตราเร่งขณะไม่มีโหลด.....	123
7.23 ภาพขยายผลการจำลองอัตราเร็วเทียบกับอัตราเร่งขณะไม่มีโหลด.....	124
7.24 ผลการจำลองอัตราเร็วเทียบกับเวลาขณะขับโหลด.....	124
7.25 ผลการจำลองอัตราเร่งเทียบกับเวลาขณะขับโหลด.....	125
7.26 ผลการจำลองอัตราเร็วเทียบกับอัตราเร่งขณะขับโหลด.....	125
7.27 ภาพขยายผลการจำลองอัตราเร็วเทียบกับอัตราเร่งขณะขับโหลด.....	126

## คำอธิบายสัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัดของมันสำปะหลัง ( $m^2$ )
$B_m$	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของโหลดกับมอเตอร์
C	การอธิบายเชิงพีชคณิตในการเปลี่ยนแปลงของศูนย์กลางความเป็น สมาชิกภาพ
$E_i$	ตัวแปรทางภาษาของ $e_1$
$E_j$	ตัวแปรทางภาษาของ $e_2$
F	แรงตัดเฉือน (N)
$i_{qs}, i_{ds}, i_{qr}, i_{dr}$	กระแสขดลวดบนแกน qd ของสเตเตอร์และโรเตอร์ (A)
$J_m$	ความเฉื่อยของมอเตอร์ ( $Kg \cdot m^2$ )
$N_{qs}$	จำนวนรอบของขดลวดหลักแกน q (main winding)
$N_{ds}$	จำนวนรอบของขดลวดช่วยแกน d (auxiliary winding)
$N_r$	จำนวนรอบของขดลวดโรเตอร์
$N_{qr}$	จำนวนรอบของขดลวดโรเตอร์บนแกน q
$N_{dr}$	จำนวนรอบของขดลวดโรเตอร์บนแกน d
$L_r$	ความเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ (H)
$L_s$	ความเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์ (H)
$L_{lqs}$	ความเหนี่ยวนำรั่วไหลขดลวดหลักของสเตเตอร์ (H)
$L_{lds}$	ความเหนี่ยวนำรั่วไหลขดลวดช่วยของสเตเตอร์ (H)
$L_{lr}$	ความเหนี่ยวนำรั่วไหลขดลวดของโรเตอร์ (H)
$L_{mq}$	ความเหนี่ยวนำร่วมบนแกน q (H)
$L_{md}$	ความเหนี่ยวนำร่วมบนแกน d (H)
$L_{qsqs}$	ความเหนี่ยวนำภายในบนแกน q ของสเตเตอร์ (H)
$L_{qsds}$	ความเหนี่ยวนำบนแกน qd ของสเตเตอร์ (H)
$L_{qsqr}$	ความเหนี่ยวนำบนแกน q ของสเตเตอร์และโรเตอร์ (H)
$L_{qsdr}$	ความเหนี่ยวนำบนแกน qd ของสเตเตอร์และโรเตอร์ (H)
$L_{dsqs}$	ความเหนี่ยวนำบนแกน dq ของสเตเตอร์ (H)
$L_{dsds}$	ความเหนี่ยวนำภายในบนแกน d ของสเตเตอร์ (H)
$L_{dsqr}$	ความเหนี่ยวนำบนแกน dq ของสเตเตอร์และโรเตอร์ (H)

## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

$L_{dsdr}$	ความเหนี่ยวนำบนแกน d ของสเตเตอร์และโรเตอร์ (H)
$L_{qrqr}$	ความเหนี่ยวนำภายในบนแกน q ของโรเตอร์ (H)
$L_{qsds}$	ความเหนี่ยวนำบนแกน qd ของสเตเตอร์ (H)
$L_{qrqs}$	ความเหนี่ยวนำบนแกน q ของสเตเตอร์และโรเตอร์ (H)
$L_{qrds}$	ความเหนี่ยวนำบนแกน qd ของสเตเตอร์และโรเตอร์ (H)
$L_{drqr}$	ความเหนี่ยวนำบนแกน dq ของโรเตอร์ (H)
$L_{drdr}$	ความเหนี่ยวนำภายในบนแกน d ของโรเตอร์ (H)
$L_{drqs}$	ความเหนี่ยวนำบนแกน dq ของสเตเตอร์และโรเตอร์ (H)
$L_{drds}$	ความเหนี่ยวนำบนแกน d ของสเตเตอร์และโรเตอร์ (H)
$r_{qs}$	ความต้านทานขดลวดบนแกน q ของสเตเตอร์ ( $\Omega$ )
$r_{ds}$	ความต้านทานขดลวดบนแกน d ของสเตเตอร์ ( $\Omega$ )
$r_{qr}$	ความต้านทานขดลวดบนแกน q ของโรเตอร์ ( $\Omega$ )
$r_{dr}$	ความต้านทานขดลวดบนแกน d ของโรเตอร์ ( $\Omega$ )
P	จำนวนขั้วแม่เหล็ก (ขั้ว)
p	อนุพันธ์อันดับหนึ่งเทียบกับเวลา
$P_g$	ความซาบซึมได้ของช่องอากาศ
$R_r$	ความต้านทานที่โรเตอร์ ( $\Omega$ )
$R_s$	ความต้านทานที่สเตเตอร์ ( $\Omega$ )
S	สลิป
$T_e$	ทอร์กแม่เหล็กไฟฟ้า (Nm)
$T_L$	โพลคทอร์ก (Nm)
$U_n$	การอธิบายเชิงพีชคณิตในการเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุม
$u_{ref}$	คำสั่งอ้างอิง (rpm)
$u_{act1}$	อัตราเร็วรอบจริงของมอเตอร์หมายเลข 1 (rpm)
$u_{act2}$	อัตราเร็วรอบจริงของมอเตอร์หมายเลข 2 (rpm)
$u_{act1}$	อัตราเร็วรอบจริงของมอเตอร์หมายเลข 1 (rpm)
$\bar{u}_{act}$	อัตราเร็วเฉลี่ย (rpm)
$V_{qs}, V_{ds}, V_{qr}, V_{dr}$	แรงดันขดลวดบนแกน qd ของสเตเตอร์และโรเตอร์ (V)

## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

$V_{control}$	สัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์ที่ต้องการนำมาสร้างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ทางด้านออก (V)
$V_{tri}$	สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่เป็นตัวกำหนดความถี่การสวิตช์ (V)
$\hat{V}_{control}$	ค่ายอดของสัญญาณควบคุมรูปไซน์ (V)
$\hat{V}_{tri}$	ค่ายอดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (V)
$e$	ค่าความคลาดเคลื่อนอัตราเร็วมอเตอร์
$f_l$	ความถี่หลักมูลทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์ (Hz)
$f_s$	ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ (Hz)
$m_a$	อัตราการมอดูเลตแอมพลิจูด
$m_f$	อัตราการมอดูเลตความถี่
$\Delta c$	การเปลี่ยนแปลงของศูนย์กลางความเป็นสมมาตรภาพของเอาต์พุต
$\Delta e$	การเปลี่ยนแปลงค่าความคลาดเคลื่อนอัตราเร็ว
$\Delta u$	การเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุม
$\omega_r$	อัตราเร็วเชิงมุม (rad/s)
$\theta_r$	มุมระหว่างแกน $q_r$ และ $q_s$
ตัวยก $s$	บอกถึงค่าที่ $s$ อยู่บนแกนของขดลวดสเตเตอร์
ตัวยก $r$	บอกถึงค่าที่ $r$ อยู่บนแกนของขดลวดโรเตอร์
ตัวยก $'$	บอกถึงการย้ายค่าที่ $s$ มาอยู่บนแกนอ้างอิง $q$ ของสเตเตอร์
$\cap$	ตัวกระทำค่าต่ำสุดเชิงพีชคณิต
$\tau$	ความเค้นเฉือนของหัวมันสำปะหลัง ( $N/m^2$ )
$k$	เมตริกซ์การแปลงระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์
$[i]_{4 \times 1}$	เมตริกซ์กระแสขดลวดหลักและขดลวดช่วยของมอเตอร์
$[S]_{4 \times 4}$	เมตริกซ์ค่าองค์ประกอบพารามิเตอร์ของมอเตอร์
$[R]_{4 \times 4}$	เมตริกซ์ค่าองค์ประกอบพารามิเตอร์ของมอเตอร์
$[V]_{4 \times 1}$	เมตริกซ์แรงดันขดลวดหลักและขดลวดช่วยของมอเตอร์
$\mathcal{S}_{xr}^s$	ค่าใด ๆ ที่แปลงแกนจากโรเตอร์มายังสเตเตอร์
$\mathcal{S}_{xr}^r$	ค่าใด ๆ ที่อยู่บนโรเตอร์

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

อุตสาหกรรมส่วนมากมีการใช้เครื่องจักรกลที่ประกอบด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำทำหน้าที่ขับเคลื่อนกระบวนการต่าง ๆ เช่น ในอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง อุตสาหกรรมเส้นใยและถักทอ อุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร มอเตอร์เหนี่ยวนำได้รับความนิยมสูง เพราะมีโครงสร้างแข็งแรงและใช้งานง่าย การควบคุมมอเตอร์ให้ทำงานต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพทางด้านพลังงานและการลงทุน ในบางกิจกรรมของโรงงานอุตสาหกรรมจะต้องใช้มอเตอร์ที่มีพิคัดเท่ากันทำงานขับเคลื่อนที่มีลักษณะสมบัติคล้ายกันหลาย ๆ ตัว สิ่งที่ต้องการตามมา คือ อุปกรณ์ควบคุมที่ต้องใช้ควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์แต่ละตัว อุปกรณ์ดังกล่าวมักจะมีราคาแพง หากสามารถใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อนเพียงชุดเดียวกับมอเตอร์หลายตัวที่ต่อขนานกันก็จะเป็นการช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ระดับหนึ่ง ดังเช่นที่มีการใช้ในระบบลากจูงรถไฟ (Matsumoto et al., 2001) การใช้เทคโนโลยีในแนวนี้มีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลากหลายประเภทที่มีอัตราพิคัดและธรรมชาติของโหลดแตกต่างกัน องค์ความรู้ที่สำคัญเป็นรากฐานการทำความเข้าใจในปัญหาการพัฒนาเทคโนโลยีการขับเคลื่อนต่อขนานกันหลายตัวนั้น คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ Jang et al., 1994 ได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่ต่อขนานกันหลายตัว ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์เพียงตัวเดียว และมีการพิจารณาแหล่งจ่ายเป็นแบบสองเฟส (Jang et al., 1994) แหล่งจ่ายสองเฟสนี้ได้มาจากอินเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟสตามธรรมดาที่มีใช้กันโดยทั่วไป ระบบขับเคลื่อนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสในลักษณะเช่นนี้มีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลาง การพัฒนาแบบจำลองนั้นพิจารณามอเตอร์ตามโครงแบบ dq ซึ่งทั้งสองแกนจะตั้งฉากกันตามลักษณะการวางตัวของชุดขดลวด โรเตอร์และชุดขดลวดสเตเตอร์ ทำให้สนามแม่เหล็กของชุดขดลวดทั้งสองตั้งฉากกัน ดังนั้นหลักกาโครงแบบ dq (Mutsuse et al., 2004; Krishnan, 2001) จึงเป็นพื้นฐานของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เพื่อให้งานวิจัยนี้สอดคล้องต่อสถานะสังคม เศรษฐกิจและการพัฒนาคุณภาพชีวิตที่ยั่งยืนของชุมชนในพื้นที่ และในภูมิภาค จากการศึกษาพบว่าภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นพื้นที่เขตร้อนเหมาะแก่การปลูกมันสำปะหลัง แหล่งผลิตที่สำคัญของภาคตะวันออกเฉียงเหนือคือจังหวัดอุดรธานี บุรีรัมย์ กาฬสินธุ์ ขอนแก่น ชัยภูมิ และนครราชสีมา ซึ่งได้มีการนำมันสำปะหลังมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ หลายชนิด เช่น มันเส้น มันอัดเม็ด ใช้ในอุตสาหกรรม

อาหารสัตว์ และอุตสาหกรรมต่อเนื่อง เช่น สิ่งทอ กระดาษ อาหาร ฯลฯ รวมทั้งภาครัฐบาล ได้ส่งเสริมการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตพลังงานทดแทน ทำให้มีความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังเพิ่มขึ้นมาก เกษตรกรผู้ปลูกมันสำปะหลังสามารถจำหน่ายผลผลิตได้ 2 วิธี คือ มันสำปะหลังแบบสด และมันสำปะหลังแปรรูปแบบฝานหรือสับตากแห้ง ที่ความชื้น 15-17% ราคาจำหน่ายมันสำปะหลังแปรรูปทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกันมาก เนื่องจากมันแบบฝานหรือสับตากแดดได้ความชื้น อันเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของมันสำปะหลัง ทำให้น้ำหนักลดลงอย่างมาก และช่วยลดพิษของมันสำปะหลัง คือ กรดไซยาโนจีนิกกลัยโคไซด์ (Cyanogenic Glycoside) การแปรรูปดังกล่าวนี้ในปัจจุบันเกษตรกรได้ประสบปัญหาเกี่ยวกับการใช้เครื่องจักรแปรรูป เช่น ประสิทธิภาพต่ำ มั่นคง อันตรายจากการกระทุ้ง เคลื่อนย้ายลำบาก ความไม่เหมาะสมเชิงพลังงานและเชิงคุณภาพของผลผลิตที่ได้

จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้ทำการวิจัยและพัฒนาเครื่องสับมันสำปะหลังและผลผลิตทางการเกษตร เพื่อช่วยลดปัญหาในการแปรรูปมันสำปะหลังและผลผลิตทางการเกษตรอื่น ๆ ขึ้น เป็นการประยุกต์องค์ความรู้ของงานวิจัยนี้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาองค์ความรู้การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัว
- 1.2.2 เพื่อออกแบบและพัฒนาชุดควบคุมแบบพีซีสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัวในงานวิจัยนี้
- 1.2.3 เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องย่อยผลผลิตทางการเกษตร หรือที่เรียกว่าเครื่องสับพืชที่ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัวควบคุมด้วยอุปกรณ์ชุดเดียว

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

การควบคุมมอเตอร์พิจารณาควบคุมที่อัตราเร็วจุดทำงาน จุดใดจุดหนึ่งตามสถานะของโหลด โดยมีอุปกรณ์ตรวจรู้ความเร็ว เป็นตัวผลิตสัญญาณป้อนกลับที่ใช้ในการควบคุม ระบบที่พัฒนาขึ้นจะต้องง่ายต่อการบำรุงรักษา

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 พัฒนาโปรแกรมจำลองผลมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดเฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัว
- 1.4.2 พัฒนาระบบควบคุมแบบฟัซซีสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัว โดยใช้ตัวตรวจรู้ความเร็วผลิตสัญญาณป้อนกลับ เพื่อรักษาระดับการควบคุมที่จุดทำงานของระบบ
- 1.4.3 พัฒนาชุดใบมีดสำหรับย่อยวัสดุทางการเกษตร จำนวน 3 ชุด เป็นเครื่องมือวิจัย
- 1.4.4 ชุดใบมีดแต่ละชุดจะต้องได้รับการออกแบบให้มีความสามารถใช้งานได้ทั้ง 3 ชุดพร้อมกัน หรือแยกใช้งานคราวละ 2 หรือ 1 ชุดตามความต้องการของผู้ใช้
- 1.4.5 วิเคราะห์สมรรถนะและเสถียรภาพของระบบควบคุม โดยทดสอบจริงกับมันสำปะหลังและกะลามะพร้าว

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

องค์ความรู้ด้านการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัวควบคุมด้วยอุปกรณ์ควบคุมชุดเดียว ที่นำมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหากระบวนการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร หรือวัสดุทางการเกษตรที่ได้จากการเพาะปลูก อันจะส่งผลดีต่อการพัฒนาเศรษฐกิจสังคมของประเทศไทยอย่างยั่งยืน

## 1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

แนวคิดของการวิจัยเพื่อออกแบบและสร้างเทคโนโลยีการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดเฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัวด้วยอุปกรณ์ควบคุมชุดเดียว เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องย่อยวัสดุหรือพืชผลที่ได้จากการเพาะปลูก จึงเป็นแนวคิดหนึ่งที่มุ่งเน้นพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ และเสริมสร้างประโยชน์ต่อภาคเกษตรกรรมอันเป็นอุตสาหกรรมหลักของประเทศไทย ดังนั้นเอกสารรายงานฉบับนี้จึงมีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัวควบคุมด้วยอุปกรณ์ชุดเดียว การควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเองและสร้างเครื่องย่อยวัสดุพืชผลทางการเกษตรที่ได้จากการเพาะปลูก

บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยก่อนหน้าที่เกี่ยวข้องกับเครื่องสับฟืช แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดเฟสเดียว และการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดเฟสเดียวด้วยตัวควบคุมฟัซซี

บทที่ 3 กล่าวถึงการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดเฟสเดียวโดยแยกพิจารณาทั้งส่วนสเตเตอร์และโรเตอร์ และพัฒนาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดเฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัว ควบคุมด้วยอุปกรณ์ควบคุมชุดเดียว

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyแบบจัดการตัวเอง สำหรับใช้ในการควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดเหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัว

บทที่ 5 กล่าวถึงการจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB ของระบบควบคุมฟuzzyแบบจัดการตัวเอง ในการควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดเหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัว โดยการใส่ภาระกรรมแบ่งเป็นกรณีต่าง ๆ

บทที่ 6 กล่าวถึงเครื่องยอ่ยวัสดุพืชผลทางการเกษตร โดยแยกพิจารณาออกเป็นส่วน ๆ คือ ใบมีดในแต่ละชุด โครงสร้างและองค์ประกอบของเครื่องยอ่ยรวมทั้งกระบวนการทำงาน และอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบควบคุม

บทที่ 7 นำเสนอผลการทดสอบควบคุมมอเตอร์หลายตัวที่ติดตั้งร่วมกับเครื่องยอ่ยวัสดุพืชผลทางการเกษตร ให้ทำงานที่จุดปฏิบัติการด้วยชุดควบคุมฟuzzyแบบจัดการตัวเอง มีตัวตรวจรู้อัตราเร็วเป็นตัวผลิตสัญญาณป้อนกลับในการควบคุม ใช้วัสดุที่เป็นพืชผลทางการเกษตรจริงเป็นวัตถุดิบในการทดสอบ พร้อมทั้งทำการจำลองผลเลียนแบบการทดสอบกับวัตถุดิบจริง

บทที่ 8 เป็นบทสรุปของการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ พร้อมทั้งข้อเสนอแนะแนวทางในการดำเนินการวิจัยและพัฒนาในอนาคต



## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

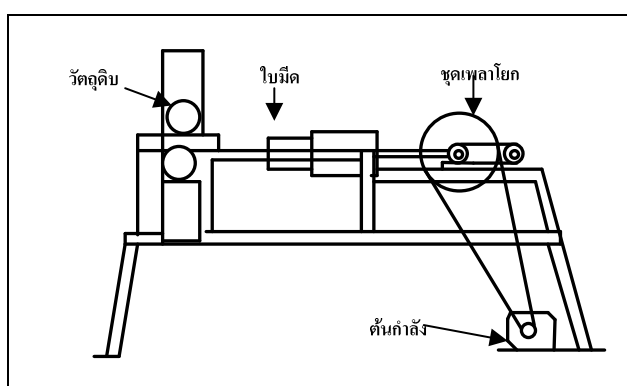
#### 2.1 บทนำ

ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ต่อขนานกันหลายตัวขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ชุดเดียว ไม่ว่าจะใช้วิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ หรือใช้การควบคุมอัตราส่วน  $V/f$  ทั้งสองวิธีนี้มีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในงานที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องพิจารณาลักษณะสมบัติของโหลดหรือกระบวนการของระบบนั้น ๆ เช่น การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัวด้วยอินเวอร์เตอร์ชุดเดียวขับเคลื่อนโหลดแบบลากจูง หรือขับโหลดแบบเป็นช่วง ๆ ซึ่งการควบคุมทั้งสองวิธีนี้ต้องอาศัยเทคนิคการมอดูเลตแบบสัญญาณ PWM มากำหนดขนาดของเวกเตอร์สนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ด้วย ในการควบคุมอัตราเร็ว นั้น มีแนวคิดที่จะใช้ตัวควบคุมพีชซีเข้ามาเป็นตัวควบคุม โดยควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ที่ต่อขนานกัน ซึ่งในการวิจัยนี้เองก็ความรู้ที่ได้กล่าวมาแล้วทดสอบควบคุมเครื่องสับวัสดุพืชผลทางการเกษตร ที่ติดตั้งมอเตอร์เฟสเดียวต่อขนานกัน ดังนั้นในบทนี้จึงนำเสนอการทบทวนงานวิจัยที่มีปรากฏมาก่อนแล้ว ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องสับพืชผลทางการเกษตร การขับเคลื่อนมอเตอร์ต่อขนานกันหลายตัว และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ทฤษฎีพีชซีลอจิกในการควบคุม จากการสืบค้นวรรณกรรมก่อนหน้านี้ยังไม่มียงานวิจัยใดที่ตีพิมพ์เผยแพร่ การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวต่อขนานกันหลายตัว ที่พบนั้นเป็นระบบขับเคลื่อนแบบ 3 เฟส ดังนั้นจึงขอกกล่าวถึงวรรณกรรมในระบบขับเคลื่อน 3 เฟส เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัย

#### 2.2 เครื่องสับพืช

การนำผลผลิตทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวเสร็จแล้วไปใช้ประโยชน์ จำเป็นต้องได้รับการลดขนาดหรือย่อยให้มีความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตในขั้นตอนต่อไป ซึ่งการย่อยขนาดอาศัยวิธีทางกลและไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีในสารอาหาร การลดขนาดวัตถุดิบด้วยวิธีทางกลอาศัยแรงกระทำต่อวัตถุ อาจเป็น แรงกระแทก แรงสับ และแรงเฉือน จึงได้มีการคิดค้นเครื่องมือในการย่อยขนาดวัสดุพืชผลทางการเกษตร โดยอาศัยหลักการของแรงกระทำในหลาย ๆ รูปแบบ

สิงหนาท พวงจันทร์แดง (2535) ได้พัฒนาเครื่องมือลดขนาดชนิดใบมีดหมุนวน ดังแผนภาพในรูปที่ 2.1 วัสดุคิบบจะถูกเทลงจากทางด้านบน วัสดุจะไหลลงสู่ใบมีดตามลำราง หลังจากนั้นใบมีดที่ติดอยู่กับแขนของเพลาคือเหวี่ยงจะหมุนตัดผ่านวัสดุคิบบนั้นเหมือนลักษณะการสับหรือหั่น จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าเครื่องจักรดังกล่าว ประกอบด้วยมอเตอร์เป็นตัวคั่นกำลังและชุดเพลายกใบมีด หากใช้เครื่องจักรนี้สับมันสำปะหลัง หัวมันสำปะหลังหรือวัสดุคิบบอื่นที่เป็นหัว จะต้องได้รับการเทหรือจัดให้อยู่ในแนวนอน เพื่อให้ได้มุมตั้งฉากกับใบมีด จึงจะทำการตัดหรือซอยย่อยขนาดได้



รูปที่ 2.1 เครื่องย่อยขนาดวัสดุพืชผลทางการเกษตรแบบใบมีดโยกกลับ  
(สิงหนาท พวงจันทร์แดง, 2535)

เกษมสันต์ แสงเงิน และคณะ (2549) ได้พัฒนาเครื่องสับมันสำปะหลังเพื่อผลิตอาหารสัตว์ ดังภาพที่แสดงในรูปที่ 2.2 โดยเน้นที่จะย่อยให้มีขนาดเล็กเหมาะแก่การผสมทำเป็นอาหารสัตว์ เครื่องจักรที่พัฒนาขึ้นมีใบมีดเป็นแบบจานหมุนวน ตัวใบมีดได้รับการยึดติดกับจานทางด้านบน มีการเจาะช่องได้ตำแหน่งที่ยึดใบมีด เพื่อให้วัสดุที่ถูกตัดหรือหั่นแล้วตกลงทางด้านล่าง การเทวัสดุต้องเทลงจากทางด้านบน โดยออกแบบช่องทางให้พยายามบังคับหัวมันให้มีลักษณะตั้งตรงในแนวตั้งเพื่อให้ใบมีดวิ่งตัดผ่านได้ ใช้ความเร็วในการสับที่เหมาะสมไม่น้อยกว่า 850 rpm ขึ้นอยู่กับวัสดุและขนาดที่ต้องการ แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นคือการติดของหัวมันสำปะหลังบริเวณช่องป้อน และใบมีดหมดความคมเร็ว เนื่องจากวัสดุที่ใช้ไม่มีความคงทนเพียงพอ ใช้สายพานเป็นตัวควบคุม อัตราเร็วรอบมอเตอร์ทำให้เกิดความผิดพลาดในการคงค่าอัตราเร็วเมื่อมีวัสดุเข้าสู่ระบบ และเมื่อต้องการปรับเปลี่ยนอัตราเร็วจะต้องหยุดเดินเครื่องและปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ทางกล



รูปที่ 2.2 เครื่องย่อยขนาดหัวมันสำปะหลังเพื่อผลิตอาหารสัตว์  
(เกษมสันต์ แสงเงิน และคณะ, 2549)

### 2.3 การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานกันหลายตัวด้วยอินเวอร์เตอร์เพียงชุดเดียว

Wu, Dewan, and Sen (1988) ได้พัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานกันหลายตัวด้วยอินเวอร์เตอร์ชุดเดียวในระบบ 3 เฟส กล่าวคือ โดยการพัฒนาจากแนวความคิดแหล่งจ่ายกระแสอินเวอร์เตอร์ (CSI) และแหล่งจ่ายแรงดันอินเวอร์เตอร์ (VSI) ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่าแหล่งจ่ายกระแสอินเวอร์เตอร์แบบประยุกต์ เพราะอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสเหมาะสมกับการขับเคลื่อนมอเตอร์เพียงตัวเดียวนั้น ทำให้เกิดความไม่ประหยัดในบางลักษณะของการใช้งาน และส่งผลกระทบต่อแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์เมื่อแหล่งจ่ายมีการเปลี่ยนแปลงอีกด้วย วิธีการนี้ได้ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อควบคุมขนาดแรงดันของมอเตอร์แต่ละตัวเพิ่มเข้าไปในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสแบบเดิม อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวประกอบไปด้วย ไดโอดตุนกำลัง ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และไครซิสเตอร์ การขับเคลื่อนด้วยวิธีนี้ใช้ไครซิสเตอร์เป็นตัวควบคุมแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ในแต่ละเฟส หากมีมอเตอร์ต่อขนานกันหลาย ๆ ตัว ก็จะต้องมีชุดอุปกรณ์ดังกล่าวใช้งานควบคู่ทุก ๆ ตัว ทำให้สามารถเลือกควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์แต่ละตัวได้ตามภาระที่ต่ออยู่

Matsumoto et al. (1998) ได้พัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานกันหลายตัวด้วยอินเวอร์เตอร์ชุดเดียวในระบบ 3 เฟส กล่าวคือ ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ต่อขนานกันหลายตัวด้วยอินเวอร์เตอร์ชุดเดียวขับโหลดลักษณะเบี่ยงเบนแรงบิด เช่นระบบลากจูงรถไฟ ซึ่งตามปกติใช้อุปกรณ์เชิงกลในการเฉลี่ยแรงบิดเพื่อส่งผ่านแรงบิดไปยัง

เพลาล้อต่าง ๆ ระบบลากจูงรถไฟฟ้าลักษณะนี้มักเกิดสภาวะการลื่นไถล ทำให้รถไฟหรือระบบลากจูงเคลื่อนที่ไม่ราบเรียบ ดังนั้นการควบคุมระบบขับเคลื่อนดังกล่าวโดยควบคุมความเข้มสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์แบบเวกเตอร์จึงเป็นแนวทางที่ใช้ในการควบคุม และจากการจำลองผลพบว่าแนวทางดังกล่าวให้ประสิทธิภาพการควบคุมที่ดีแม้มอเตอร์มีการปรับเปลี่ยนแรงบิดของโหลดในสถานะต่าง ๆ เช่น มอเตอร์แต่ละตัวมีความเร็วแตกต่างกัน ความต้านทานของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวมอเตอร์ เป็นต้น อีกทั้งวิธีการนี้ให้ผลการควบคุมแรงบิดที่แม่นยำ

Matsumoto, Ozaki, and Kawamura (2001) ได้พัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานกันหลายตัวด้วยอินเวอร์เตอร์ชุดเดียวในระบบ 3 เฟส กล่าวคือ ใช้การควบคุมสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์ด้วยวิธีการแบบเวกเตอร์ โดยมีสนามแม่เหล็กโรเตอร์และกระแสสเตเตอร์เป็นองค์ประกอบในการสังเคราะห์ระดับอ้างอิงความเร็วเชิงมุม ระบบมีการเปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมโดยสังเคราะห์จากอัตราเร็วเชิงมุมสลิปของมอเตอร์ตัวที่มีค่ามากที่สุด นำมาคำนวณหาความถี่อ้างอิงของอินเวอร์เตอร์ ความถี่ที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับอัตราเร็วเชิงมุมสลิปของมอเตอร์ตัวที่มีแรงบิดของโหลดมากที่สุด ดังนั้นมอเตอร์ที่มีอัตราเร็วเชิงมุมช้าที่สุดจะถูกเร่งให้เข้าสู่ความเร็วอ้างอิงและมอเตอร์ตัวที่มีความเร็วมากที่สุดจะถูกเลือกให้อยู่ในโหมดเบรก โดยอาศัยการจำลองผล พบว่าระบบเสถียรภาพเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM หลากถูกคลื่นที่ความถี่ 200 Hz ขึ้นไป หากเป็นช่วงความถี่ต่ำ ๆ ตั้งแต่ 30 Hz ขึ้นไป ระบบมีเสถียรภาพเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM แบบถูกคลื่นเดี่ยวเป็นแหล่งจ่าย ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 30 Hz ระบบจะเกิดการแกว่งสูง

Matsuse et al. (2002) ได้พัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานกันหลายตัวด้วยอินเวอร์เตอร์ชุดเดียวในระบบ 3 เฟส ด้วยวิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ โดยพิจารณาความแตกต่างของกระแสในขดลวดสเตเตอร์และความเข้มสนามแม่เหล็กโรเตอร์ของมอเตอร์แต่ละตัว ซึ่งมีตัวตรวจรู้กระแสและแรงดันของมอเตอร์แต่ละตัวเป็นสัญญาณป้อนกลับสำหรับคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็กเฉลี่ย โดยประมาณความเร็วจากตัวตรวจรู้กระแสและแรงดันในตัวสังเกตสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ และคำนวณแรงบิดอ้างอิงของมอเตอร์แต่ละตัวได้จากความแตกต่างระหว่างความเร็วอ้างอิงและความเร็วประมาณค่าได้โดยใช้ตัวควบคุม P และ PI ค่าที่ได้จึงนำมาคำนวณแรงบิดเฉลี่ยอ้างอิงเพื่อใช้ในการควบคุมแหล่งจ่ายแรงดันอินเวอร์เตอร์แบบ PWM เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ที่ต่อขนานกัน

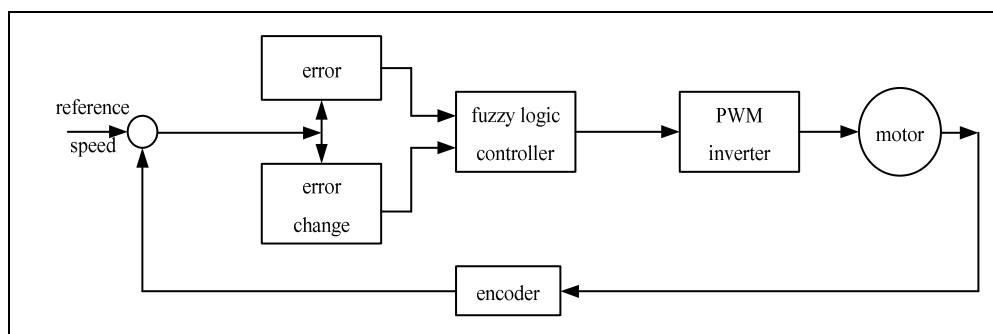
Ando, Sazawa, and Ohishi (2004) ได้พัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานกันหลายตัวด้วยอินเวอร์เตอร์ชุดเดียวในระบบ 3 เฟส กล่าวคือ ในการควบคุมแบบดั้งเดิมที่ใช้วิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์นั้นไม่ได้พิจารณาประสิทธิภาพการควบคุมมอเตอร์และเงื่อนไข

ความแตกต่างทางแรงบิดของโหลดที่มอเตอร์แต่ละตัว แต่วิธีการใหม่นี้ใช้การโปรแกรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่พิจารณาเงื่อนไขการควบคุมที่ได้กล่าวมาแล้ว มาควบคุมแรงดันและความถี่อินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้มีค่าที่เหมาะสมต่อการขับเคลื่อนมอเตอร์ในแต่ละสถานะ ซึ่งสังเคราะห์จากตัวสังเกตแรงบิดโหลดและความเร็วอ้างอิงของมอเตอร์แต่ละตัว จากการจำลองผลระบบสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้ใกล้เคียงกันได้ มีประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนสูงแม้แรงบิดโหลดจะแตกต่างกันมาก

Ruxi et al. (2006) ได้พัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานกันหลายตัวด้วยอินเวอร์เตอร์ชุดเดียวในระบบ 3 เฟส จากปัญหาความแตกต่างของแรงบิดของมอเตอร์แต่ละตัวที่เกิดขึ้นในระบบขับเคลื่อนบนราง เช่น รถไฟฟ้า จึงได้วิเคราะห์ปัญหาดังกล่าวบนพื้นฐานแบบจำลองพลวัต และใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์ที่มีกระแสและความเข้มสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แต่ละตัวเป็นองค์ประกอบมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยกระแสบนแกน  $dq$  นำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ในสมการแบบจำลองพลวัต เพื่อหาความแตกต่างของแรงบิดในมอเตอร์แต่ละตัว ซึ่งในระบบดั้งเดิมนั้นใช้ตัวควบคุมแบบ PI เพียงตัวเดียว แต่ในวิธีการใหม่นี้ใช้ตัวควบคุม PI เท่ากับจำนวนของมอเตอร์ที่ต่อขนานกัน จากการจำลองพบว่าลักษณะสมบัติทางพลวัตของแรงบิดตอบสนองต่อการควบคุมได้เป็นอย่างดี

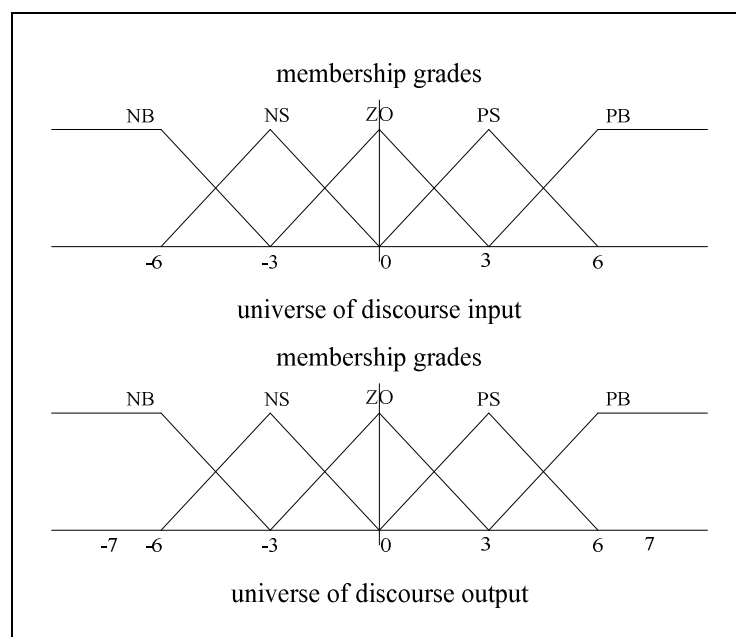
## 2.4 การควบคุมอัตราเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยฟuzzyลอจิก

Lai, Chang, and Chiou (1997) ได้ออกแบบตัวควบคุมฟuzzyลอจิกสำหรับควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM รับคำสั่งอินพุตเป็นอัตราเร็วรอบมอเตอร์ป้อนให้กับตัวควบคุมฟuzzyที่ใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลในการประมวลผล ระบบควบคุมนี้อาจแทนได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 2.3



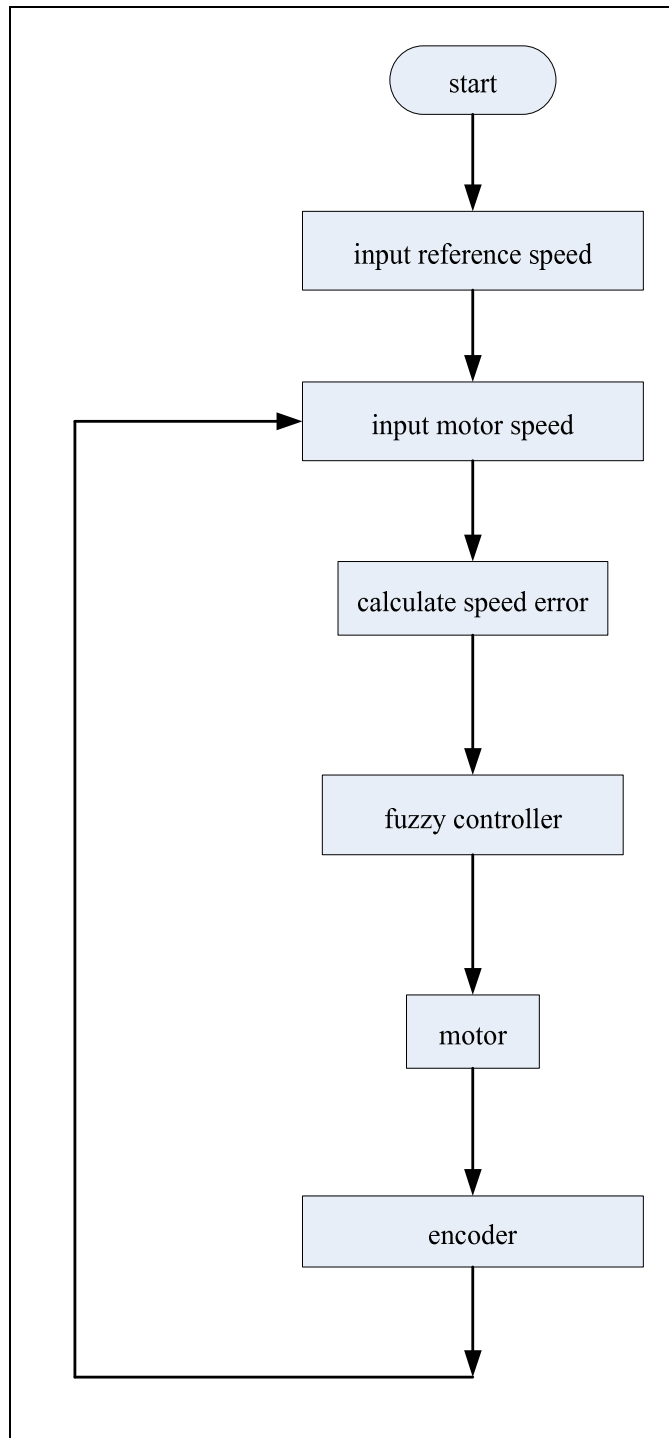
รูปที่ 2.3 แผนภาพการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยตัวควบคุมฟuzzyลอจิก

โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีใช้ค่าผิดพลาดของอัตราเร็วมอเตอร์ อธิบายด้วยตัวแปรทางภาษา ประกอบด้วยฟัซซีเซตทั้งอินพุตและเอาต์พุตอย่างละ 5 เซต แสดงได้ด้วยรูปที่ 2.4 กฎการควบคุมทั้งอินพุตและเอาต์พุตอย่างละ 25 กฎ สามารถดูรายละเอียดตัวแปรทางภาษาได้ในบทความต้นฉบับ (Lai, Chang, and Chiou, 1997) การดีฟัซซีฟิเคชันใช้แบบหาจุดศูนย์กลางพื้นที่ และแปรค่าทางภาษาด้วยการเปิดตารางฟัซซี (look-up table) ค่าที่ได้ออกมาจากระบวนการนำมาเข้าสู่การประมวลผลสำหรับปรับความถี่ในการควบคุมมอเตอร์ของวงจร PWM ซึ่งใช้วิธีควบคุมการปรับเปลี่ยนอัตราเร็วมอเตอร์แบบ V/f



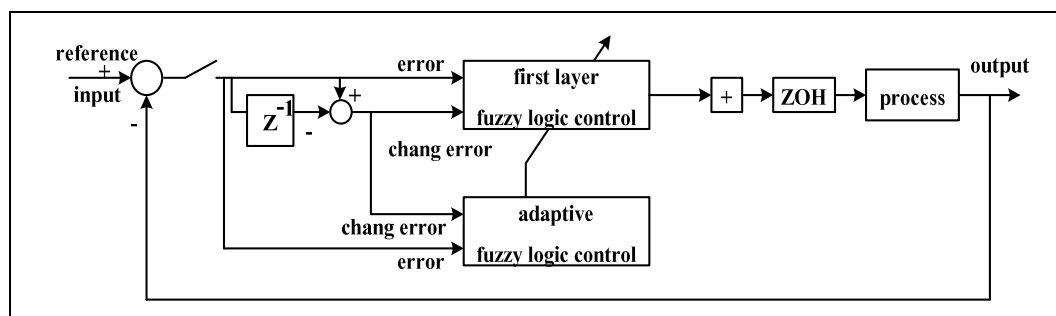
รูปที่ 2.4 แผนภาพฟังก์ชันความเป็นสมาชิกภาพของอินพุตและเอาต์พุต

ในรูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพการทำงานของโปรแกรมการควบคุมมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิก เริ่มจากป้อนค่าอัตราเร็วอ้างอิงรับค่าอัตราเร็วจากตัวตรวจรู้ แล้วทำการคำนวณค่าพลาดอัตราเร็ว ป้อนให้กับตัวควบคุมฟัซซี ค่าที่ได้ออกมาส่งต่อไปยังอินเวอร์เตอร์เพื่อทำการปรับวงรอบของการทำงานสำหรับควบคุมมอเตอร์ การทำงานจะยังดำเนินต่อไปจนกว่าเวลาที่ตั้งไว้ในโปรแกรมจะสิ้นสุด การควบคุมวิธีนี้สามารถควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้เป็นอย่างดี กล่าวคือมีการฟุ้งเกินในการตอบสนองน้อยกว่า 1% และค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวของอัตราเร็ว น้อยกว่า 1%



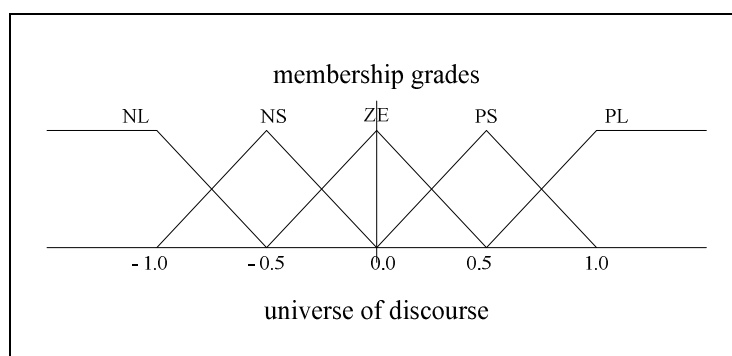
รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุมมอเตอร์

Xu and Shin (2005) ได้นำเสนอการควบคุมฟัซซีแบบหลายระดับที่ใช้สำหรับระบบไม่เป็นเชิงเส้นและวิเคราะห์เสถียรภาพ ระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นเป็นแบบสองอินพุตหนึ่งเอาต์พุต เป็นระบบควบคุมที่มีกฎการควบคุมแบบสองชั้น กฎการควบคุมในชั้นแรกสร้างขึ้นด้วยหลักการศึกษาลำบาก ในชั้นที่สองทำการปรับเปลี่ยนกฎชั้นแรกให้มีความผิดพลาดของการควบคุมลดลง โดยใช้การปรับฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีชั้นแรก โครงสร้างของระบบควบคุมแทนด้วยแผนภาพดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อระบบรับค่าจากตัวป้อนกลับ นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง ในการคำนวณค่าผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด ซึ่งจะถูกล้างไปยังกระบวนการฟัซซีฟิเคชันอีกต่อหนึ่ง ซึ่งขั้นตอนนี้ได้ออกแบบฟัซซีเซตสำหรับค่าผิดพลาดและค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดอย่างละ 5 เซต ในรูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพฟังก์ชันความเป็นสมาชิกภาพของอินพุตทั้ง ค่าผิดพลาดและค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด กฎฟัซซีในชั้นที่สองจะมีสองอินพุตเช่นกัน ในชั้นที่สองนี้จะเป็นการนำค่าผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดมาทำการปรับค่าการควบคุม โดยการปรับจุดศูนย์กลางพื้นที่ในชั้นตอนดีฟัซซีฟิเคชันของชั้นแรก จากการนำวิธีการควบคุมนี้ไปจำลองผลและทดสอบการปรับทิศทางของเรือเดินทะเล ผลทำให้ความผิดพลาดของทิศทางการเดินทางเรือลดลงและระบบมีเสถียรภาพ รายละเอียดสามารถศึกษาได้จากต้นฉบับ (Xu and Shin, 2005) และระบบดังกล่าวสามารถใช้ในอุตสาหกรรมจริงที่มีพลานต์ไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงระบบควบคุมฟัซซีแบบสองชั้น





รูปที่ 2.7 แผนภาพฟังก์ชันความเป็นสมาชิกภาพของอินพุตทั้งค่าผิดพลาดและค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าผิดพลาด

## 2.5 สรุป

ผลงานวิจัยต่าง ๆ ที่ปรากฏมาก่อนนี้ พบว่าเป็นการพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ 3 เฟส ที่ต่อขนานกันหลายตัวทั้งสิ้น เนื่องจากผู้วิจัยได้มุ่งเน้นที่จะแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ หรือระบบควบคุมที่มีขนาดกำลังม้าสูง ๆ เช่น ในรถไฟไฟฟ้า ได้สังเกตเห็นว่าวิธีการควบคุมเป็นไปในแนวทางที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ใช้วิธีควบคุมความเข้มสนามแม่เหล็กโรเตอร์แบบเวกเตอร์ ที่สังเคราะห์จากค่าเฉลี่ยของค้ประกอบของเวกเตอร์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กโรเตอร์และกระแสที่สเตเตอร์ของมอเตอร์แต่ละตัว ทำให้สามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ได้เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการแรงบิดคงที่ ตลอดจนแรงบิดของโหลดไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว แต่หากโหลดมีลักษณะสมบัติที่เปลี่ยนแปลงแรงบิดอย่างรวดเร็ว การควบคุมแบบ V/f จะมีความเหมาะสมมากกว่า (Ong, 1998) เนื่องจากการเพิ่มแรงบิดของมอเตอร์ในวิธีการนี้จะเป็นไปโดยธรรมชาติของมอเตอร์เอง พฤติกรรมการรับโหลดทางกลจะสะท้อนเข้ามาในวงจรไฟฟ้าผ่านทางสลิป s ถ้าโหลดทางกลมีแรงบิดต้านมาก สลิป s จะมาก ทำให้อัตราส่วน  $R_r/s$  มีค่าน้อย กระแสโรเตอร์ก็จะมีค่ามาก ตรงกันข้ามถ้าโหลดทางกลมีแรงบิดต้านน้อย สลิป s จะมีค่าน้อย ทำให้  $R_r/s$  มีค่ามาก กระแสโรเตอร์ก็จะมีค่าน้อย ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด  $T_L$  มอเตอร์ที่ถูกควบคุมด้วยอัตราส่วน V/f คงที่ จะออกแรงบิดต้านอย่างรวดเร็ว แต่ทว่าจะมีการหน่วงเวลาอยู่บ้างเล็กน้อย เนื่องมาจากค่าคงที่ทางเวลาของระบบ ซึ่งประกอบด้วย  $R_s+R_r$  และ  $L_s+L_r$  การตอบสนองต่อแรงบิดของโหลดจึงรวดเร็วกว่าใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์

จากการศึกษาผลงานการวิจัยเครื่องย่อขนาดพืชผลทางการเกษตรที่ปรากฏมาก่อนแล้ว พบว่ามีการใช้ต้นกำลังเป็นมอเตอร์ 3 เฟส ทั้งสิ้น การใช้งานจะต้องมีแหล่งพลังงานที่เป็นระบบ 3 เฟส อีกทั้งการใส่วัสดุเพื่อให้ใบมีดสามารถสับได้อย่างมีประสิทธิภาพ

มีความยุ่งยาก ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ใช้และกำลังการผลิต วัสดุที่นำมาทำไบโอมีดไม่คงทน หดความคมเร็ว ทำให้ต้นทุนการผลิตและการบำรุงรักษาสูง

จากการศึกษาผลงานวิจัยทางระบบควบคุมฟัซซีลอจิกที่ปรากฏมาก่อนแล้ว พบว่าเป็นการพัฒนาตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่มีโครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีใช้ค่าผิดพลาดที่ได้จากสัญญาณป้อนกลับ อธิบายด้วยตัวแปรทางภาษาประกอบด้วยฟัซซีเซตสองอินพุตและหนึ่งเอาต์พุต การดีฟัซซีฟิเคชันใช้แบบหาจุดศูนย์กลางพื้นที่ และแปรค่าทางภาษาด้วยการเปิดตารางฟัซซี ค่าที่ได้ออกมาจากระบวนการนำมาเข้าสู่การประมวลผลและแปลเป็นค่าสำหรับนำไปควบคุม เช่น ควบคุมการปรับความถี่ของวงจร PWM เพื่อควบคุมมอเตอร์ และพบว่าการควบคุมฟัซซีได้มีพัฒนาการมาเป็นแบบใช้กฎสองชั้น กล่าวคือ กฎการควบคุมในชั้นแรกสร้างขึ้นจากหลักการศึกษาลำดับ ในชั้นที่สองจะทำการปรับเปลี่ยนกฎชั้นแรกให้มีความผิดพลาดของการควบคุมลดลง โดยการปรับฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีชั้นแรก ซึ่งวิธีการนี้สามารถลดความผิดพลาดในการควบคุมได้เป็นอย่างดี

ในการวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะทำการควบคุมมอเตอร์เฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัว ซึ่งส่วนมากใช้ในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก เช่น การผลิตอาหารสัตว์ในกลุ่มสหกรณ์ การแปรรูปอาหาร การผลิตปุ๋ย เป็นต้น ซึ่งองค์ความรู้ที่ได้กล่าวไว้ในบทนี้ จะได้นำมาปรับให้เข้ากับงานวิจัยและพัฒนาต้นแบบสำหรับทดสอบจริงเปรียบเทียบกับผลการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป

## บทที่ 3

### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ที่ต่อขนานกันหลายตัวสำหรับการจำลองผล

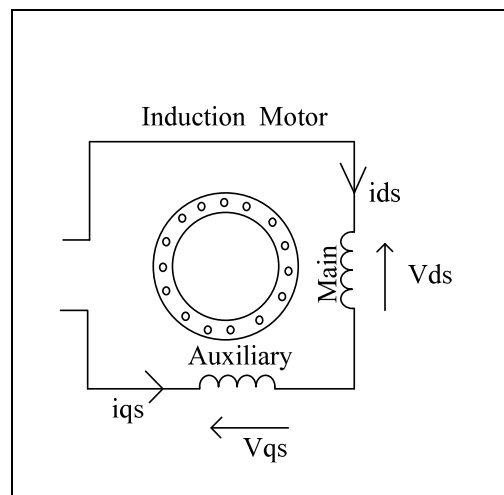
#### 3.1 บทนำ

เทคโนโลยีการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัวมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลากหลายประเภท ที่มีการใช้มอเตอร์ขนาดเดียวกันหลาย ๆ ตัวทำงานที่ลักษณะสมบัติของโหลดใกล้เคียงกัน เช่น อุตสาหกรรม ถักทอ อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น องค์ความรู้ที่สำคัญเป็นรากฐานการทำความเข้าใจในปัญหาการพัฒนาเทคโนโลยีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ต่อขนานกันหลายตัวนั้น คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการวิเคราะห์แบบจำลองในบทนี้ได้มุ่งเน้นพัฒนาแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมขนาดย่อม เพื่อให้เกิดความเหมาะสมในระบบการผลิตที่ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสต่อขนานกันหลายตัวขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์เพียงตัวเดียว ซึ่งในการวิเคราะห์หาแบบจำลองนี้จะพิจารณาแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นสองเฟส (Jang et al., 1994) แหล่งจ่ายสองเฟสนี้ได้มาจากอินเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟสตามธรรมดาที่มีใช้กันโดยทั่วไป ระบบขับเคลื่อนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสลักษณะเช่นนี้มีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมขนาดเล็กและกลาง ส่วนมากการพัฒนาแบบจำลองนั้นพิจารณามอเตอร์ตามรูปแบบแกน dq ซึ่งทั้งสองแกนจะตั้งฉากกันตามลักษณะการวางตัวของชุดขดลวดโรเตอร์และชุดขดลวดสเตเตอร์ ทำให้สนามแม่เหล็กของชุดขดลวดทั้งสองตั้งฉากกัน ดังนั้น หลักการโคงแบบ dq (Mutsuse et al., 2004; Krishnan, 2001) จึงเป็นพื้นฐานของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอนี้ ประโยชน์ของแบบจำลองตามโคงแบบ dq นี้จะใช้เพื่อการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

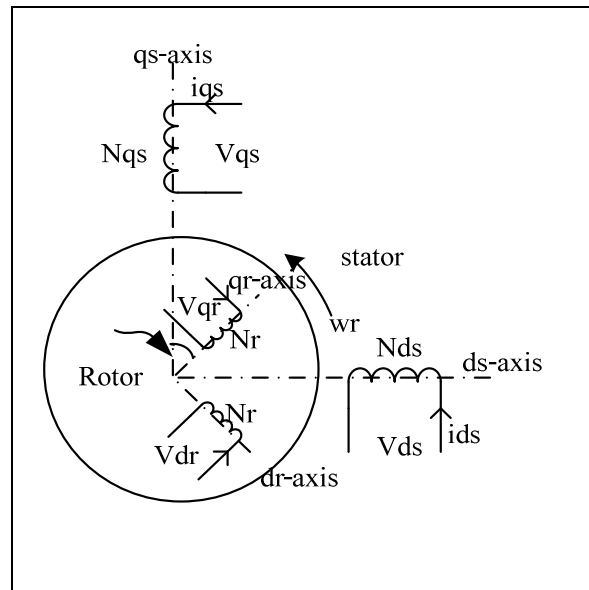
เนื้อหาในบทนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน กล่าวคือ (1) ส่วนของการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสโดยใช้ทฤษฎีกรอบอ้างอิง (2) ส่วนต่อมาจะเป็นการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการขนานมอเตอร์  $n$  ตัวในรูปของสมการสแตต และ (3) ส่วนของการจำลองผลการทำงานของมอเตอร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

### 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

ในการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว จะพิจารณาจากโครงสร้างของมอเตอร์ (Krishnan, 2001) ซึ่งประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด กล่าวคือ ชุดแรก คือ ชุดที่อยู่บนสเตเตอร์ ประกอบไปด้วย ขดลวดหลัก (main winding) และขดลวดช่วย (auxiliary winding) ส่วนชุดที่สองนั้นอยู่ที่โรเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้แบบสองเฟส หรืออาจเรียกว่าสองแกน ซึ่งประกอบด้วยแกน dq ตั้งฉากกัน วิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อาศัยหลักการโครงแบบ dq การพัฒนาแบบจำลองมีการย้ายตัวแปรบนโรเตอร์ไปอยู่บนสเตเตอร์ตามทฤษฎีกรอบอ้างอิง (reference frame theory) (Krause et al., 1995)



รูปที่ 3.1 ชุดขดลวดหลัก ขดลวดช่วยบนสเตเตอร์ และขดลวดโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว



รูปที่ 3. 2 แผนภาพขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

รูปที่ 3.2 แสดงการวางตัวของขดลวดที่อยู่บนสเตเตอร์ โดยแกน  $q$  คือ แกนของขดลวดหลักที่มีค่าแรงดันเป็น  $V_{qs}$  มีกระแสไหลในขดลวดเป็น  $i_{qs}$  และมีจำนวนรอบขดลวดเป็น  $N_{qs}$  แกน  $d$  คือ แกนของขดลวดช่วยที่มีค่าแรงดันเป็น  $V_{ds}$  มีกระแสไหลในขดลวดเป็น  $i_{ds}$  และมีจำนวนรอบขดลวดเป็น  $N_{ds}$  ในส่วนของโรเตอร์จะประกอบด้วยแกน  $q$  มีค่าแรงดันเป็น  $V_{qr}$  มีกระแสไหลในขดลวดเป็น  $i_{qr}$  และมีจำนวนรอบขดลวดเป็น  $N_{qr}$  แกน  $d$  มีค่าแรงดันเป็น  $V_{dr}$  มีกระแสไหลในขดลวดเป็น  $i_{dr}$  และมีจำนวนรอบขดลวดเป็น  $N_{dr}$  เมื่อแกน  $q_r$  ทำมุมกับแกน  $q_s$  อยู่  $\theta_r$  สามารถแยกเวกเตอร์เข้าสู่แกนหลักของขดลวดสเตเตอร์ โดยใช้ทฤษฎีกรอบอ้างอิง จากแผนภาพขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ พิจารณาในแบบสองแกน ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2 สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของแรงดันในรูปเมตริกซ์ โดยกำหนดให้ค่าที่มีตัวยก  $s$  แสดงถึงค่าที่อยู่บนสเตเตอร์ ในทำนองเดียวกัน ค่าที่มีตัวยก  $r$  แสดงถึงค่าที่อยู่บนโรเตอร์

$$\begin{bmatrix} V_{qr}^s \\ V_{dr}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(90 - \theta_r) \\ \cos(90 + \theta_r) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qr}^r \\ V_{dr}^r \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} V_{qr}^s \\ V_{dr}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qr}^r \\ V_{dr}^r \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

สมการที่ 3.2 สามารถเขียนให้กระชับได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \mathcal{V}_{xr}^s \end{bmatrix} = [k] \begin{bmatrix} \mathcal{V}_{xr}^r \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

เมื่อ	$\mathcal{V}_{xr}^s$	คือ	ค่าใด ๆ ที่แปลงแกนจากโรเตอร์มายังสเตเตอร์
	$\mathcal{V}_{xr}^r$	คือ	ค่าใด ๆ ที่อยู่บนโรเตอร์
	$k$	คือ	เมตริกซ์การแปลงระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์
	$[k]$	=	$\begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix}$

ในการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสนี้ จะแยกพิจารณาออกเป็นสองส่วน คือ พิจารณาส่วนของสเตเตอร์ และพิจารณาส่วนของโรเตอร์

- **พิจารณาที่สเตเตอร์**

จากสมการแรงดันที่เกิดขึ้นบนสเตเตอร์ จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดัน กระแสความต้านทาน และความเหนี่ยวนำ เป็นดังนี้

$$V_{qs} = r_{qs} i_{qs} + L_{qsqs} p i_{qs} + L_{qsds} p i_{ds} + L_{qsqr} p i_{qr} + L_{qsdr} p i_{dr}$$

$$V_{ds} = r_{ds} i_{ds} + L_{dsqs} p i_{qs} + L_{dsds} p i_{ds} + L_{dsqr} p i_{qr} + L_{dsdr} p i_{dr}$$

เมื่อ	$p$	คือ	อนุพันธ์อันดับหนึ่งเทียบกับเวลา
	$L_{qsqs}$	คือ	ความเหนี่ยวนำภายในบนแกน q ของสเตเตอร์ (H)
	$L_{qsds}$	คือ	ความเหนี่ยวนำบนแกน qd ของสเตเตอร์ (H)
	$L_{qsqr}$	คือ	ความเหนี่ยวนำบนแกน q ของสเตเตอร์และโรเตอร์ (H)
	$L_{qsdr}$	คือ	ความเหนี่ยวนำบนแกน qd ของสเตเตอร์และโรเตอร์ (H)
	$L_{dsqs}$	คือ	ความเหนี่ยวนำบนแกน dq ของสเตเตอร์ (H)
	$L_{dsds}$	คือ	ความเหนี่ยวนำภายในบนแกน d ของสเตเตอร์ (H)
	$L_{dsqr}$	คือ	ความเหนี่ยวนำบนแกน dq ของสเตเตอร์และโรเตอร์ (H)
	$L_{dsdr}$	คือ	ความเหนี่ยวนำบนแกน d ของสเตเตอร์และโรเตอร์ (H)

$r_{qs}$  คือ ความต้านทานขดลวดบนแกน q ของสเตเตอร์ ( $\Omega$ )

$r_{ds}$  คือ ความต้านทานขดลวดบนแกน d ของสเตเตอร์ ( $\Omega$ )

และสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ได้ว่า

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} + pL_{qsqs} & pL_{qsds} \\ pL_{dsqs} & r_{ds} + pL_{dsds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} + p \left\{ \begin{bmatrix} L_{qsqr} & L_{qsdr} \\ L_{dsqr} & L_{dsdr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix} \right\} \quad (3.4)$$

ในสมการที่ 3.4 จะเห็นว่ามีส่วนของกระแสโรเตอร์อยู่ทางขวามือสุดของสมการ ทำการย้ายกระแสโรเตอร์ไปยังสเตเตอร์ ด้วยเมตริกซ์การแปลงแกนดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} i_x^s \\ i_x^r \end{bmatrix} = [k] \begin{bmatrix} i_x^r \\ i_x^s \end{bmatrix} \quad \text{หรือ} \quad \begin{bmatrix} i_x^r \\ i_x^s \end{bmatrix} = [k]^{-1} \begin{bmatrix} i_x^s \\ i_x^r \end{bmatrix}$$

เราจึงสามารถเขียนแสดงสมการ 3.4 ได้ในรูป

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} + pL_{qsqs} & pL_{qsds} \\ pL_{dsqs} & r_{ds} + pL_{dsds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} + p \left\{ \begin{bmatrix} L_{qsqr} & L_{qsdr} \\ L_{dsqr} & L_{dsdr} \end{bmatrix} [k]^{-1} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \right\}$$

นั่นก็คือ

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} + pL_{qsqs} & pL_{qsds} \\ pL_{dsqs} & r_{ds} + pL_{dsds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} + p \left\{ \begin{bmatrix} L_{qsqr} & L_{qsdr} \\ L_{dsqr} & L_{dsdr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \right\} \quad (3.5)$$

เมื่อค่าเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กระหว่างแกน dq ในฝั่งขวาของสมการ 3.5 ตั้งฉากกัน ทำให้มีค่าความเหนี่ยวนำเป็นศูนย์ จัดรูปสมการ 3.5 เสียใหม่จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} & 0 \\ 0 & r_{ds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qsqr} & 0 \\ 0 & L_{qsqr} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} + p \left\{ \begin{bmatrix} L_{qsqr} \cos \theta_r & -L_{qsqr} \sin \theta_r \\ L_{dsqr} \sin \theta_r & L_{dsqr} \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \right\} \quad (3.6)$$

นั่นก็คือ

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_{qs} & 0 \\ 0 & r_{ds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qsqr} & 0 \\ 0 & L_{qsqr} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} + \\ &\left\{ \begin{bmatrix} -\omega_r L_{qsqr} \sin \theta_r & -\omega_r L_{qsqr} \cos \theta_r \\ \omega_r L_{dsdr} \cos \theta_r & -\omega_r L_{dsdr} \sin \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \right. \\ &\left. \begin{bmatrix} L_{qsqr} \cos \theta_r & -L_{qsqr} \sin \theta_r \\ L_{dsdr} \sin \theta_r & L_{dsdr} \cos \theta_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (3.7)$$

- พิจารณาที่โรเตอร์

พิจารณาในกรณีที่โรเตอร์สมมาตร กล่าวคือ จำนวนรอบของขดลวดในแนวแกน dq มีค่าเท่ากัน และความต้านทานของขดขดลวดที่โรเตอร์ในแนวแกน dq จะมีค่าเท่ากัน ( $r_{qr} = r_{dr} = r_r$ ) สมการแรงดันที่โรเตอร์เป็นดังนี้

$$V_{qr}^r = r_{qr} i_{qr}^r + L_{qrqr} p i_{qr}^r + L_{qsds} p i_{dr}^r + L_{qrqs} p i_{qs}^r + L_{qrds} p i_{ds}^r$$

$$V_{dr}^r = r_{dr} i_{dr}^r + L_{drqr} p i_{qr}^r + L_{drdr} p i_{dr}^r + L_{drqs} p i_{qs}^r + L_{drds} p i_{ds}^r$$

เมื่อ	$L_{qrqr}$	คือ	ความเหนี่ยวนำภายในบนแกน q ของโรเตอร์ (H)
	$L_{qsds}$	คือ	ความเหนี่ยวนำบนแกน qd ของสเตเตอร์ (H)
	$L_{qrqs}$	คือ	ความเหนี่ยวนำบนแกน q ของสเตเตอร์และ โรเตอร์ (H)
	$L_{qrds}$	คือ	ความเหนี่ยวนำบนแกน qd ของสเตเตอร์และ โรเตอร์ (H)
	$L_{drqr}$	คือ	ความเหนี่ยวนำบนแกน dq ของโรเตอร์ (H)
	$L_{drdr}$	คือ	ความเหนี่ยวนำภายในบนแกน d ของโรเตอร์ (H)
	$L_{drqs}$	คือ	ความเหนี่ยวนำบนแกน dq ของสเตเตอร์และ โรเตอร์ (H)
	$L_{drds}$	คือ	ความเหนี่ยวนำบนแกน d ของสเตเตอร์และ โรเตอร์ (H)

และอาจจัดให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_{qr}^r \\ V_{dr}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qr} + pL_{qrqr} & pL_{qrdr} \\ pL_{drqr} & r_{dr} + pL_{drdr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_{qrqs} & L_{qrds} \\ L_{drqs} & L_{drds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} \quad (3.8)$$



ทำการย้ายตัวแปรแรงดัน และกระแสที่อยู่บนโรเตอร์ไปยังสเตเตอร์ ด้วยหลักการแปลงแกน ดังนี้  
แปลงกระแส

$$[i_r^r] = [k]^{-1} [i_r^s] \quad (3.9)$$

แปลงแรงดัน

$$[V_r^r] = [k]^{-1} [V_r^s] \quad (3.10)$$

สมการ 3.8 จึงอาจเขียนแสดงได้ดังรูปสมการ 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ

$$[k]^{-1} \begin{bmatrix} V_{qr}^s \\ V_{dr}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qr} + pL_{qrqr} & pL_{qrdr} \\ pL_{drqr} & r_{dr} + pL_{drdr} \end{bmatrix} [k]^{-1} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_{qrqs} & L_{qrds} \\ L_{drqr} & L_{drds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{qr}^s \\ V_{dr}^s \end{bmatrix} &= [k] \begin{bmatrix} r_{qr} & 0 \\ 0 & r_{dr} \end{bmatrix} [k]^{-1} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \\ & [k] \begin{bmatrix} L_{qrqr} & L_{qrdr} \\ L_{drqr} & L_{drdr} \end{bmatrix} [k]^{-1} p \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \\ & p \left\{ [k] \begin{bmatrix} L_{qrqs} & L_{qrds} \\ L_{drqr} & L_{drds} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.12)$$

พิจารณาฝั่งขวาของสมการ 3.12 จะเห็นว่ามีส่วนพจน์ร่วมกันทางพีชคณิต เมื่อพิจารณาพจน์ที่ 1 คือ พจน์ที่อยู่ชุดแรกทางฝั่งขวาของสมการ นั่นคือ

$$[k] \begin{bmatrix} r_{qr} & 0 \\ 0 & r_{dr} \end{bmatrix} [k]^{-1} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix}$$

ทำการแทนค่าเมตริกซ์  $[k]$  และเมตริกซ์  $[k]^{-1}$  จะได้

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{qr} & 0 \\ 0 & r_{dr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix}$$

จัดรูปให้ง่ายขึ้นจะได้

$$\begin{bmatrix} r_{qr} \cos^2 \theta_r + r_{dr} \sin^2 \theta_r & -r_{qr} \cos \theta_r \sin \theta_r + r_{dr} \sin \theta_r \cos \theta_r \\ -r_{qr} \cos \theta_r \sin \theta_r + r_{dr} \sin \theta_r \cos \theta_r & r_{dr} \cos^2 \theta_r + r_{qr} \sin^2 \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix}$$

ในกรณีที่  $r_{qr} = r_{dr} = r_r$  ตลอดจน  $\cos^2 \theta_r + \sin^2 \theta_r = 1$  พจน์ดังกล่าวจึงลดรูปเป็น

$$\begin{bmatrix} r_r & 0 \\ 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

พิจารณาส่วนที่ 2 ที่อยู่ทางฝั่งขวาของสมการ 3.12 ในกรณีที่ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างแกน dq ของโรเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากแกนทั้งสองอยู่ในตำแหน่งทำมุมตั้งฉากซึ่งกันและกัน พร้อมทั้งแทนค่าเมตริกซ์  $[k]$  และ  $[k]^{-1}$  พจน์ที่ได้เป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{qr} & 0 \\ 0 & r_{dr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

จัดรูปให้ง่ายขึ้นจะได้

$$\begin{bmatrix} L_{qrqr} \cos^2 \theta_r + L_{drdr} \sin^2 \theta_r & -L_{qrqr} \cos \theta_r \sin \theta_r + L_{drdr} \sin \theta_r \cos \theta_r \\ -L_{qrqr} \sin \theta_r \cos \theta_r + L_{drdr} \sin \theta_r \cos \theta_r & L_{qrqr} \sin^2 \theta_r + L_{drdr} \cos^2 \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

เมื่อความเหนี่ยวนำตัวเอง (self inductance) ของโรเตอร์บริเวณแกน qd มีค่าเท่ากัน  $L_{qrq} = L_{drd}$  เนื่องจากมีจำนวนรอบของขดลวดเท่ากัน พจน์ 3.15 สามารถลดรูปได้เป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} L_{qrq} & 0 \\ 0 & L_{qrq} \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

เมื่อพิจารณาพจน์ที่ 3 คือ พจน์ที่อยู่ชุดสุดท้ายทางฝั่งขวาของสมการ 3.12 ซึ่งก็คือ

$$P \left\{ \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{qrqs} & L_{qrds} \\ L_{drqs} & L_{drds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} \right\} \quad (3.17)$$

เมื่อ  $p$  คือ อนุพันธ์อันดับหนึ่งเทียบกับเวลา เราสามารถจัดรูปพจน์ 3.17 ได้ใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} -\omega_r L_{qrqs} \sin \theta_r + \omega_r L_{drqs} \cos \theta_r \\ -\omega_r L_{qrqs} \cos \theta_r - \omega_r L_{drqs} \sin \theta_r \end{bmatrix} \\ & - \omega_r L_{qrds} \sin \theta_r + \omega_r L_{drds} \cos \theta_r \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \\ & - \omega_r L_{qrds} \cos \theta_r - \omega_r L_{drds} \sin \theta_r \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} L_{qrqs} \cos \theta_r + L_{drqs} \sin \theta_r \\ -L_{qrqs} \sin \theta_r + L_{drqs} \cos \theta_r \\ L_{qrds} \cos \theta_r + L_{drds} \sin \theta_r \\ -L_{qrds} \sin \theta_r + L_{drds} \cos \theta_r \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.18)$$

เมื่อนำพจน์ 3.13 3.16 และ 3.18 แทนกลับลงไปนสมการ 3.12 จะได้สมการ 3.19 จากการที่ย้ายค่ากระแสมาอยู่บนแกน dq ของสเตเตอร์ จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำระหว่างแกน dq หายไป เนื่องจากขดลวดทั้งสองทำมุมกัน 90 องศา

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} V_{qr}^s \\ V_{dr}^s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_r & 0 \\ 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qrqr} & 0 \\ 0 & L_{qrqr} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \\
 &\begin{bmatrix} -\omega_r L_{qrqs} \sin \theta_r + \omega_r L_{drqs} \cos \theta_r \\ -\omega_r L_{qrqs} \cos \theta_r - \omega_r L_{drqs} \sin \theta_r \\ -\omega_r L_{qlds} \sin \theta_r + \omega_r L_{drds} \cos \theta_r \\ -\omega_r L_{qlds} \cos \theta_r - \omega_r L_{drds} \sin \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \\
 &\begin{bmatrix} L_{qrqs} \cos \theta_r + L_{drqs} \sin \theta_r \\ -L_{qrqs} \sin \theta_r + L_{drqs} \cos \theta_r \\ L_{qlds} \cos \theta_r + L_{drds} \sin \theta_r \\ -L_{qlds} \sin \theta_r + L_{drds} \cos \theta_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \quad (3.19)
 \end{aligned}$$

กระแสจากโรเตอร์ที่ย้ายมาอยู่บนแกน q ของสเตเตอร์ไม่สามารถสร้างความเหนี่ยวนำไปยังแกน d ของสเตเตอร์ได้ ค่าความเหนี่ยวนำของแกน dq ในสมการ 3.19 จึงมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} V_{qr}^s \\ V_{dr}^s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_r & 0 \\ 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qrqr} & 0 \\ 0 & L_{qrqr} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \\
 &\begin{bmatrix} -\omega_r L_{qrqs} \sin \theta_r & \omega_r L_{drds} \cos \theta_r \\ -\omega_r L_{qrqs} \cos \theta_r & \omega_r L_{drds} \sin \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \\
 &\begin{bmatrix} L_{qrqs} \cos \theta_r & L_{drds} \sin \theta_r \\ -L_{qrqs} \sin \theta_r & L_{drds} \cos \theta_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \quad (3.20)
 \end{aligned}$$

เมื่อทำการแปลงแกนตามหลักการกรอบอ้างอิงอยู่กับที่ ดังที่ได้แสดงมาแล้วข้างต้น สามารถนำส่วนที่เป็นสมการแรงดันของสเตเตอร์และโรเตอร์มาเขียนให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ได้ดังสมการ 3.21

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ V_{qr}^s \\ V_{dr}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} & 0 \\ 0 & r_{ds} \\ -\omega_r L_{qrqs} \sin \theta_r & -\omega_r L_{drdr} \cos \theta_r \\ -\omega_r L_{qrqs} \cos \theta_r & -\omega_r L_{drdr} \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \\ i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_r L_{qsqr} \sin \theta_r & -\omega_r L_{qsdr} \cos \theta_r \\ \omega_r L_{dsqr} \cos \theta_r & -\omega_r L_{dsdr} \cos \theta_r \\ r_r & 0 \\ 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \\ i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qsqs} & 0 & L_{qsqr} \cos \theta_r & -L_{qsqr} \sin \theta_r \\ 0 & L_{dsds} & L_{dsdr} \sin \theta_r & L_{dsdr} \cos \theta_r \\ L_{qrqs} \cos \theta_r & L_{drdr} \sin \theta_r & L_{qsqr} & 0 \\ -L_{drqs} \sin \theta_r & L_{drds} \cos \theta_r & 0 & L_{drdr} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \\ i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

สมการ 3.21 สามารถหาค่าความสัมพันธ์ของค่าแรงดัน กระแส ความต้านทาน และจำนวนรอบของขดลวดแต่ละชุด เมื่อย้ายตัวแปรบนแกน dq ของโรเตอร์ ไปอยู่บนแกน dq ของสเตเตอร์

เมื่อ	$N_{qs}$	คือ	จำนวนรอบของขดลวดหลักแกน q (main winding)
	$N_{ds}$	คือ	จำนวนรอบของขดลวดช่วยแกน d (auxiliary winding)
	$N_r$	คือ	จำนวนรอบของขดลวดโรเตอร์
	$N_{qr}$	คือ	จำนวนรอบของขดลวดโรเตอร์บนแกน q
	$N_{dr}$	คือ	จำนวนรอบของขดลวดโรเตอร์บนแกน d
	$L_r$	คือ	ความเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ (H)
	$L_s$	คือ	ความเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์ (H)
	$L_{lqs}$	คือ	ความเหนี่ยวนำร่วมขดลวดหลักของสเตเตอร์แกน q (H)
	$L_{lds}$	คือ	ความเหนี่ยวนำร่วมขดลวดช่วยของสเตเตอร์แกน d (H)
	$L_{lr}$	คือ	ความเหนี่ยวนำร่วมขดลวดของโรเตอร์ (H)
	$L_{mq}$	คือ	ความเหนี่ยวนำร่วมบนแกน q (H)
	$L_{md}$	คือ	ความเหนี่ยวนำร่วมบนแกน d (H)

และค่าที่มีตัวยก “ ' ” หมายถึงค่าที่ย้ายมาอยู่บนแกนอ้างอิง q ของสเตเตอร์

$$\begin{aligned}
 V_{ds}' &= \frac{N_{qs}}{N_{ds}} V_{ds} & , & & i_{ds}' &= \frac{N_{qs}}{N_{ds}} i_{ds} \\
 L_{mq} &= N_{qs}^2 P_g & , & & L_{ds}' &= \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}}\right)^2 N_{ds}^2 P_g = L_{mq} \\
 L_{lds}' &= \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}}\right)^2 L_{lds} & , & & r_{ds}' &= \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}}\right)^2 r_{ds} \\
 L_{lr}' &= \left(\frac{N_{qs}}{N_r}\right)^2 L_{lr} & , & & r_r' &= \left(\frac{N_{qs}}{N_r}\right)^2 r_r \\
 V_{qr}' &= \frac{N_{qs}}{N_r} V_{qr}^s & , & & V_{dr}' &= \frac{N_{qs}}{N_r} V_{dr}^s \\
 i_{qr}' &= \frac{N_r}{N_{qs}} i_{qr}^s & , & & i_{dr}' &= \frac{N_r}{N_{qs}} i_{dr}^s
 \end{aligned}$$

สามารถเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดแต่ละชุดเป็นค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (magnetic inductance) ด้วยความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้ (Ong, 1998)

$$\begin{aligned}
 L_{qsqs} &= L_{lqs} + N_{qs}^2 P_g & , & & L_{dsds} &= L_{lds} + N_{ds}^2 P_g \\
 L_{qsqr} &= N_{qs} N_{qr} P_g & , & & L_{qsdr} &= N_{qs} N_{dr} P_g \\
 L_{dsqr} &= N_{ds} N_{qr} P_g & , & & L_{dsdr} &= N_{ds} N_{dr} P_g \\
 L_{qrqr} &= L_{lqr} + N_{qr}^2 P_g & , & & L_{drdr} &= L_{lqr} + N_{dr}^2 P_g
 \end{aligned}$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ 3.21 โดยพิจารณาให้จำนวนรอบของขดลวดเท่ากัน จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ V_{qr}^s \\ V_{dr}^s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_{qs} & 0 \\ 0 & r_{ds} \\ -\omega_r L_{mqs} \sin \theta_r & -\omega_r L_{mqs} \cos \theta_r \\ -\omega_r L_{mqs} \cos \theta_r & -\omega_r L_{mqs} \sin \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} + \\
 &\begin{bmatrix} -\omega_r L_{mqs} \sin \theta_r & -\omega_r L_{mqs} \cos \theta_r \\ \omega_r L_{dsqr} \cos \theta_r & -\omega_r L_{mqs} \cos \theta_r \\ r_r & 0 \\ 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} + \\
 &\begin{bmatrix} L_{lqs} + L_{mqs} & 0 \\ 0 & (L_{lqs} + L_{mqs}) \\ L_{mqs} \cos \theta_r & L_{mqs} \sin \theta_r \\ -L_{mqs} \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \\
 &\begin{bmatrix} L_{mqs} \cos \theta_r & -L_{mqs} \sin \theta_r \\ L_{mqs} \sin \theta_r & L_{mqs} \cos \theta_r \\ (L_{lr} + L_{mqs}) & 0 \\ 0 & (L_{lr} + L_{mqs}) \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (3.22)
 \end{aligned}$$

และสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการสเตตได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt} [i] = [A][i] + [B][v] \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned}
 \text{ซึ่ง} \quad [i] &= [i_{qs} \ i_{ds} \ i_{qr} \ i_{dr}]^T \\
 [v] &= [V_{qs} \ V_{ds} \ V_{qr} \ V_{dr}]^T \\
 [A] &= [D]^{-1}[C] \\
 [B] &= [D]^{-1}
 \end{aligned}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} -r_{qs} & 0 & \omega_r L_{mqs} \sin \theta_r & \omega_r L_{mqs} \cos \theta_r \\ 0 & -r'_{ds} & -\omega_r L_{dsqr} \cos \theta_r & \omega_r L_{mqs} \cos \theta_r \\ \omega_r L_{mqs} \sin \theta_r & -\omega_r L_{mqs} \cos \theta_r & -r'_r & 0 \\ \omega_r L_{mqs} \cos \theta_r & \omega_r L_{mqs} \cos \theta_r & 0 & -r'_r \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} L'_{iqs} + L_{mqs} & 0 & L_{mqs} \cos \theta_r & -L_{mqs} \sin \theta_r \\ 0 & (L'_{iqs} + L_{mqs}) L_{mqs} \sin \theta_r & L_{mqs} \cos \theta_r & \\ L_{mqs} \cos \theta_r & L_{mqs} \sin \theta_r (L'_{ir} + L_{mqs}) & 0 & \\ -L_{mqs} \sin \theta_r & L_{mqs} \cos \theta_r & 0 & (L'_{ir} + L_{mqs}) \end{bmatrix}$$

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ โดยใช้กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน (Krishnan, 2001) สมการเชิงกลอาจเขียนแสดงได้ดังนี้

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P}{2J_m} T_e(t) - \frac{P}{2J_m} T_L(t) - \frac{B_m \omega_r(t)}{J_m}$$

เมื่อ	$T_e$	คือ	ทอร์กแม่เหล็กไฟฟ้า (Nm)
	$T_L$	คือ	โหลดทอร์ก (Nm)
	$J_m$	คือ	ความเฉื่อยของมอเตอร์ (Kg -m <sup>2</sup> )
	$B_m$	คือ	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ โหลดกับมอเตอร์ (N•m/rad/sec)
	$\omega_r$	คือ	อัตราเร็วเชิงมุม )rad/s(
	$T_e$	=	$(\frac{P}{2})L_{mqs}i'_{qs}(-i'_{qr} \sin \theta_r - i'_{dr} \cos \theta_r) + L_{mqs}i'_{ds}(i'_{qr} \cos \theta_r - i'_{dr} \sin \theta_r)$
	$\frac{d\theta_r}{dt}$	=	$\omega_r$

จัดให้อยู่ในรูปสมการสแตต

$$\begin{bmatrix} \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B_m}{J_m} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{P}{2J_m} \\ 0 \end{bmatrix} [T_e - T_L] \quad (3.24)$$



เมื่อรวมแบบจำลองปริภูมิสถานะของทั้งทางไฟฟ้าและทางกลเข้าด้วยกัน จะได้แบบจำลองปริภูมิสถานะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำแบบหนึ่งเฟสดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{d[i]_{4 \times 1}}{dt} \\ \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathcal{R}]_{4 \times 4} & \cdots & 0 & \cdots \\ \vdots & \ddots & & \\ 0 & & -\frac{B_m}{J_m} & 0 \\ \vdots & & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i]_{4 \times 1} \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathcal{S}]_{4 \times 4} & \cdots & 0 & \cdots \\ \vdots & \ddots & & \\ 0 & & \frac{P}{2J_m} & 0 \\ \vdots & & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V]_{4 \times 1} \\ T_e - T_L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

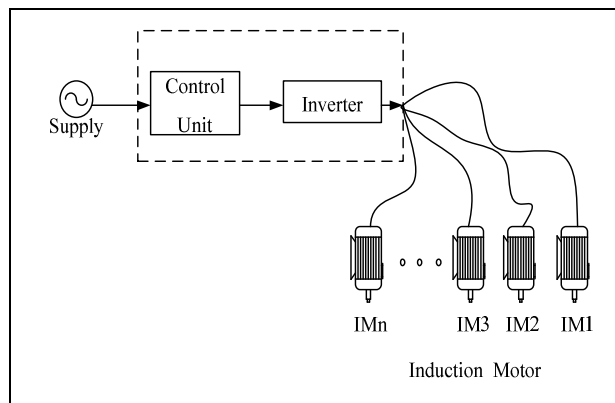
โดยที่

$$[i]_{4 \times 1} = [i_{qs} \quad i_{ds} \quad i_{qr} \quad i_{dr}]^T$$

$$[\mathcal{R}]_{4 \times 4} = [A] = [D]^{-1} [C]$$

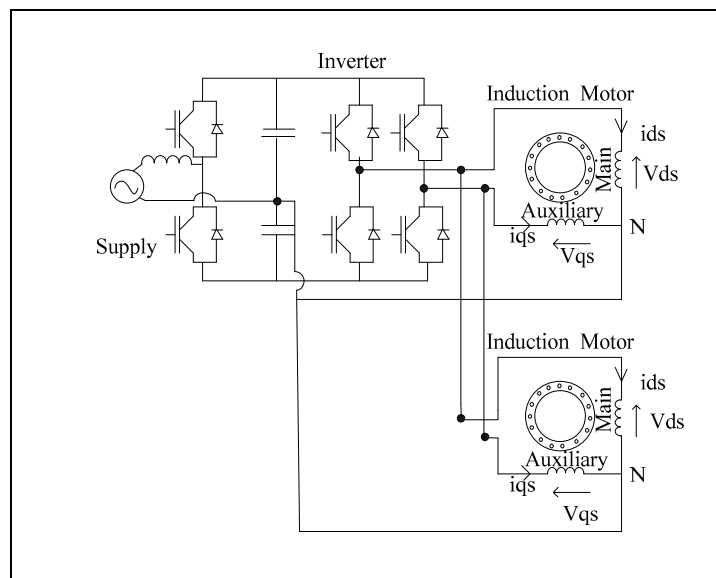
$$[\mathcal{S}]_{4 \times 4} = [B] = [D]^{-1}$$

### 3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ต่อขนานกัน n ตัว



รูปที่ 3.3 การต่อขนานมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสขับเคลื่อนด้วยอุปกรณ์ควบคุมเพียงชุดเดียว

หัวข้อที่ผ่านมาได้แสดงรายละเอียดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสอ้างอิงแกน dq ในการวิจัยนี้ได้นำมาพัฒนาเพื่อให้ได้แบบจำลองสำหรับการขนานมอเตอร์หลาย ๆ ตัว ที่ใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อนเพียงชุดเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3.3 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการต่อขนานมอเตอร์หลาย ๆ ตัวนี้ จะอาศัยหลักการถ่ายโอนแกนเหมือนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับมอเตอร์ตัวเดียว โดยจะพิจารณาระบบที่ประกอบไปด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีขดลวด 3 ชุด คือ ขดลวดหลัก ขดลวดช่วย และขดลวดที่โรเตอร์ นำมาต่อขนานกันหลาย ๆ ตัว รับพลังงานจากแหล่งจ่ายเพียงชุดเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เป็นตัวอย่างหนึ่งของการต่อขนานมอเตอร์เฟสเดียว 2 ตัว การพัฒนาแบบจำลองอาศัยสมการ 3.6 ซึ่งนำมาเขียนแสดงได้ใหม่ดังสมการ 3.26 เมื่อพิจารณาว่ามีมอเตอร์สองตัวต่อขนานกัน ความสัมพันธ์ตาม 3.26 สามารถนำมาเขียนแสดงแบบต่อเรียงกันตามแนวบนล่างเกิดเป็นสมการ 3.27 ในสมการจะเห็นได้ว่าเมตริกซ์  $[V]$  มีขนาด 4 แถว 1 หลัก ที่อยู่ทางด้านขวาสุดของสมการสเตตในมอเตอร์ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 นั้นจะเป็นชุดเมตริกซ์ชุดเดียวกัน และด้วยวิธีดำเนินการในลักษณะเช่นนี้ เมื่อพิจารณามอเตอร์  $n$  ตัวต่อขนานกัน มีแหล่งจ่ายกำลังเช่นเดียวกัน จึงสามารถเขียนแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการ 3.28



รูปที่ 3.4 มอเตอร์ที่ประกอบไปด้วยขดลวด 3 ชุดต่อขนานกันสองตัวเข้ากับแหล่งจ่ายเพียงชุดเดียว

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \frac{d[i]_{4,x1}}{dt} \\ \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathfrak{R}_{11} & \mathfrak{R}_{12} & \mathfrak{R}_{13} & \mathfrak{R}_{14} & 0 & 0 \\ \mathfrak{R}_{21} & \mathfrak{R}_{22} & \mathfrak{R}_{23} & \mathfrak{R}_{24} & 0 & 0 \\ \mathfrak{R}_{31} & \mathfrak{R}_{32} & \mathfrak{R}_{33} & \mathfrak{R}_{34} & 0 & 0 \\ \mathfrak{R}_{41} & \mathfrak{R}_{42} & \mathfrak{R}_{43} & \mathfrak{R}_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{B_m}{J_m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i]_{4,x1} \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \\
&\begin{bmatrix} \mathfrak{S}_{11} & \mathfrak{S}_{12} & \mathfrak{S}_{13} & \mathfrak{S}_{14} & 0 & 0 \\ \mathfrak{S}_{21} & \mathfrak{S}_{22} & \mathfrak{S}_{23} & \mathfrak{S}_{24} & 0 & 0 \\ \mathfrak{S}_{31} & \mathfrak{S}_{32} & \mathfrak{S}_{33} & \mathfrak{S}_{34} & 0 & 0 \\ \mathfrak{S}_{41} & \mathfrak{S}_{42} & \mathfrak{S}_{43} & \mathfrak{S}_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{p}{2J_m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V]_{4,x1} \\ T_e - T_L \\ 0 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.26}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{d[i_1]_{4 \times 1}}{dt} \\ \frac{d\omega_{r1}}{dt} \\ \frac{d\theta_{r1}}{dt} \\ \frac{d[i_2]_{4 \times 1}}{dt} \\ \frac{d\omega_{r2}}{dt} \\ \frac{d\theta_{r2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathfrak{R}1_{11} & \mathfrak{R}1_{12} & \mathfrak{R}1_{13} & \mathfrak{R}1_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathfrak{R}1_{21} & \mathfrak{R}1_{22} & \mathfrak{R}1_{23} & \mathfrak{R}1_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathfrak{R}1_{31} & \mathfrak{R}1_{32} & \mathfrak{R}1_{33} & \mathfrak{R}1_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathfrak{R}1_{41} & \mathfrak{R}1_{42} & \mathfrak{R}1_{43} & \mathfrak{R}1_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-B_{m1}}{J_{m1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathfrak{R}2_{11} & \mathfrak{R}2_{12} & \mathfrak{R}2_{13} & \mathfrak{R}2_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathfrak{R}2_{21} & \mathfrak{R}2_{22} & \mathfrak{R}2_{23} & \mathfrak{R}2_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathfrak{R}2_{31} & \mathfrak{R}2_{32} & \mathfrak{R}2_{33} & \mathfrak{R}2_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathfrak{R}2_{41} & \mathfrak{R}2_{42} & \mathfrak{R}2_{43} & \mathfrak{R}2_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-B_{m2}}{J_{m2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_1]_{4 \times 1} \\ \omega_{r1} \\ \theta_{r1} \\ [i_2]_{4 \times 1} \\ \omega_{r2} \\ \theta_{r2} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \mathfrak{N}1_{11} & \mathfrak{N}1_{12} & \mathfrak{N}1_{13} & \mathfrak{N}1_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathfrak{N}1_{21} & \mathfrak{N}1_{22} & \mathfrak{N}1_{23} & \mathfrak{N}1_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathfrak{N}1_{31} & \mathfrak{N}1_{32} & \mathfrak{N}1_{33} & \mathfrak{N}1_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathfrak{N}1_{41} & \mathfrak{N}1_{42} & \mathfrak{N}1_{43} & \mathfrak{N}1_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{p_1}{2J_{m1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathfrak{N}2_{11} & \mathfrak{N}2_{12} & \mathfrak{N}2_{13} & \mathfrak{N}2_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathfrak{N}2_{21} & \mathfrak{N}2_{22} & \mathfrak{N}2_{23} & \mathfrak{N}2_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathfrak{N}2_{31} & \mathfrak{N}2_{32} & \mathfrak{N}2_{33} & \mathfrak{N}2_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathfrak{N}2_{41} & \mathfrak{N}2_{42} & \mathfrak{N}2_{43} & \mathfrak{N}2_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{p_2}{2J_{m2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V]_{4 \times 1} \\ T_{e1} + T_{L1} \\ 0 \\ [V]_{4 \times 1} \\ T_{e2} + T_{L2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [\Lambda_1] \\ [\Lambda_2] \\ [\Lambda_3] \\ \vdots \\ [\Lambda_n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathfrak{R}11]_{6 \times 6} & [0]_{6 \times 6} & [0]_{6 \times 6} & \cdots & [0]_{6 \times 6} \\ [0]_{6 \times 6} & [\mathfrak{R}22]_{6 \times 6} & [0]_{6 \times 6} & \cdots & [0]_{6 \times 6} \\ [0]_{6 \times 6} & [0]_{6 \times 6} & [\mathfrak{R}33]_{6 \times 6} & \vdots & [0]_{6 \times 6} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [0]_{6 \times 6} & [0]_{6 \times 6} & [0]_{6 \times 6} & \cdots & [\mathfrak{R}nn]_{6 \times 6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Lambda_1] \\ [\Lambda_2] \\ [\Lambda_3] \\ \vdots \\ [\Lambda_n] \end{bmatrix} +$$

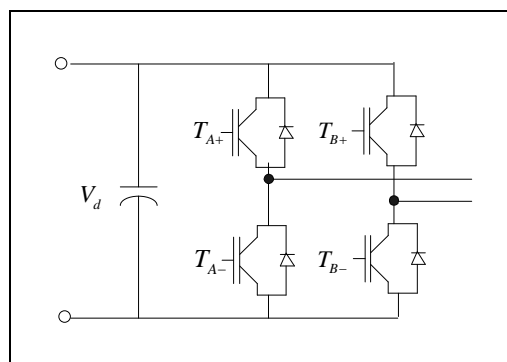
$$\begin{bmatrix} [\mathfrak{N}11]_{6 \times 6} & [0]_{6 \times 6} & [0]_{6 \times 6} & \cdots & [0]_{6 \times 6} \\ [0]_{6 \times 6} & [\mathfrak{N}22]_{6 \times 6} & [0]_{6 \times 6} & \cdots & [0]_{6 \times 6} \\ [0]_{6 \times 6} & [0]_{6 \times 6} & [\mathfrak{N}33]_{6 \times 6} & \vdots & [0]_{6 \times 6} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [0]_{6 \times 6} & [0]_{6 \times 6} & [0]_{6 \times 6} & \cdots & [\mathfrak{N}nn]_{6 \times 6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Theta_1] \\ [\Theta_2] \\ [\Theta_3] \\ \vdots \\ [\Theta_n] \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

โดยที่ 
$$[\Lambda_n] = \begin{bmatrix} i'_{qsn} \\ i'_{dsn} \\ i'_{qsm} \\ i'_{dsm} \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad [\Theta_n] = \begin{bmatrix} V_{qsn} \\ V'_{dsn} \\ V'_{qsm} \\ V'_{dsm} \\ T_e - T_L \\ 0 \end{bmatrix}$$

### 3.4 การจำลองผล

หลังจากที่ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ที่ต่อขนานกันหลายตัวรับพลังงานจากอินเวอร์เตอร์ชุดเดียวกัน ในหัวข้อนี้ได้ทำการจำลองผลโดยอาศัยแบบจำลองดังกล่าว เพื่อทดสอบลักษณะสมบัติของมอเตอร์เมื่อพารามิเตอร์เหมือนกันและแตกต่างกัน พร้อมทั้งจำลองการขับภาระในแต่ละสภาวะ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ที่อาจจะเกิดขึ้นในกรณีต่าง ๆ และจะได้นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองผลไปประยุกต์กับการออกแบบระบบควบคุมการขับเคลื่อนได้อย่างเหมาะสมต่อไป

ในการจำลองผลขับเคลื่อนมอเตอร์ร่วมกับอินเวอร์เตอร์นั้น ในการจำลองผลได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เป็นอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์ที่มีการสวิตชิงแบบพีคดับเบิลยูเอ็ม กล่าวคือ ใช้สัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์ (sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform)



รูปที่ 3.5 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์

ความถี่ในการสวิตช์ซิ่ง ( $f_s$ ) จะเท่ากับความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยม ซึ่งอัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด และอัตราการมอดูเลตด้านความถี่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.29 และ 3.30 ดังต่อไปนี้

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \quad (3.29)$$

$$m_f = \frac{f_s}{\hat{f}_l} \quad (3.30)$$

การทำงานของสวิตช์ขึ้นอยู่กับผลการเปรียบเทียบของ  $V_{control}$  และ  $V_{tri}$  โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- เมื่อ  $V_{control} > V_{tri}$  : สวิตช์  $T_{A+}$  จะนำกระแส
  - เมื่อ  $V_{control} < V_{tri}$  : สวิตช์  $T_{A-}$  จะนำกระแส
  - เมื่อ  $-(V_{control}) > V_{tri}$  : สวิตช์  $T_{B+}$  จะนำกระแส
  - เมื่อ  $-(V_{control}) < V_{tri}$  : สวิตช์  $T_{B-}$  จะนำกระแส
- เมื่อ  $V_{control}$  คือ สัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์ที่ต้องการนำมาสร้างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ทางด้านออก (V)
- $V_{tri}$  คือ สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่เป็นตัวกำหนดความถี่การสวิตช์ (V)
- $\hat{V}_{control}$  คือ ค่ายอดของสัญญาณควบคุมรูปไซน์ (V)
- $\hat{V}_{tri}$  คือ ค่ายอดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (V)
- $f_l$  คือ ความถี่หลักมูลทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์ (Hz)
- $f_s$  คือ ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ (Hz)
- $m_a$  คือ อัตราการมอดูเลตแอมพลิจูด
- $m_f$  คือ อัตราการมอดูเลตความถี่

และค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล ( $\hat{V}_{A0}$ ) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$V_{A0} = \frac{V_{control}}{\hat{V}_{tri}} \cdot \frac{V_d}{2} \quad V_{control} \leq \hat{V}_{tri} \quad (3.31)$$

$$V_{control} = \hat{V}_{control} \sin \omega t \quad V_{control} \leq \hat{V}_{tri} \quad (3.32)$$

เมื่อแทนค่าสมการ 3.31 ลงในสมการที่ 3.32 จะได้ว่า

$$(V_{A0}) = \left( \frac{V_{control}}{\hat{V}_{tri}} \cdot \frac{V_d}{2} \right) \sin \omega t$$

$$(V_{A0}) = m_a \left( \frac{V_d}{2} \right) \sin \omega t$$

$$(\hat{V}_{A0}) = m_a \left( \frac{V_d}{2} \right) \quad (3.33)$$

การจำลองผลดำเนินการด้วยโปรแกรม MATLAB โดยเริ่มจากการรับค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์แต่ละตัว และกำหนดค่าเริ่มต้นต่าง ๆ ของมอเตอร์ หลังจากนั้นก็จะเป็นกระบวนการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการ จากนั้นนำมาคำนวณค่าแรงบิดและความเข้มสนามแม่เหล็กเชื่อมโยงตามลำดับ ในการจำลองผลการขับมอเตอร์ 3 ตัว แบ่งการจำลองผลออกเป็น 4 สถานะด้วยกัน ได้แก่

*สถานะที่ 1* กำหนดให้พารามิเตอร์และภาระของมอเตอร์แต่ละตัวเท่ากัน โดยมอเตอร์ทุกตัวมีพารามิเตอร์เท่ากับตัวที่ 1

มอเตอร์ 1 : พารามิเตอร์ชุดที่ 1    แรงบิดของภาระตัวที่ 1

มอเตอร์ 2 : พารามิเตอร์ชุดที่ 1    แรงบิดของภาระตัวที่ 1

มอเตอร์ 3 : พารามิเตอร์ชุดที่ 1    แรงบิดของภาระตัวที่ 1

*สถานะที่ 2* กำหนดให้พารามิเตอร์ของมอเตอร์เท่ากันทุกตัวแต่ภาระแตกต่างกัน โดยมอเตอร์ทุกตัวมีพารามิเตอร์เท่ากับตัวที่ 1

มอเตอร์ 1 : พารามิเตอร์ชุดที่ 1    แรงบิดของภาระตัวที่ 1

มอเตอร์ 2 : พารามิเตอร์ชุดที่ 1    แรงบิดของภาระตัวที่ 2

มอเตอร์ 3 : พารามิเตอร์ชุดที่ 1    แรงบิดของภาระตัวที่ 3

*สถานะที่ 3* กำหนดให้พารามิเตอร์ของมอเตอร์แต่ละตัวแตกต่างกัน ภาระเท่ากันทุกตัว

มอเตอร์ 1 : พารามิเตอร์ชุดที่ 1    แรงบิดของภาระตัวที่ 1

มอเตอร์ 2 : พารามิเตอร์ชุดที่ 2    แรงบิดของภาระตัวที่ 1

มอเตอร์ 3 : พารามิเตอร์ชุดที่ 3    แรงบิดของภาระตัวที่ 1

สภาวะที่ 4 กำหนดให้พารามิเตอร์ของมอเตอร์และ ภาระของมอเตอร์แตกต่างกัน

มอเตอร์ 1 : พารามิเตอร์ชุดที่ 1 แรงบิดของภาระตัวที่ 1

มอเตอร์ 2 : พารามิเตอร์ชุดที่ 2 แรงบิดของภาระตัวที่ 2

มอเตอร์ 3 : พารามิเตอร์ชุดที่ 3 แรงบิดของภาระตัวที่ 3

ขนาดแรงบิดของภาระเป็นป้อนน้ำชนิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง 3 ตัว ซึ่งมีสมการของความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็ว เป็นดังนี้  $T = k\omega^2$

- แรงบิดของภาระตัวที่ 1 :  $1.8 \times 10^{-4} \omega^2$  Nm
- แรงบิดของภาระตัวที่ 2 :  $9.5 \times 10^{-5} \omega^2$  Nm
- แรงบิดของภาระตัวที่ 3 :  $7.5 \times 10^{-5} \omega^2$  Nm

การจำลองผลจะใช้ค่าพารามิเตอร์สำหรับมอเตอร์แต่ละตัว ดังที่แสดงในตารางที่ 3.1 (Mademlis, 2005; Rahim, 2002) โดยแหล่งจ่ายพลังงานที่ให้แก่มอเตอร์จะควบคุมแรงดันให้มีขนาด 220 V และความถี่ 50 Hz เพียงชุดเดียว ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.6 ถึง 3.17

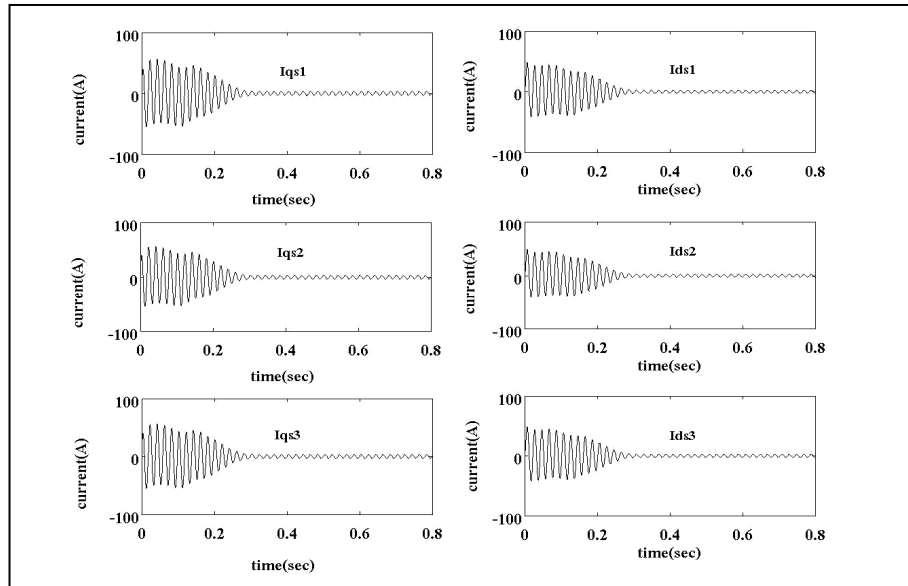


ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ (Mademlis, 2005; Rahim, 2002)

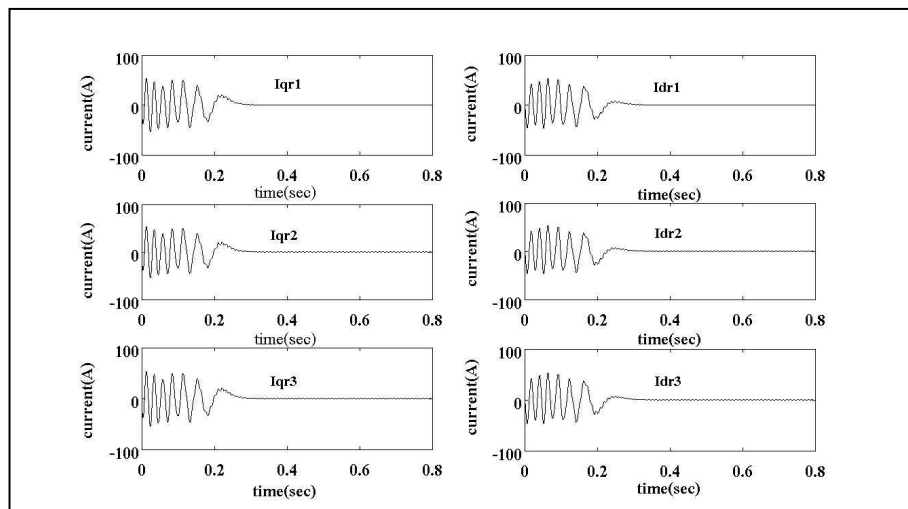
Parameter set	poles	$r_{qs}$ ( $\Omega$ )	$r_{ds}$ ( $\Omega$ )	$r_r$ ( $\Omega$ )	$L_{mqs}$ ( $\Omega$ )	$L_{lr}$ ( $\Omega$ )	$L_{lqs}$ ( $\Omega$ )	$L_{lds}$ ( $\Omega$ )	J ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )	$B_m$ ( $\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}/\text{sec}$ )
1	4	4.3	2.6	2.01	105	1.8	1.01	1.8	0.0546	0.0002
2	4	1.3	2.6	2.01	105	2.8	2.01	2.8	0.0546	0.0002
3	4	3.2	7.2	2.00	54.97	3.2	3.61	2.09	0.0546	0.0002

ตารางที่ 3.2 ผลการจำลองในแต่ละสภาวะ

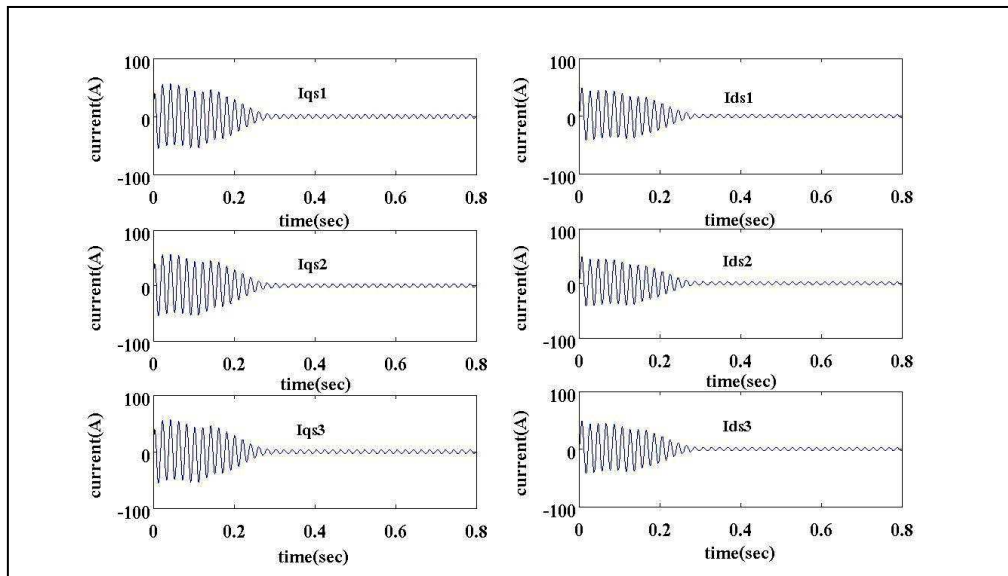
	Case 1			Case 2			Case 3			Case 4		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Supply Current ( $A_{rms}$ )	25.44			17.48			32.42			22.07		
Motor Current ( $A_{rms}$ )	8.48	8.48	8.48	8.48	4.85	4.15	8.48	10.09	13.85	8.48	5.91	7.68
Motor Speed (rpm)	1402	1402	1402	1402	1450	1461	1402	1408	1370	1402	1452	1455
Load Torque (N.m)	14.27	14.27	14.27	14.27	7.78	6.14	14.27	14.46	17.74	14.27	9.33	8.62
Motor Slip	0.065	0.065	0.065	0.065	0.033	0.026	0.065	0.061	0.086	0.065	0.032	0.030



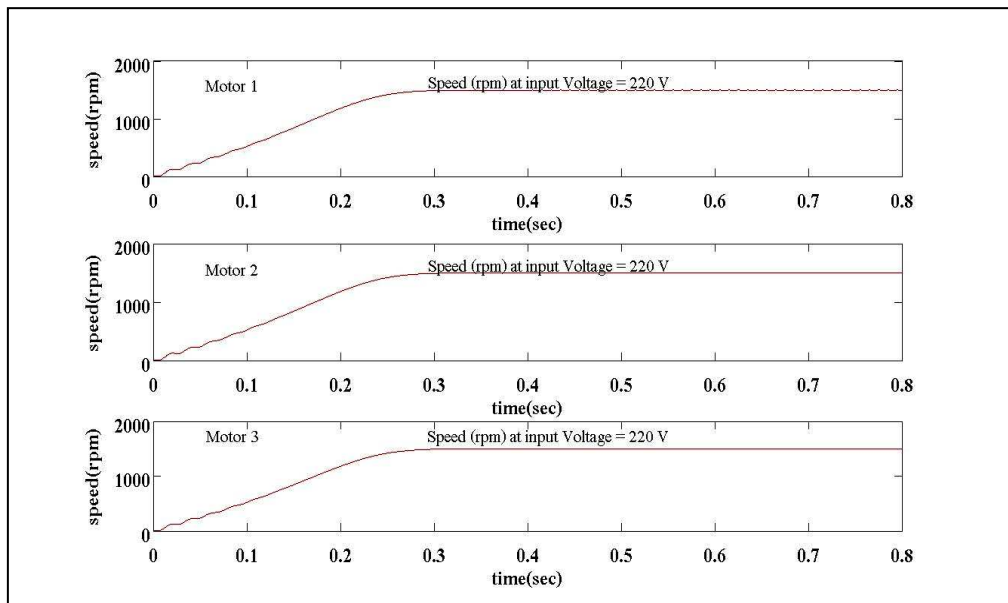
รูปที่ 3.6 กระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสถานะที่ 1



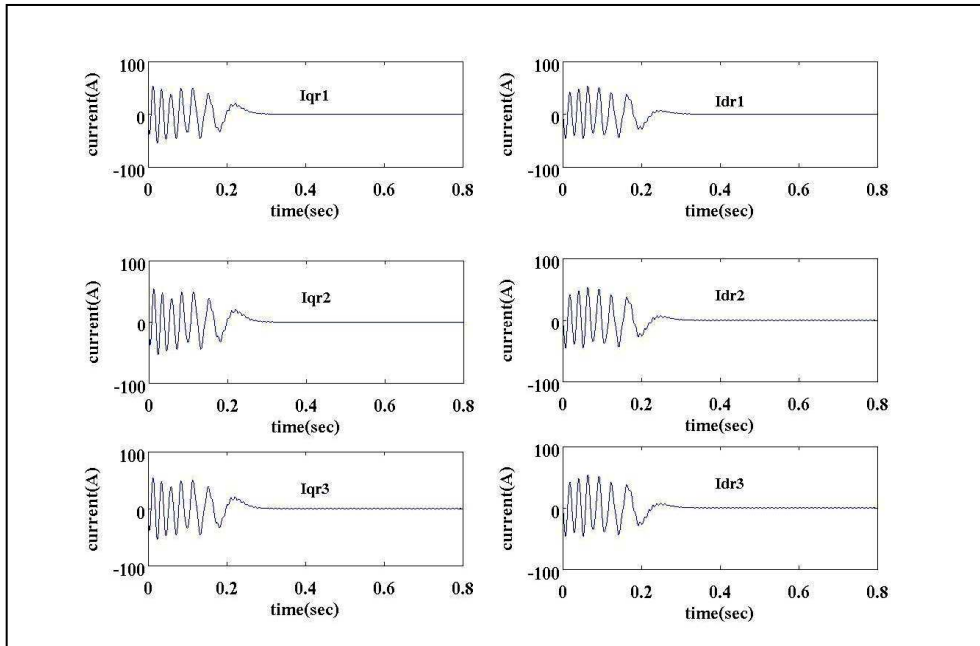
รูปที่ 3.7 กระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสถานะที่ 1



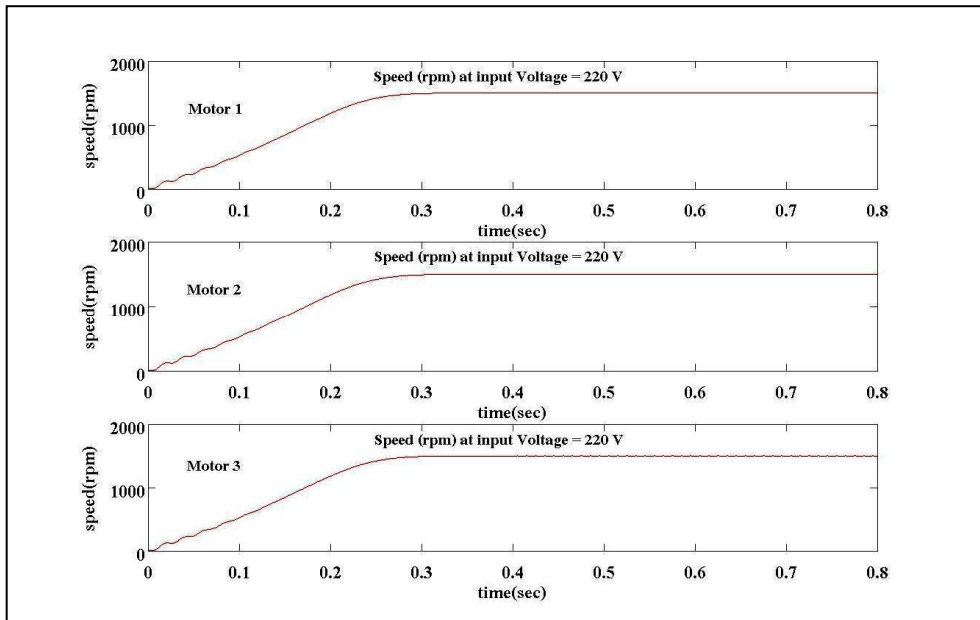
รูปที่ 3.8 ความเร็วของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสภาวะที่ 1



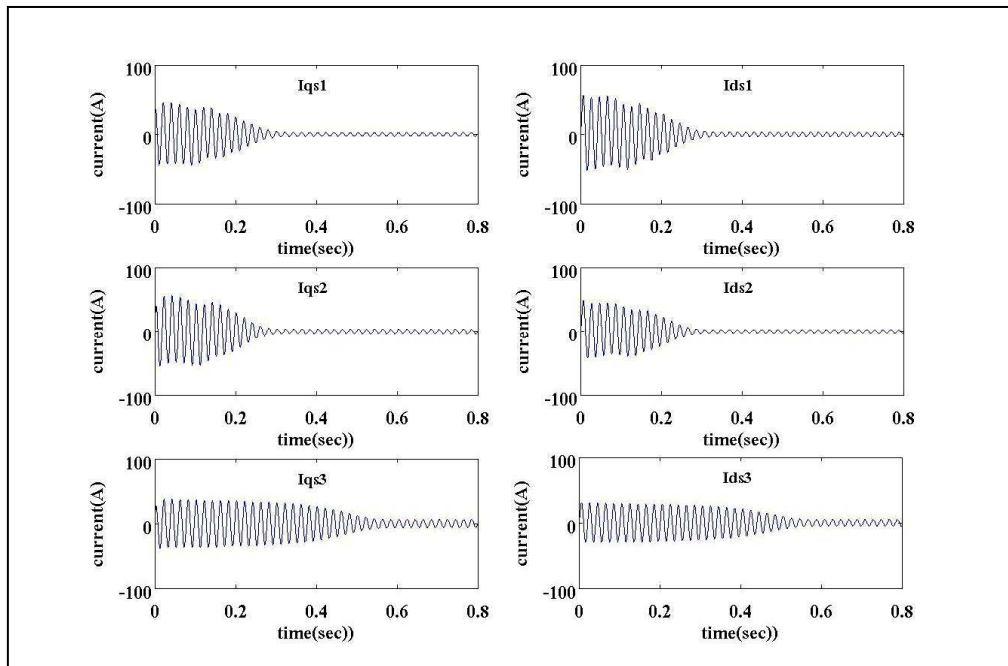
รูปที่ 3.9 กระแสเดเตอร์ของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสภาวะที่ 2



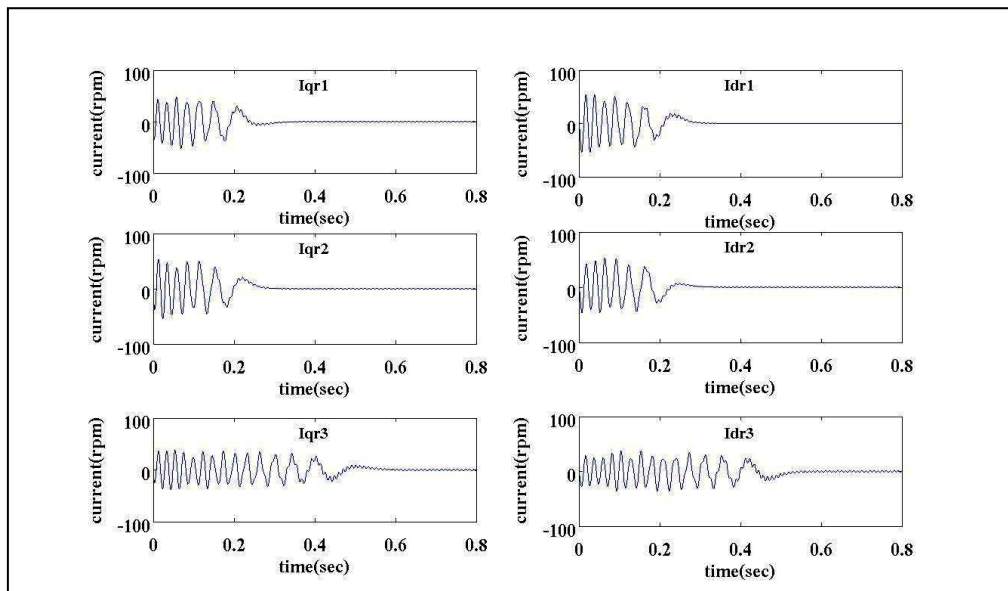
รูปที่ 3.10 กระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสภาวะที่ 2



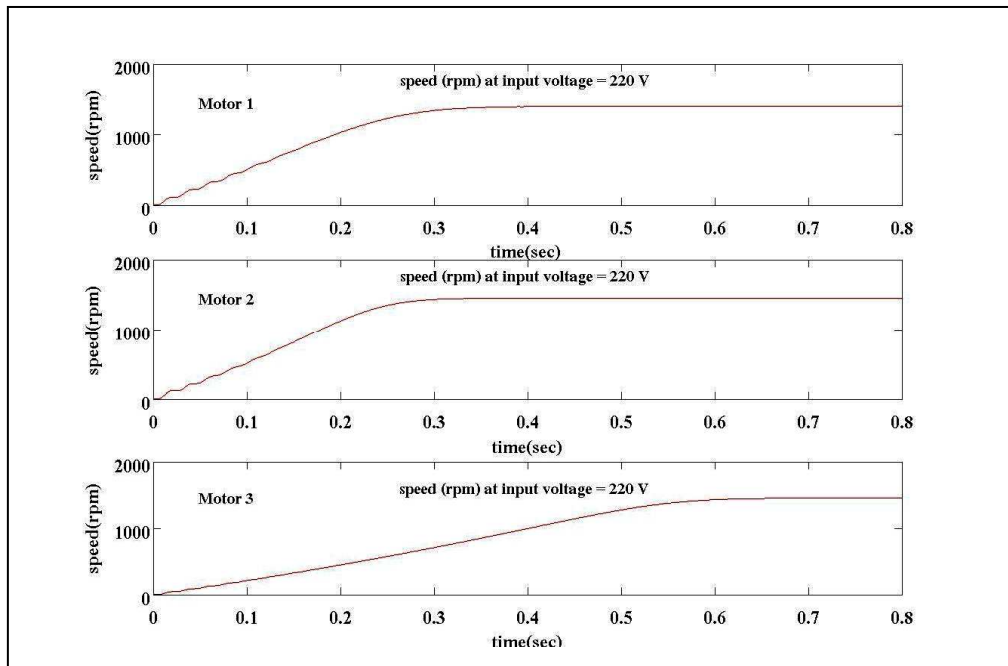
รูปที่ 3.11 ความเร็วของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสภาวะที่ 2



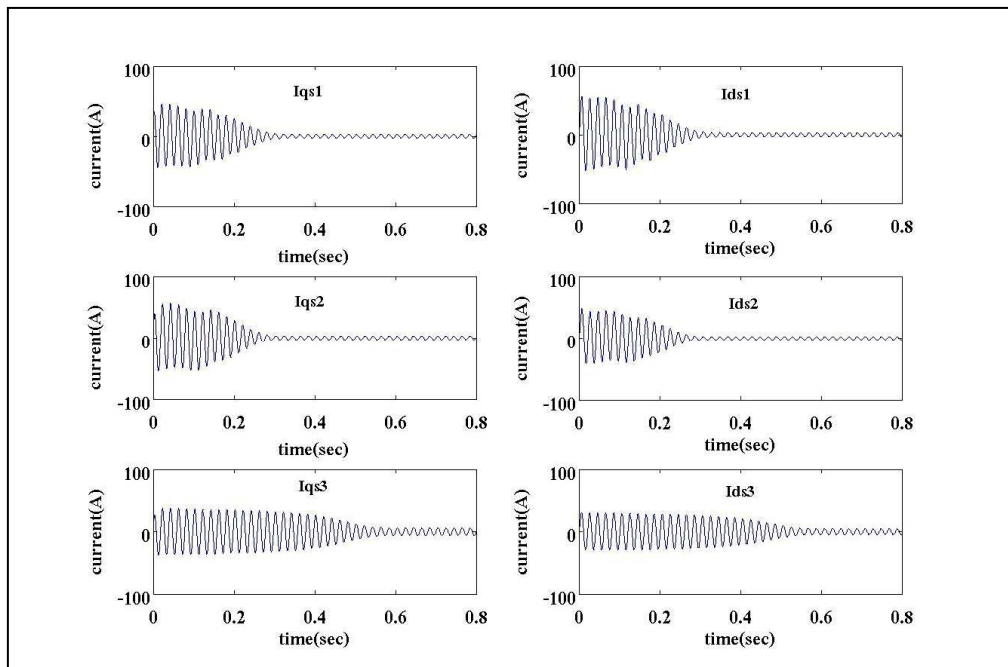
รูปที่ 3.12 กระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสถานะที่ 3



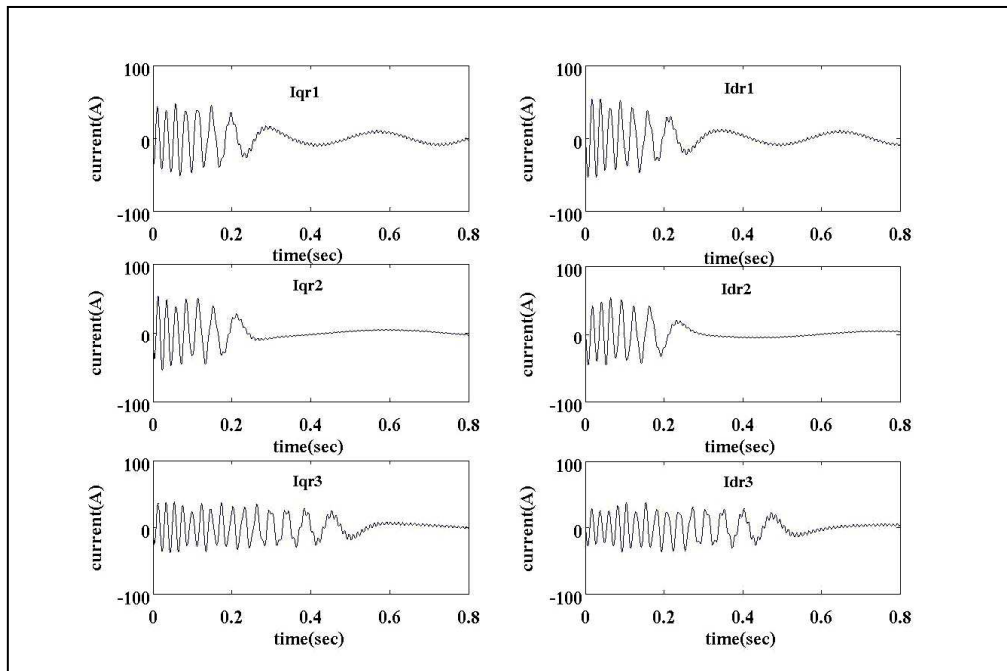
รูปที่ 3.13 กระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสถานะที่ 3



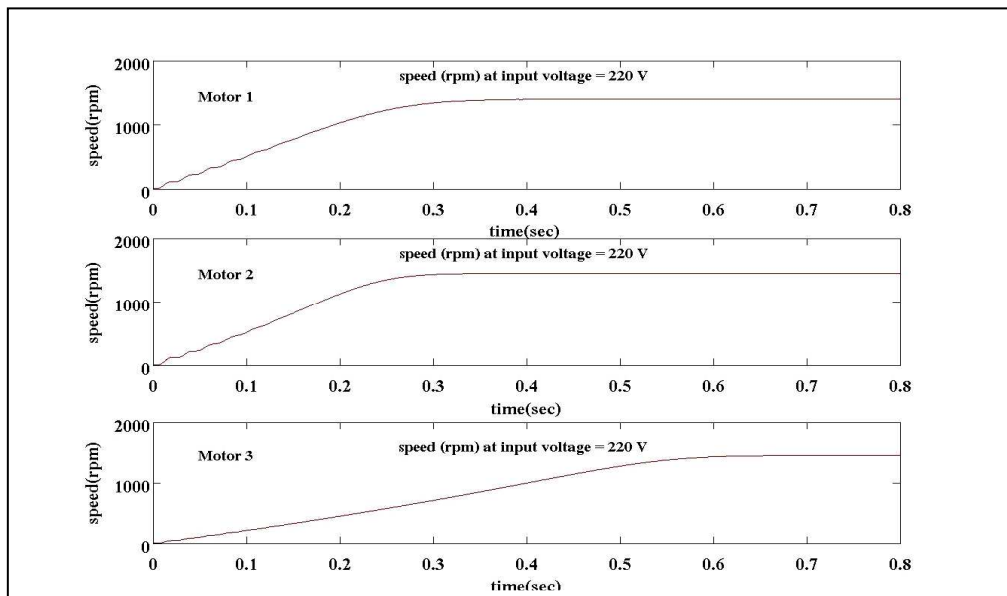
รูปที่ 3.14 ความเร็วของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสภาวะที่ 3



รูปที่ 3.15 กระแสเดเตอร์ของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสภาวะที่ 4



รูปที่ 3.16 กระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสถานะที่ 4



รูปที่ 3.17 ความเร็วของมอเตอร์ทั้งสามตัวจากการจำลองผลในสถานะที่ 4

### 3.5 อภิปรายผล

จากตารางที่ 3.2 ซึ่งแสดงข้อมูลที่ได้จากการจำลองผลการขับภาระของมอเตอร์ที่ต่อขนานกัน 3 ตัว จะเห็นว่าในสภาวะที่ 1 (case1) มอเตอร์มีพารามิเตอร์เหมือนกัน ทำการขับภาระเหมือนกัน ค่าต่าง ๆ ที่เป็นผลลัพธ์จากการจำลองผลดังที่ได้แสดงในตารางจึงมีค่าเท่ากัน และรูปที่ 3.6 ถึง 3.8 แสดงปริมาณกระแสและอัตราเร็วรอบของมอเตอร์ที่เท่ากัน ในสภาวะที่ 2 (case2) เมื่อให้มอเตอร์มีพารามิเตอร์เท่ากันตามสภาวะที่ 1 ได้กำหนดขึ้น ขับภาระแตกต่างกัน ทำให้มีการดึงกระแสและสภาวะคงค่าความเร็วของมอเตอร์แต่ละตัวไม่เท่ากัน ดังที่ปรากฏในตารางที่ 3.2 และแสดงเป็นกราฟไว้ในรูปที่ 3.9 ถึง 3.11 ในสภาวะที่ 3 (case3) มอเตอร์แต่ละตัวถูกกำหนดให้มีพารามิเตอร์แตกต่างกัน ถึงแม้จะขับภาระเท่ากัน ทำให้มีการดึงกระแสแตกต่างกันและความเร็วมอเตอร์ไว้ระดับด้วยอัตราที่ไม่เท่ากัน ดังแสดงด้วยกราฟในรูปที่ 3.12 ถึง 3.14 และในสภาวะที่ 4 (case4) ทั้งพารามิเตอร์และภาระของมอเตอร์แต่ละตัวไม่เท่ากัน ทำให้การดึงกระแสและความเร็วแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ถึง 3.17 ดังนั้นในการขนานมอเตอร์ต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์ของมอเตอร์แต่ละตัวให้เท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อไม่ให้เกิดผลการทำงานที่แตกต่างจากคำสั่งการควบคุมเพียงชุดเดียวจนทำให้เกิดค่าผิดพลาดของการควบคุมมากตามไปด้วย

จากการจำลองผลโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับการขนานมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดหนึ่งเฟสหลาย ๆ ตัว โดยรับพลังงานจากแหล่งจ่ายที่เป็นอินเวอร์เตอร์เพียงชุดเดียว ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.5 ถึง 3.16 เห็นได้ว่า เมื่อมอเตอร์เริ่มขับโหลด จะมีการดึงกระแสในช่วงแรก ๆ ก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงตัว สอดคล้องกับความเร็วของมอเตอร์ โดยสังเกตได้จากเวลาที่กระแสและความเร็วของมอเตอร์เข้าสู่สภาวะคงตัวมีค่าเท่ากัน เช่น ในสภาวะที่ 3 และ 4 กราฟกระแสและความเร็วมอเตอร์ตัวที่ 3 จะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 0.55 วินาทีเหมือนกัน ดังนั้นไม่ว่าการทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดที่แตกต่างกันทั้ง 4 สภาวะ (Correa et al., 1999) ผลที่ได้ยังคงมีความสอดคล้องกัน จากการทดสอบแบบจำลองในสภาวะต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดหนึ่งเฟสต่อขนานกัน  $n$  ตัว ที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม



## บทที่ 4

# การควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์ที่ต่อขนานกันหลายตัว ด้วยตัวควบคุมฟuzzyแบบจัดการตัวเอง

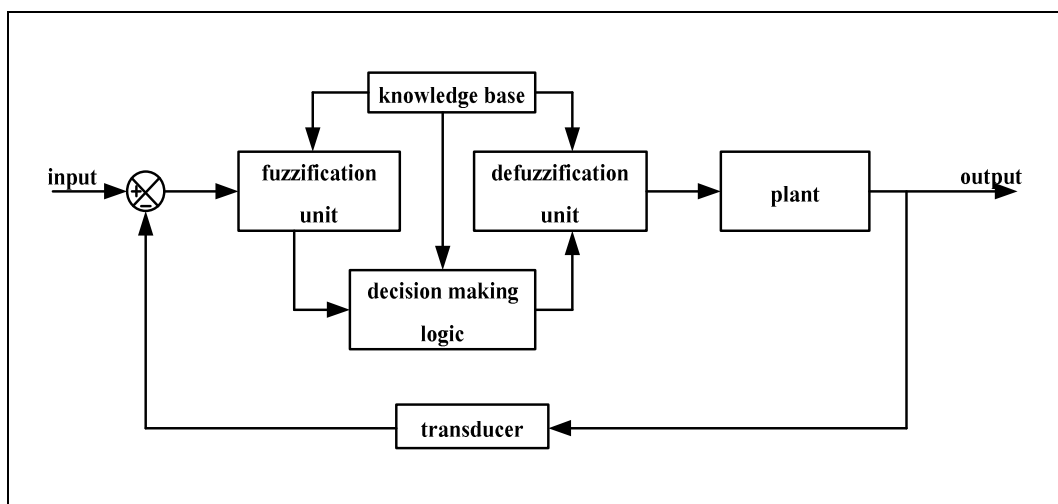
### 4.1 บทนำ

ฟuzzyเซตได้ถูกนำเสนอครั้งแรกในปี ค.ศ. 1965 โดย Lotfi Zadeh และในปี ค.ศ. 1977 King and Mamdani ได้เริ่มนำมาประยุกต์ใช้เป็นยุคแรก ๆ ต่อมาจึงได้รับการใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในชีวิตประจำวันและในวงการอุตสาหกรรม ดังที่ได้รู้จักกันในนามเทคโนโลยี “fuzzy logic, fuzzy control, fuzzy inference และ soft-computing”

เนื่องจากในส่วนของตัวควบคุมฟuzzyมีลักษณะคล้ายการตัดสินใจของมนุษย์ กล่าวคือสามารถที่จะแสดงการวินิจฉัยและตัดสินใจในรูปแบบประโยคเงื่อนไข IF-THEN ซึ่งเป็นรูปแบบที่เข้าใจง่าย นับตั้งแต่ฟuzzyเซตและฟuzzyลอจิกได้รับการนำเสนอจนถึงปัจจุบันได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยอย่างมากมาย เช่น ระบบขับเคลื่อนกระแสตรงด้วยคอนเวอร์เตอร์ชนิดควบคุมเฟส และในการวิจัยนี้ได้นำหลักการฟuzzyลอจิกมาประยุกต์ใช้ในระบบควบคุม กล่าวคือได้พัฒนาตัวควบคุมฟuzzyลอจิกที่มีการจัดการตัวเอง (Chengying and Yung, 2005) ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่มีการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนและนำมาปรับกระบวนการควบคุม สำหรับใช้เป็นตัวควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่ต่อขนานกันหลายตัว โดยมุ่งเน้นควบคุมอัตราเร็วของมอเตอร์พร้อมกันหลาย ๆ ตัวให้มีอัตราเร็วที่ใกล้เคียงกัน เช่นในเครื่องสับพีชผลทางการเกษตรที่ต้องใช้การควบคุมมอเตอร์หลาย ๆ ตัว พร้อมกัน สำหรับทำหน้าที่หรือกระบวนการที่แตกต่างกัน เนื่องจากแต่ละกิจกรรมที่มีความต้องการผลผลิตแตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นขนาด หรือความละเอียดของชิ้นวัสดุที่ออกมาจากกระบวนการ ซึ่งต้องอาศัยอัตราเร็วของใบมีด กระแทก หั่น หรือ สับ ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่เป็นพีชผลทางการเกษตร ที่มีความเหนียว ความชื้น ความแข็ง รูปร่างลักษณะ เส้นใย แตกต่างกันไป จากกระบวนการดังกล่าวจะเห็นว่าระบบมีความยุ่งยากซับซ้อน การใช้ระบบควบคุมฟuzzyแบบจัดการตัวเองเข้ามาควบคุมเพื่อให้เกิดผลการควบคุมเป็นไปตามที่ต้องการจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม เพราะระบบฟuzzyมีความสามารถที่ยืดหยุ่น และคงทนต่อความคลาดเคลื่อนในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพลาเน็ต นั้นหมายความว่า ในการพัฒนาเทคโนโลยีระบบควบคุมอาจไม่ต้องพึ่งพาแบบจำลองหรือสามารถใช้แบบจำลองโดยประมาณได้

## 4.2 ระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

ระบบควบคุมแบบฟัซซี ดังเนื้อหาปรากฏในการทบทวน โดย (Sujitjorn, 1995) มีโครงสร้างพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 4.1 แสดงลักษณะพื้นฐานของระบบควบคุมแบบฟัซซีมีองค์ประกอบหลักอยู่ 4 ส่วน ได้แก่ ชุดปฏิบัติการฟัซซีฟิเคชัน (fuzzification unit) ฐานความรู้ (knowledge base) ลอจิกเพื่อการตัดสินใจ (decision making logic) และชุดปฏิบัติการดีฟัซซีฟิเคชัน (defuzzification unit) ปฏิบัติการฟัซซีฟิเคชัน ทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลแบบธรรมดาให้ไปอยู่ในรูปของตัวแปรภาษา หรือตัวแปรฟัซซี ซึ่งเป็นการแปลงข้อมูลทางด้านอินพุต ฐานความรู้ประกอบด้วยส่วนที่เป็นฐานข้อมูล (data base) และฐานกฎการควบคุม (control rule base) ส่วนที่เป็นฐานข้อมูลนั้นให้นิยามต่าง ๆ ที่ใช้กำหนดกฎการควบคุมแบบตัวแปรทางภาษา และบ่งบอกข้อมูลแบบฟัซซีต่าง ๆ สำหรับตัวควบคุมแบบฟัซซี ส่วนที่เป็นฐานกฎนั้นเป็นศูนย์รวมของกฎการควบคุมแบบตัวแปรทางภาษา ซึ่งแสดงถึงแนวทางการควบคุมให้ระบบมีพฤติกรรมตามต้องการ ลอจิกเพื่อให้เกิดการตัดสินใจ เป็นส่วนที่ให้การเลียนแบบการตัดสินใจของมนุษย์ โดยอาศัยแนวความคิดทางคณิตศาสตร์และการอนุมานแบบฟัซซี ชุดปฏิบัติการดีฟัซซีฟิเคชันทำหน้าที่แปลงข้อมูลแบบฟัซซี ไปเป็นตัวแปรแบบธรรมดา (conventional variable) ที่สมนัยกัน เพื่อให้ระบบภายใต้การควบคุมสามารถเข้าใจสัญญาณดังกล่าวได้ ข้อมูลแบบฟัซซีที่กล่าวถึงข้างต้นเป็นข้อมูลที่ได้จากการอนุมานกฎการควบคุมแบบฟัซซีต่าง ๆ

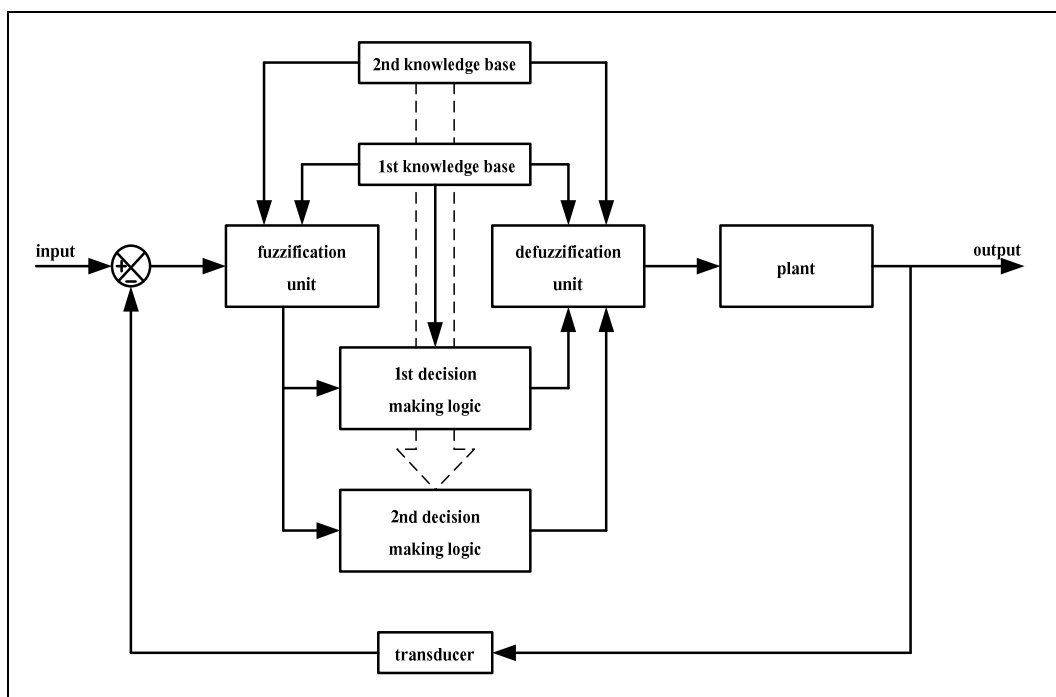


รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นฐานของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

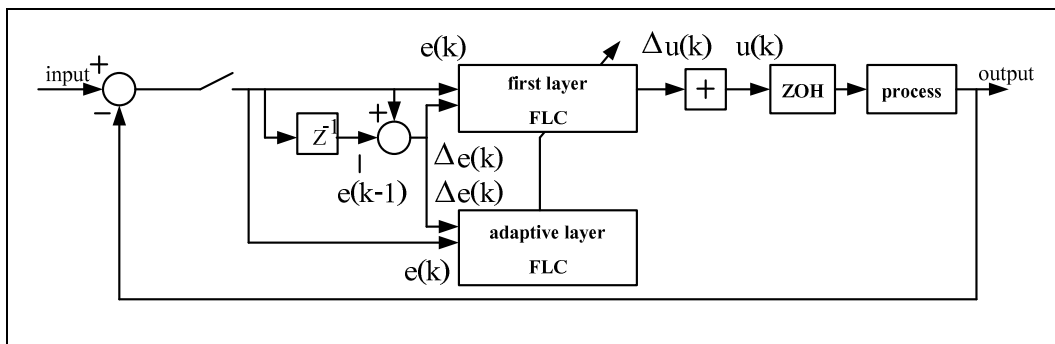
### 4.3 ระบบควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเอง

ระบบควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเอง มีโครงสร้างพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 4.2 ตัวควบคุมประกอบด้วย ชุดปฏิบัติการฟัซซีพีเคชัน ฐานความรู้ชั้นแรก ฐานความรู้ชั้นที่สอง ลอจิกเพื่อการตัดสินใจชั้นแรก ลอจิกเพื่อการตัดสินใจชั้นที่สอง และชุดปฏิบัติการดีฟัซซีพีเคชัน กฎการควบคุมมี 2 อินพุต และ 1 เอาต์พุต โดยสัญญาณความคลาดเคลื่อนระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตจะเข้าสู่ตัวควบคุมฟัซซีทั้งสองชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จากนั้นสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมฟัซซีจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบที่ต้องการควบคุม จนกระทั่งได้สัญญาณเอาต์พุตของระบบ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

ในส่วนของตัวแปรอินพุตคือสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนของกระบวนการ (error,  $e$ ) และการเปลี่ยนแปลงค่าความคลาดเคลื่อนของกระบวนการ (change in error,  $\Delta e$ ) ส่วนตัวแปรเอาต์พุต คือการเปลี่ยนแปลงในสัญญาณการควบคุม ( $\Delta u$ ) ตัวควบคุมแบบนี้แตกต่างจากตัวควบคุมฟัซซีลอจิกคือ ระบบควบคุมจะทำการประมวลผลด้วยกระบวนการฟัซซีอีกชั้นหนึ่งที่มีความละเอียดมากกว่า และนำผลที่ได้ไปประมวลผลร่วมกับดีฟัซซีฟายในชั้นแรก เพื่อปรับเปลี่ยนค่าการควบคุมให้มีช่วงห่างของความคลาดเคลื่อนลดลง ให้ผลในการควบคุมที่แม่นยำยิ่งขึ้น ซึ่งจะได้อธิบายการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเองสำหรับงานวิจัยนี้ในหัวข้อต่อไป



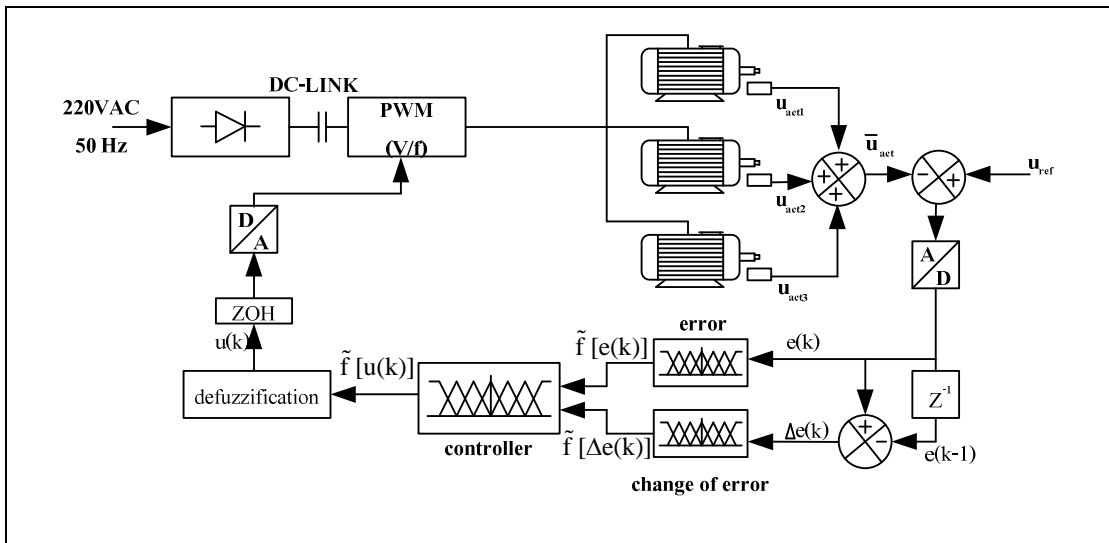
รูปที่ 4.2 โครงสร้างของระบบควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเอง



รูปที่ 4.3 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเอง

#### 4.4 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเองในงานวิจัยนี้

การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเองสำหรับควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัวรับพลังงานจากอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันชุดเดียว ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ขับโหลดแต่ละตัวด้วยแรงบิดสูงสุดไม่เกิน 6 Nm ทั้งนี้จะพิจารณาความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัวของอัตราเร็วไม่เกิน  $\pm 5\%$  ของอัตราเร็วอ้างอิงที่ 1200 rpm เป็นปัจจัยบ่งชี้สมรรถนะของระบบ ตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเองมีโครงสร้างพื้นฐานดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.3 ตัวแปรอินพุตของระบบ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนอัตราเร็วรอบมอเตอร์ (error,  $e$ ) และการเปลี่ยนแปลงค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราเร็วมอเตอร์ (change in error,  $\Delta e$ ) ส่วนตัวแปรเอาต์พุต คือ การเปลี่ยนแปลงในสัญญาณการควบคุม ( $\Delta u$ )



รูปที่ 4.4 แผนภาพระบบควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ต้องขนานกันหลายตัว  
รับพลังงานจากอินเวอร์เตอร์เพียงชุดเดียวด้วยตัวควบคุมฟัซซี

ตารางที่ 4.1 กฎการควบคุมฟัซซีในตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบธรรมดา

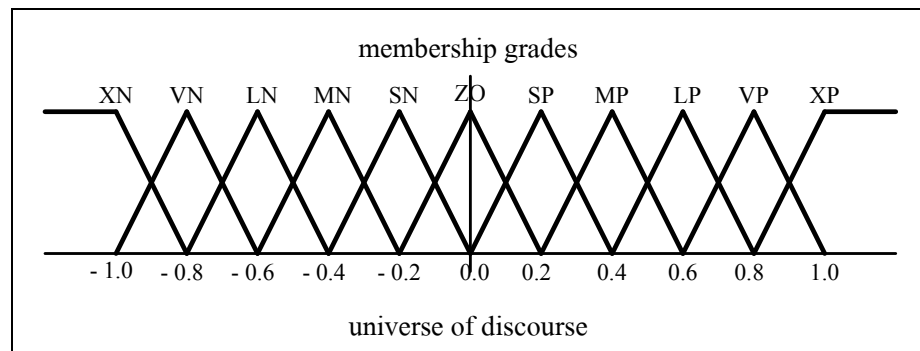
		Change in error										
		XN	VN	LN	MN	SN	ZO	SP	MP	LP	VP	XP
Error	XN	XP	XP	XP	XP	XP	XP	VP	LP	MP	SP	ZO
	VN	XP	XP	XP	XP	XP	VP	LP	MP	SP	ZO	SN
	LN	XP	XP	XP	XP	VP	LP	MP	SP	ZO	SN	MN
	MN	XP	XP	XP	VP	LP	MP	SP	ZO	SN	MN	LN
	SN	XP	XP	VP	LP	MP	SP	ZO	SN	MN	LN	VN
	ZO	XP	VP	LP	MP	SP	ZO	SN	MN	LN	VN	XN
	SP	VP	LP	MP	SP	ZO	SN	MN	LN	VN	XN	XN
	MP	LP	MP	SP	ZO	SN	MN	LN	VN	XN	XN	XN
	LP	MP	SP	ZO	SN	MN	LN	VN	XN	XN	XN	XN
	VP	SP	ZO	SN	MN	LN	VN	XN	XN	XN	XN	XN
	XP	ZO	SN	MN	LN	VN	XN	XN	XN	XN	XN	XN

การออกแบบระบบควบคุมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ดำเนินการในแนวศึกษาสำนึก (heuristics) โดยอาศัยข้อมูลความรู้ที่เป็นผลของการจำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งจากการวิเคราะห์พฤติกรรมของมอเตอร์โดยอาศัยผลการจำลองสถานการณ์ ดังปรากฏในบทที่ 3 สามารถกำหนดกฎฟัซซีในขั้นแรกได้ดังตารางที่ 4.1 และพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนทางอัตราเร็วของมอเตอร์  $e(k)$  ที่ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณคำสั่งอ้างอิง  $u_{ref}(k)$  กับสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจวัดอัตราเร็วเฉลี่ย  $\bar{u}_{act}(k)$  และเมื่อระบบทำงานครบวัฏจักร จะได้ค่าความคลาดเคลื่อน  $e(k-1)$  เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนเดิมก็จะได้ปริมาณการเปลี่ยนแปลงในค่าความคลาดเคลื่อน  $\Delta e(k)$  และเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$e(k) = u_{ref}(k) - \bar{u}_{act}(k) \quad (4.1)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (4.2)$$

ค่า  $e(k)$  และ  $\Delta e(k)$  ถูกนำไปผ่านกระบวนการฟัซซีฟิเคชันเกิดเป็นค่า  $\tilde{f}[e(k)]$  และ  $\tilde{f}[\Delta e(k)]$  ซึ่งต่อไปเพื่อให้เข้าใจง่ายจะเรียกพจน์ทั้งสองที่ผ่านการฟัซซีฟายด์แล้วว่า  $e(k)$  และ  $\Delta e(k)$  ค่าการเปลี่ยนแปลงของ  $e(k)$  และ  $\Delta e(k)$  สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วรอบของมอเตอร์ กล่าวคือ อัตราเร็วรอบของมอเตอร์ในงานวิจัยนี้จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่เป็นอัตราส่วน โดยตรงกับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ความถี่ดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงไปตามวัฏจักรการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่รับคำสั่งการควบคุมมาจากการประมวลผลของตัวควบคุม สัญญาณควบคุม  $u(k)$  ที่เป็นผลลัพธ์ของกระบวนการดีฟัซซีฟิเคชันที่กระทำต่อ  $\tilde{f}[u(k)]$  ใช้เป็นตัวปรับวัฏจักรการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ตัวควบคุมฟัซซีมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกภาพ (membership functions) เป็นรูปทรงสามเหลี่ยมหน้าจั่ว แสดงได้ด้วยรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟฟังก์ชันสมาชิกภาพสำหรับ  $e_1$ ,  $e_2$  และ  $u_1$

มีตัวแปรทางภาษาตามตารางฐานกฎการควบคุมแสดงในตารางที่ 4.1 ดังนี้

XN	คือ	ค่าทางลบมากพิเศษ
VN	คือ	ค่าทางลบมาก ๆ
LN	คือ	ค่าทางลบมาก
MN	คือ	ค่าทางลบปานกลาง
SN	คือ	ค่าทางลบน้อย ๆ
Z0	คือ	ค่ากลาง
SP	คือ	ค่าทางบวกน้อย ๆ
MP	คือ	ค่าทางบวกปานกลาง
LP	คือ	ค่าทางบวกมาก
VP	คือ	ค่าทางบวกมาก ๆ
XP	คือ	ค่าทางบวกมากพิเศษ

ทั้งอินพุตและเอาต์พุตจะใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกภาพที่เหมือนกัน มีรูปแบบกฎการควบคุมฟัซซีดังต่อไปนี้

$$\text{IF}[e_1 \text{ is } E_i] \text{ and } [e_2 \text{ is } E_j] \text{ THEN } [u_1 \text{ is } U_{n(i,j)}] \quad (4.3)$$

เมื่อ	$e_1$	คือ	ค่าความคลาดเคลื่อนของ $e(k)$
	$e_2$	คือ	การเปลี่ยนแปลงค่าความคลาดเคลื่อนของ $\Delta e(k)$
	$u_1$	คือ	การเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุม $\tilde{u}(k)$

$E_i$	คือ	ตัวแปรทางภาษาของ $e_1$
$E_j$	คือ	ตัวแปรทางภาษาของ $e_2$
$U_{n(i,j)}$	คือ	ตัวแปรทางภาษาของ $u_1$

ตัวอย่างเช่น IF [ $e_1$  is MN] and [ $e_2$  is VP] THEN [ $u_1$  is MN] การอนุมานกฎใช้แบบ Mamdani (Mamdani, 1977) และดีฟัซซิฟายด้วยวิธีการคำนวณศูนย์กลางแรงโน้มถ่วง (center of gravity, COG) (Chengying and Yung, 2005) ดังนั้นการอนุมานกฎได้ผลเป็น  $u$  คือ  $u_1$  ที่ดีฟัซซิฟายแล้วสามารถแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ 4.4

$$u = \frac{\sum_{ij} [(\mu E_i(e_1) \cap \mu E_j(e_2)) \cdot U_{n(i,j)}]}{\sum_{ij} (\mu E_i(e_1) \cap \mu E_j(e_2))} \quad (4.4)$$

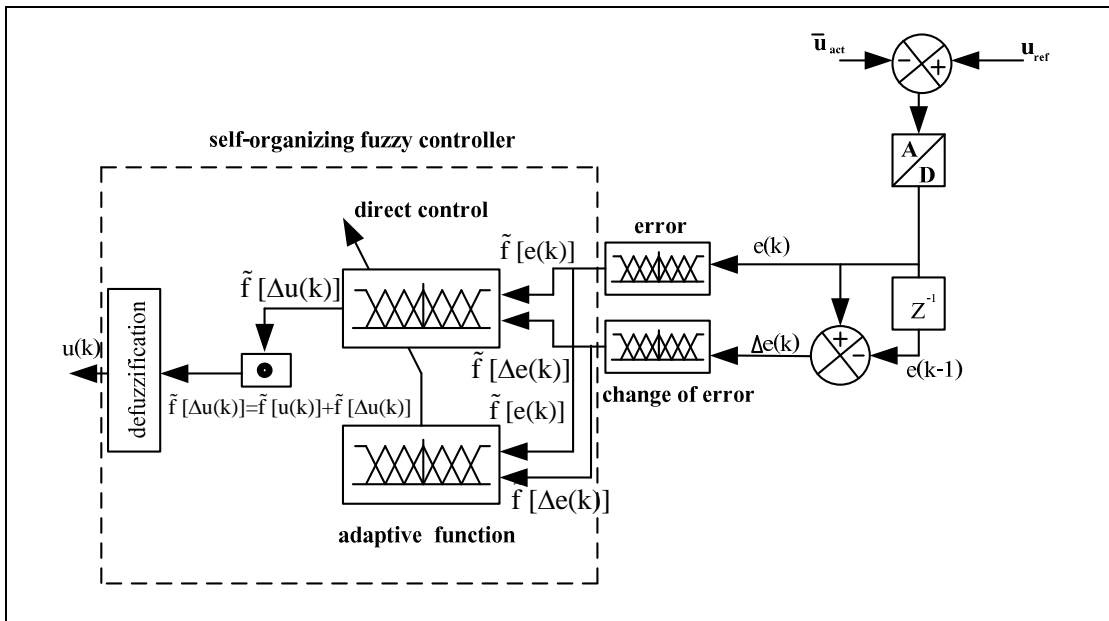
เมื่อ  $\mu E_i(e_1) \cap \mu E_j(e_2) = \min [\mu E_i(e_1), \mu E_j(e_2)]$

ขณะนี้อาจสังเกตได้ว่าตัวแปรทางภาษา  $e_1$ ,  $e_2$  และ  $u_1$  ล้วนประยุกต์ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปแบบเดียวกัน เพียงแต่ต่างโดเมนเมื่อส่งรูป (map) ไปยัง universe of discourse (UoD) การส่งรูปต่าง ๆ มีรายละเอียดต่อไปนี้

$e_1$ :	-1 บน UoD	หมายถึง	ความเร็วรอบมอเตอร์ต่ำกว่าค่าเป้าหมาย 60 rpm
	1 บน UoD	หมายถึง	ความเร็วรอบมอเตอร์สูงกว่าค่าเป้าหมาย 60 rpm
	0 บน UoD	หมายถึง	ความเร็วรอบมอเตอร์อยู่ที่ค่าเป้าหมายที่ 1200 rpm
$e_2$ :	-1 บน UoD	หมายถึง	ปริมาณการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วครั้งใหม่ น้อยกว่าครั้งที่ผ่านมา มากสุดตามขอบเขต (-5%)
	1 บน UoD	หมายถึง	ปริมาณการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วครั้งใหม่ มากกว่าครั้งที่ผ่านมา มากสุดตามขอบเขต (+5%)
	0 บน UoD	หมายถึง	ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณอัตราเร็วรอบระหว่างครั้งใหม่และครั้งที่ผ่านมา
$u_1$ :	-1 บน UoD	หมายถึง	สัญญาณความถี่ในการควบคุมต่ำกว่าค่าเป้าหมาย 2 Hz
	1 บน UoD	หมายถึง	สัญญาณความถี่ในการควบคุมสูงกว่าค่าเป้าหมาย 2 Hz
	0 บน UoD	หมายถึง	สัญญาณความถี่ในการควบคุมที่ค่าเป้าหมาย 40 Hz

การแบ่งย่าน UoD ก่อให้เกิดการแบ่ง  $e_1$ ,  $e_2$  และ  $u_1$  บนโดเมนจริงอย่างเป็นสัดส่วนตรงแก่กัน





รูปที่ 4.6 ตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเอง

ตารางที่ 4.2 ฐานกฎฟัซซีของตัวควบคุมฟัซซีจัดแบบการตัวเอง

		Change in error											
		XN	VN	LN	MN	SN	ZO	SP	MP	LP	VP	XP	
Error	XN	XP	XP	XP	XP	XP	VP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	
	VN	XP	XP	XP	XP	VP	LP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	
	LN	XP	XP	XP	VP	LP	MP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	
	MN	XP	XP	VP	LP	MP	SP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	
	SN	XP	VP	LP	MP	SP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	
	ZO	VP	LP	MP	SP	ZO	ZO	ZO	SN	MN	LN	VN	
	SP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	SN	MN	LN	VN	XN
	MP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	SN	MN	LN	VN	XN	XN
	LP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	MN	LN	VN	XN	XN	XN
	VP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	LN	VN	XN	XN	XN	XN
	XP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	VN	XN	XN	XN	XN	XN

การวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบการควบคุมแบบฟัซซีที่มีการจัดการตัวเอง เพื่อปรับกระบวนการควบคุมในขั้นแรกของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก ซึ่งอาจแทนได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 4.6 ตัวควบคุมดังกล่าวถูกออกแบบให้มีสองอินพุตกับหนึ่งเอาต์พุต (Hwang and Yen, 1996) โดยอินพุตนั้นจะเหมือนกับตัวควบคุมฟัซซีในขั้นแรก ส่วนเอาต์พุตใช้การปรับศูนย์กลางฟังก์ชันความเป็นสมาชิกภาพของเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีขั้นแรก ด้วยฐานกฎที่รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.2 รูปทรงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกภาพและตัวแปรทางภาษา จะเหมือนกับในตัวควบคุมฟัซซีลอจิกขั้นแรก เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ รูปแบบกฎการควบคุมฟัซซีจัดการตัวเองอาจเขียนแสดงได้ดังนี้

$$\text{IF}[e_1 \text{ is } E_i] \text{ and } [e_2 \text{ is } E_j] \text{ THEN } [C \text{ is } C_{m(i,j)}] \quad (4.5)$$

เมื่อ	$e_1$	คือ	ค่าความคลาดเคลื่อน $e(k)$
	$e_2$	คือ	การเปลี่ยนแปลงค่าความคลาดเคลื่อนของ $\Delta e(k)$
	$C$	คือ	การอธิบายเชิงฟัซซีในการเปลี่ยนแปลงของศูนย์กลางความเป็นสมาชิกภาพ
	$E_i$	คือ	ตัวแปรทางภาษาของ $e_1$
	$E_j$	คือ	ตัวแปรทางภาษาของ $e_2$
	$C_{m(i,j)}$	คือ	ตัวแปรทางภาษาของ $C$

ตัวอย่างเช่น IF [ $e_1$  is LP] and [ $e_2$  is MP] THEN [ $C$  is VN] การอนุมานกฎใช้แบบ Mamdani (Calcev, 1998) และดีฟัซซีฟายด้วยวิธีการคำนวณศูนย์กลางแรงโน้มถ่วง (center of gravity, COG) ดังนั้นการอนุมานกฎได้ผลออกมาจะนำไปปรับตั้งศูนย์กลางของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกภาพของเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีขั้นแรก สามารถแสดงด้วยความสัมพันธ์ 4.6

$$U_{n(i,j)} = U_{n(i,j)} + \frac{\sum_{ij} [(\mu_{E_i}(e_1) \cap \mu_{E_j}(e_2)) \cdot C_{m(i,j)}]}{\sum_{ij} (\mu_{E_i}(e_1) \cap \mu_{E_j}(e_2))} \quad (4.6)$$

อาจสังเกตได้ว่าตัวแปรทางภาษาของ C ประยุกต์ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปแบบเดียวกับ  $e_1$ ,  $e_2$  และ  $u_1$  เพียงแต่ต่างโดเมนเมื่อส่งรูป (map) ไปยัง universe of discourse (UoD) การส่งรูปต่าง ๆ มีรายละเอียดต่อไปนี้

- C: -1 บน UoD หมายถึง ปริมาณที่เปลี่ยนแปลงของศูนย์กลางของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกภาพของตัวแปรเอาต์พุตในตัวควบคุมฟuzzyชั้นแรก ที่ได้จากการอนุมานไปทางด้านซ้ายสุด (ไม่มีหน่วย)
- 1 บน UoD หมายถึง ปริมาณที่เปลี่ยนแปลงของศูนย์กลางของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกภาพของตัวแปรเอาต์พุตในตัวควบคุมฟuzzyชั้นแรก ที่ได้จากการอนุมานไปทางด้านขวาสุด (ไม่มีหน่วย)
- 0 บน UoD หมายถึง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของศูนย์กลางไปจากค่าที่อยู่เดิม ปัจจุบัน

การแบ่งย่าน UoD ก่อให้เกิดการแบ่ง C บนโดเมนจริงอย่างเป็นสัดส่วนตรงแก่กัน

ในภาพรวม จะเห็นว่าตัวควบคุมฟuzzyมีกฎสองชั้น ชั้นแรกเป็นการควบคุมโดยตรง มีจำนวนกฎการควบคุม 121 ข้อ ในชั้นที่สองเป็นฟังก์ชันการปรับตัวเองให้การปรับแต่งศูนย์กลางของฟังก์ชันสมาชิกภาพดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น ประกอบด้วยจำนวนกฎอีก 121 ข้อ กฎทั้งสองชุดทำงานร่วมกันเป็นตัวควบคุมฟuzzyแบบจัดการตัวเอง ดังแสดงตัวอย่างต่อไปนี้

สมมติว่าตัวตรวจรู้อัตราเร็วรอบมอเตอร์วัดค่าอัตราเร็วได้ 1210 rpm ดำเนินการปรับเปลี่ยนค่าให้เข้าสู่โดเมนเพื่อส่งรูป (map) ไปยัง universe of discourse (UoD) ได้ค่าความคลาดเคลื่อน ( $e_1$ ) 0.17 และสมมติว่าตัวตรวจรู้อัตราเร็วรอบมอเตอร์วัดค่าอัตราเร็วรอบมอเตอร์ครั้งก่อนได้ 1225 rpm ดำเนินการปรับเปลี่ยนค่าให้เข้าสู่โดเมนเพื่อส่งรูป (map) ไปยัง universe of discourse (UoD) ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงความคลาดเคลื่อน ( $e_2$ ) 0.25 เมื่อเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้ กับรูปที่ 4.5 จะตรงกับฟuzzyเซต ZO และ SP ซึ่งมีค่า

$$\mu_{ZO}(e_1)=0.2 \quad \text{และ} \quad \mu_{SP}(e_1)=0.2$$

เมื่อเทียบค่าเปลี่ยนแปลงความคลาดเคลื่อนที่ได้กับรูปที่ 4.5 จะตรงกับฟuzzyเซต SP และ MP ซึ่งมีค่า

$$\mu_{SP}(e_2)=0.75 \quad \text{และ} \quad \mu_{MP}(e_2)=0.25$$

ทำการเปิดตารางกฎการควบคุมดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะตรงกับกฎการควบคุมทั้งหมด 4 กฎ สามารถให้ความหมายดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

- 1 IF ( $e_1$  is ZO AND  $e_2$  is SP) THEN (u is SN)
- 2 IF ( $e_1$  is SP AND  $e_2$  is SP) THEN (u is MN)
- 3 IF ( $e_1$  is ZO AND  $e_2$  is MP) THEN (u is MN)

4 IF ( $e_1$  is SP AND  $e_2$  is MP) THEN (u is LN)

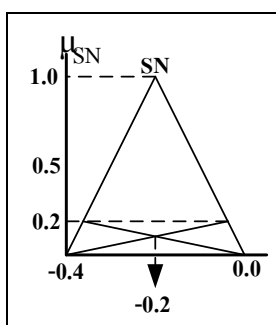
กลไกการวินิจฉัยในแต่ละกฎจะใช้ค่าความเป็นสมาชิกของแต่ละตัวแปร  $e_1$  และ  $e_2$  แต่ละฟัซซีเซต ในการตัดสินใจ ในกฎข้อที่ 1 วิธีการตัดสินใจใช้ตัวกระทำทางฟัซซีที่เรียกว่าการอินเตอร์เซค (intersection) ของฟัซซีเซตสองเซต ซึ่งก็คือการเลือกค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรฟัซซีที่มีค่าน้อยที่สุด

$$\min[\mu_{ZO}(e_1), \mu_{SP}(e_2)] = \min[0.2, 0.75] = 0.2$$

ดังนั้นกฎข้อที่ 1 ค่าของฟัซซีเซต SN จะมีค่าความเป็นสมาชิก

$$\mu_{SN} = 0.2$$

เมื่อใช้วิธีการหาค่าเอาต์พุตที่ได้จากการวินิจฉัยในแต่ละกฎ โดยการหาค่าจุดศูนย์กลางพื้นที่ที่แสดงในรูปที่ 4.7 จะได้ค่ากฎการควบคุมเป็น  $U_{1SN} = -0.2$



รูปที่ 4.7 การหาค่าสัญญาณการควบคุมโดยวิธีการหาค่าจากจุดศูนย์กลางพื้นที่

ในการทำงานเดียวกันกับกฎข้อที่ 2 3 และ 4 จะได้ค่า

$$\min[\mu_{SP}(e_1), \mu_{SP}(e_2)] = \min[0.8, 0.75] = 0.75$$

$$\min[\mu_{ZO}(e_1), \mu_{MP}(e_2)] = \min[0.2, 0.25] = 0.2$$

$$\min[\mu_{SP}(e_1), \mu_{MP}(e_2)] = \min[0.8, 0.25] = 0.25$$

แต่ละข้อจะมีค่าความเป็นสมาชิกตามลำดับดังนี้

$$U_{2MN} = -0.4$$

$$U_{3MN} = -0.4$$

$$U_{4LN} = -0.6$$

พิจารณาในส่วนของฟuzzyชั้นที่สอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้กราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกภาพเหมือนในชั้นแรก ตามรูปที่ 4.5 แต่ใช้ตารางกฎการควบคุม ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จะตรงกับกฎการควบคุมทั้งหมด 4 กฎ สามารถให้ความหมายดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

- 1 IF (e1 is ZO AND e2 is SP) THEN (c is ZO)
- 2 IF (e1 is SP AND e2 is SP) THEN (c is SN)
- 3 IF (e1 is ZO AND e2 is MP) THEN (c is SN)
- 4 IF (e1 is SP AND e2 is MP) THEN (c is MN)

กลไกการวินิจฉัยในแต่ละกฎจะใช้ค่าความเป็นสมาชิกของแต่ละตัวแปร  $e_1$  และ  $e_2$  แต่ละฟuzzyเซต ในการตัดสินใจ ด้วยการเลือกค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรฟuzzyที่มีค่าน้อยที่สุด ผลที่ได้เป็นดังนี้

$$\min[\mu_{ZO}(e_1), \mu_{SP}(e_2)] = \min[0.2, 0.75] = 0.2$$

$$\min[\mu_{SP}(e_1), \mu_{SP}(e_2)] = \min[0.8, 0.75] = 0.75$$

$$\min[\mu_{ZO}(e_1), \mu_{MP}(e_2)] = \min[0.2, 0.25] = 0.2$$

$$\min[\mu_{SP}(e_1), \mu_{MP}(e_2)] = \min[0.8, 0.25] = 0.25$$

เมื่อใช้วิธีการหาค่าเอาต์พุตที่ได้จากการวินิจฉัยในแต่ละกฎ โดยการหาค่าจุดศูนย์กลางพื้นที่ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จะได้ค่าในแต่ละกฎการควบคุมเป็น

$$C_{1ZO} = 0$$

$$C_{2SN} = -0.2$$

$$C_{3SN} = -0.2$$

$$C_{4MN} = -0.4$$

ขั้นตอนการดีฟuzzyฟายใช้วิธีการหาจุดศูนย์กลางมวล (center of gravity, COG) ตามสมการที่ 4.7 เมื่อแทนค่าลงในสมการผลที่ได้เท่ากับ -0.21

$$COG = \frac{\sum_{i,j} [(\mu E_i(e_1) \cap \mu E_j(e_2)) \cdot C_{m(i,j)}]}{\sum_{i,j} (\mu E_i(e_1) \cap \mu E_j(e_2))} \quad (4.7)$$

แทนค่าที่ได้ลงในสมการที่ 4.6 จะได้ค่าจุดศูนย์กลางพื้นที่เปลี่ยนไปของพีชชีชั้นแรกดังต่อไปนี้

$$U_{1MN} = -0.4$$

$$U_{2MN} = -0.6$$

$$U_{3MN} = -0.6$$

$$U_{4LN} = -0.8$$

นำค่าที่ได้ไปหาค่าการควบคุมตามสมการที่ 4.4 ดังนี้

$$u = \frac{(0.2 \times (-0.4) + 0.75 \times (-0.6) + 0.2 \times (-0.6) + 0.25 \times (-0.8))}{0.2 + 0.75 + 0.2 + 0.25} = -0.6$$

ค่าเอาต์พุตที่ได้อธิบายได้ว่า มอเตอร์มีความเร็วสูงกว่าค่าอ้างอิงที่กำหนด ตัวควบคุมจะต้องลดระดับสัญญาณการควบคุมลง ซึ่งค่าเอาต์พุตที่ได้จะถูกปรับเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณที่ใช้ในการควบคุม เพื่อควบคุมให้อินเวอร์เตอร์ลดความถี่ที่จ่ายให้มอเตอร์ลง 1.2 Hz สัมพันธ์กับการลดแรงดันที่จ่ายไปควบคุมอินเวอร์เตอร์ลง 0.06 V เพื่อให้อัตราเร็วมอเตอร์เข้าใกล้ค่าอ้างอิงที่กำหนด

ในการประยุกต์ใช้กับระบบที่มีพิกัดมอเตอร์และจำนวนมอเตอร์ที่ต่อขนานแตกต่างกันไปจากในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ต้องทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอเตอร์แต่ละตัว และกำหนดเป้าหมายของการควบคุมดังที่ได้อธิบายไว้ในตอนต้นของหัวข้อนี้ เพื่อปรับเปลี่ยนกฎการควบคุม จำเป็นต้องอาศัยการศึกษาสำนึกของผู้ออกแบบร่วมด้วย เช่น เปลี่ยนจำนวนฐานกฎหรือความกว้างของฐานฟังก์ชันความเป็นสมาชิกภาพใน UoD ตามความเหมาะสมของระบบที่ทำการควบคุม

## 4.5 สรุป

ในการควบคุมระบบที่ไม่สามารถคาดเดาสถานะระบบและมีพารามิเตอร์ที่แปรเปลี่ยนตามเวลา ตัวควบคุมพีชชีลอจิกแบบธรรมดาอาจให้ผลการควบคุมที่ไม่ดีนัก ดังนั้นการวิจัยนี้จึงออกแบบการควบคุมพีชชีที่มีการจัดการตัวเอง เพื่อปรับกระบวนการควบคุมในชั้นแรกของตัวควบคุมพีชชีลอจิก ตัวควบคุมดังกล่าวถูกออกแบบให้มีสองอินพุตกับหนึ่งเอาต์พุต โดยอินพุตนั้นจะเหมือนกับตัวควบคุมพีชชีในชั้นแรก ส่วนเอาต์พุตใช้การปรับศูนย์กลางฟังก์ชันความเป็นสมาชิกภาพของเอาต์พุตของตัวควบคุมพีชชีชั้นแรก ซึ่งชั้นแรกเป็นการควบคุมโดยตรง มีจำนวนกฎการควบคุม 121 ข้อ ในชั้นที่สองเป็นฟังก์ชันการปรับตัวเองให้การปรับแต่งศูนย์กลางของฟังก์ชันสมาชิกภาพดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น ประกอบด้วยจำนวนกฎอีก 121 ข้อ กฎทั้งสองชุดทำงานร่วมกันเป็นตัวควบคุมพีชชีแบบจัดการตัวเอง ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนจำนวนกฎได้ตามความเหมาะสมของการควบคุม ที่จำเป็นต้องอาศัยการศึกษาสำนึกของผู้ออกแบบร่วมด้วย เช่น ในการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ตัวควบคุมพีชชีแบบจัดการตัวเองมาเป็นตัวควบคุมอัตราเร็วของ

มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัวจ่ายกำลังด้วยอินเวอร์เตอร์เพียงตัวเดียว ซึ่งอัตราเร็วรอบของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ความถี่ดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงไปตามวัฏจักรการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ที่รับคำสั่งการควบคุมมาจากการประมวลผลของตัวควบคุม สัญญาณควบคุม  $u(k)$  ที่เป็นผลลัพธ์ของกระบวนการดิจิทัลพีซีเคชันที่กระทำต่อ  $\tilde{f}[u(k)]$  ใช้เป็นตัวปรับวัฏจักรการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ตัวควบคุมดังกล่าวมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกภาพเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมหน้าจั่ว และมีตัวแปรทางภาษาตามตารางฐานกฎการควบคุมดังนี้ ค่าทางลบมากพิเศษ (XN) ค่าทางลบมาก ๆ (VN) ค่าทางลบมาก (LN) ค่าทางลบปานกลาง (MN) ค่าทางลบน้อย ๆ (SN) ค่ากลาง (ZO) ค่าทางบวกน้อย ๆ (SP) ค่าทางบวกปานกลาง (MP) ค่าทางบวกมาก (LP) ค่าทางบวกมาก ๆ (VP) ค่าทางบวกมากพิเศษ (XP) ทั้งอินพุตและเอาต์พุตจะใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกภาพที่เหมือนกัน และจากตัวอย่างที่ได้แสดงการออกแบบจะได้นำไปจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทั้งในสภาวะไม่มีโหลดและจับโหลด เพื่อให้ทราบถึงสมรรถนะของระบบควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ในการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

## บทที่ 5

### การจำลองผลระบบควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ต่อขนาน

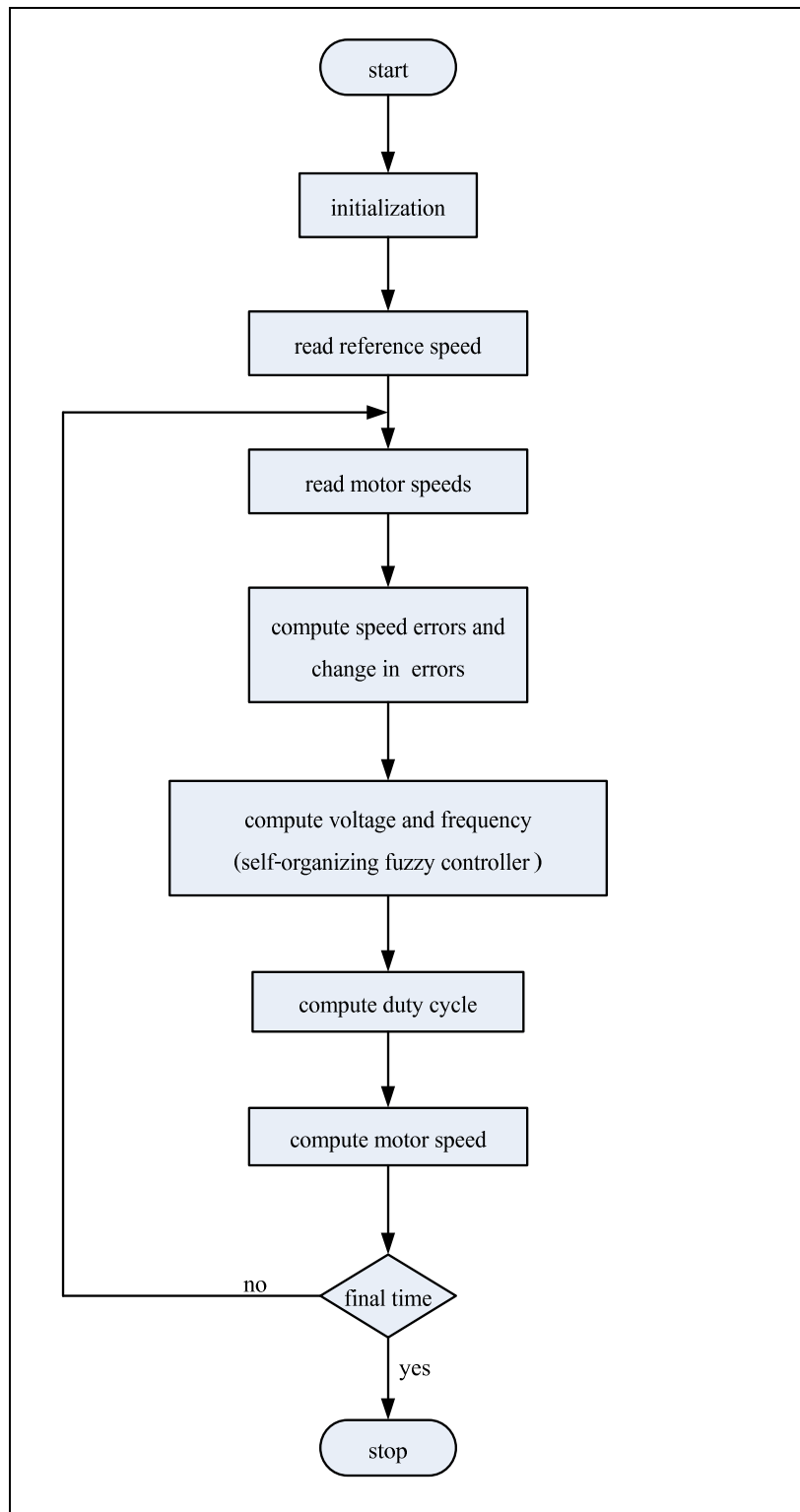
#### 5.1 บทนำ

การใช้ระบบควบคุมฟuzzyแบบจัดการตัวเองควบคุมระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้น โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นทางเลือกที่เหมาะสม เพราะระบบฟuzzyรูปแบบดังกล่าวมีความอ่อนตัวต่อการออกแบบ นอกจากนี้ในการพัฒนาเทคโนโลยีระบบควบคุมไม่ต้องพึ่งพาแบบจำลองที่แม่นยำสูง สามารถใช้แบบจำลองโดยประมาณได้ ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyแบบจัดการตัวเองมาจำลองผลร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ต่อขนานกันหลายตัวที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 ในการจำลองผลได้ดำเนินการทั้งกรณีขับตัวเปล่าและกรณีขับโหลดเพื่อพิจารณาผลในสถานะต่าง ๆ ซึ่งจะเป็นองค์ความรู้สำหรับการใช้ในการออกแบบและสร้างระบบทดสอบจริงต่อไป

#### 5.2 การจำลองผลระบบควบคุมฟuzzyแบบจัดการตัวเองขับเคลื่อนเหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัว

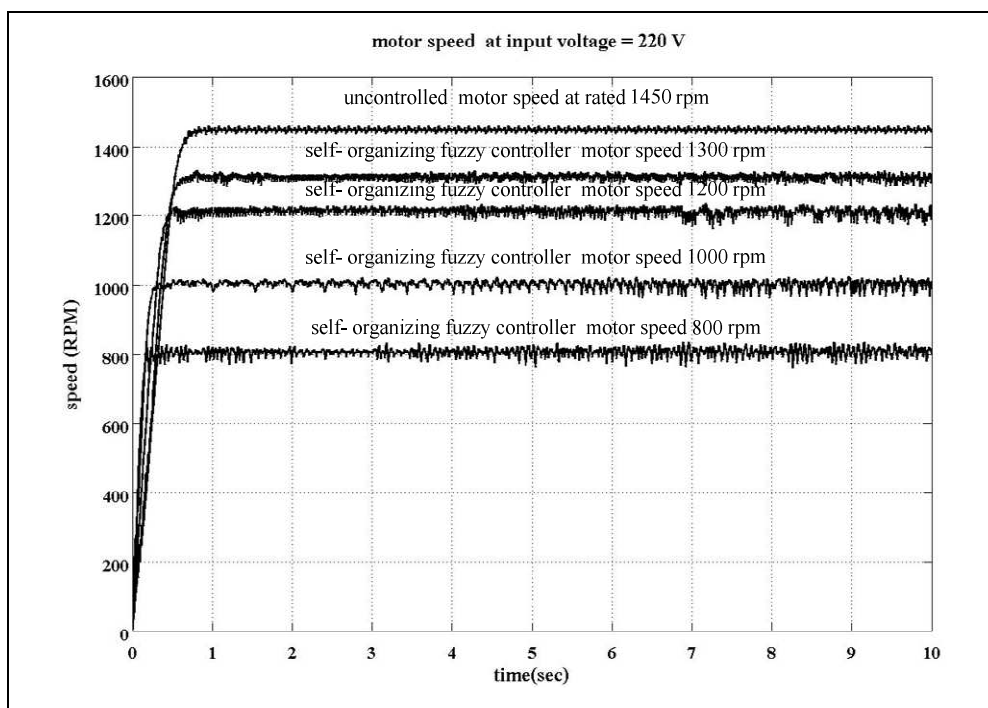
จากการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyแบบจัดการตัวเองที่ได้ออกแบบไว้ ดังที่ได้อธิบายในรายละเอียดในบทที่ 4 ตัวควบคุมดังกล่าวได้รับการจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งมีลำดับขั้นตอนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 5.1 เริ่มต้นจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบขับเคลื่อน จากนั้นกำหนดค่าอัตราเร็วอ้างอิงให้กับระบบเมื่อวงจรสับไฟฟ้าทำงานครบ 1 คาบเวลาการสับสัญญาณ โปรแกรมทำการคำนวณหาอัตราเร็วมอเตอร์ ค่าที่ได้นำไปลบกับค่าความเร็วอ้างอิง ค่าผิดพลาดของอัตราเร็วและค่าผิดพลาดการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วจะถูกส่งเข้าไปยังตัวควบคุมฟuzzyแบบจัดการตัวเอง ในขั้นตอนนี้กระบวนการทางฟuzzyทำการคำนวณหาแรงดันและความถี่ที่จะใช้ในการควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์แบบ V/F ค่าความถี่ที่ได้ถูกนำไปคำนวณหาตัวจุกจรงาน (duty cycle) ที่จะกำหนดให้วงจรสับไฟฟ้าทำงาน หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการแก้สมการเชิงอนุพันธ์เพื่อหาค่าความเร็วของมอเตอร์ และถ้าเวลาที่กำหนดให้ยังไม่สิ้นสุดโปรแกรมก็จะทำงานซ้ำไปเรื่อย ๆ





รูปที่ 5.1 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมการควบคุมมอเตอร์ที่ต่อขนานกันหลายตัวรับพลังงานจากอินเวอร์เตอร์เพียงชุดเดียวควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเอง

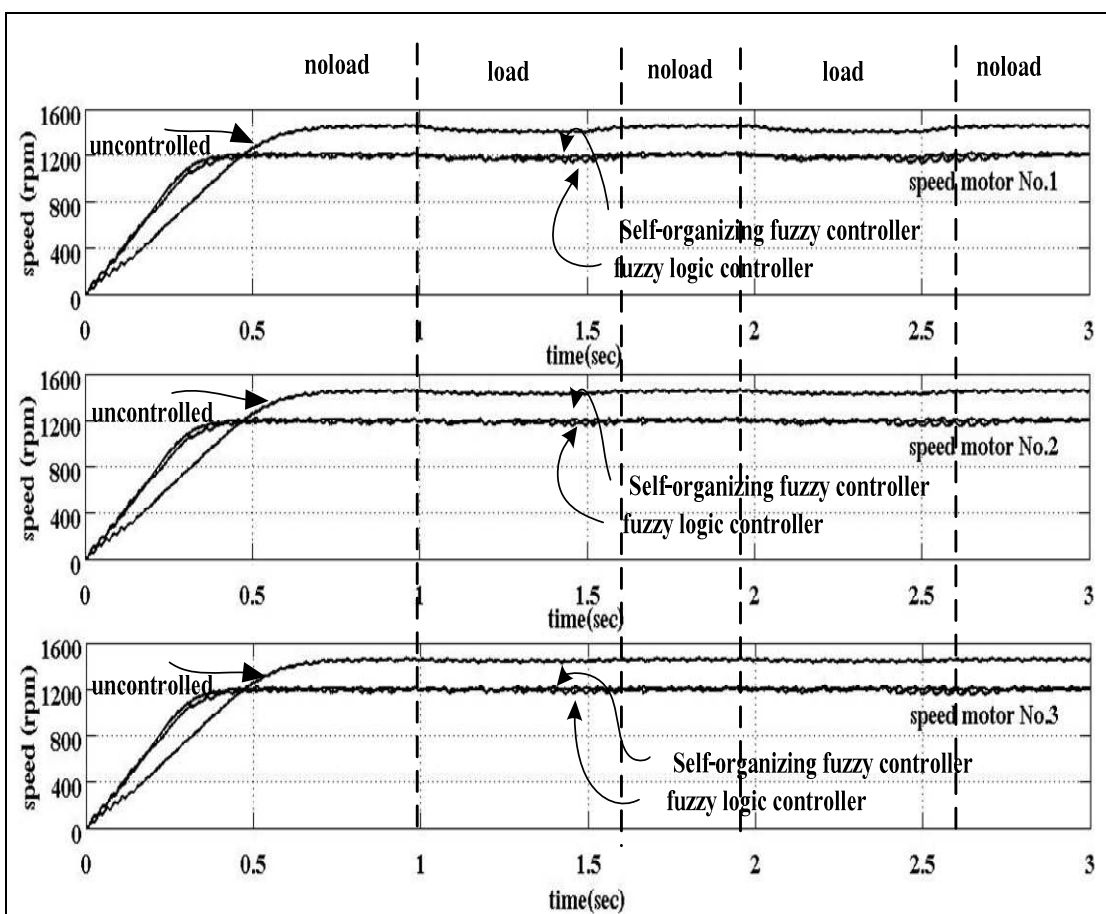
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองผลการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว 3 ตัว ต่อขนานกัน ด้วยโปรแกรม MATLAB ได้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกเป็นการจำลองผลการควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์ขนานกัน 3 ตัว แบบไม่มีโหลดที่ระดับอัตราเร็วต่าง ๆ ตามลำดับดังนี้ 800 1000 1200 และ 1300 รอบต่อนาที ด้วยตัวควบคุมฟัซซีจัดการตัวเองรับพลังงานจากอินเวอร์เตอร์เพียงชุดเดียว โดยที่มอเตอร์ทั้งสามตัวมีขนาดและกำลังพิกัดเท่ากัน กล่าวคือ มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวมีขนาดพิกัด 1 HP 1450 rpm 220 V 5.2 A เมื่อพิจารณาผลการจำลองดังที่แสดงในรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าก่อนที่จะใช้ตัวควบคุมขับเคลื่อนมอเตอร์ อัตราเร็วมอเตอร์มีสถานะอยู่ตัวที่ 1450 รอบต่อนาที ในรูปแสดงไว้ด้วยกราฟเส้นบนสุด และเมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเองควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ ผลที่ได้สามารถควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์ให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายและรักษาสถานะทางอัตราเร็วตามที่กำหนดในแต่ละช่วงอัตราเร็วได้เป็นอย่างดี มีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวทางอัตราเร็วต่ำกว่า  $\pm 5\%$  ของค่าเป้าหมาย อีกทั้งยังมีช่วงเวลาพุ่งเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่รวดเร็วกว่าระบบที่ไม่มีควบคุม



รูปที่ 5.2 ผลการจำลองการควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์ขณะไม่มีโหลดด้วยตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเองที่ระดับอัตราเร็ว 800 1000 1200 และ 1300 rpm เปรียบเทียบกับแบบไม่มีตัวควบคุมแสดงเพียงกราฟเดียวเนื่องจากมอเตอร์ที่ต่อขนานกันอีก 2 ตัว มีการตอบสนองทางความเร็วที่คล้ายคลึงกัน

ตารางที่ 5.1 แสดงช่วงเวลาและขนาดของโหลดที่กระทำกับมอเตอร์แต่ละตัว

Time(sec)	Motor No1	Motor No2	Motor No3
1.0-1.7	6 Nm	3 Nm	1.5 Nm
2.0-2.7	6 Nm	3 Nm	1.5 Nm

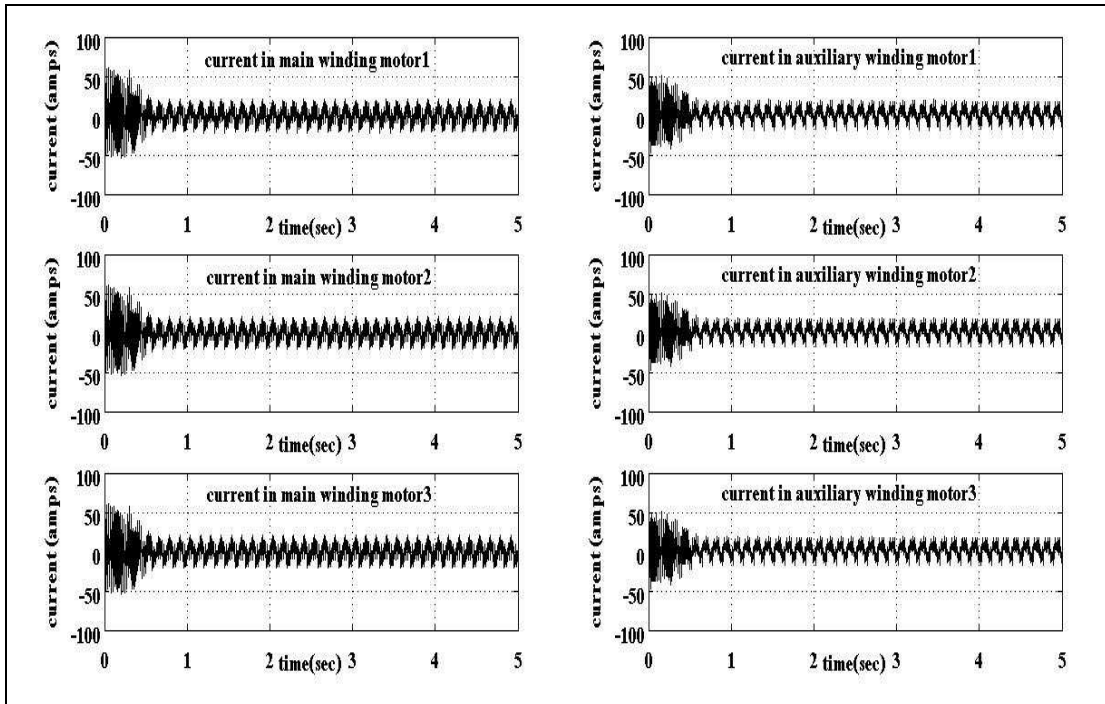


รูปที่ 5.3 ผลการจำลองการควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์ขนานกัน 3 ตัว ขับโหลดที่ระดับอัตราเร็ว 1200 รอบต่อนาที รับพลังงานจากอินเวอร์เตอร์เพียงชุดเดียวด้วยตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเอง เปรียบเทียบกับตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบธรรมดา และไม่มีตัวควบคุม

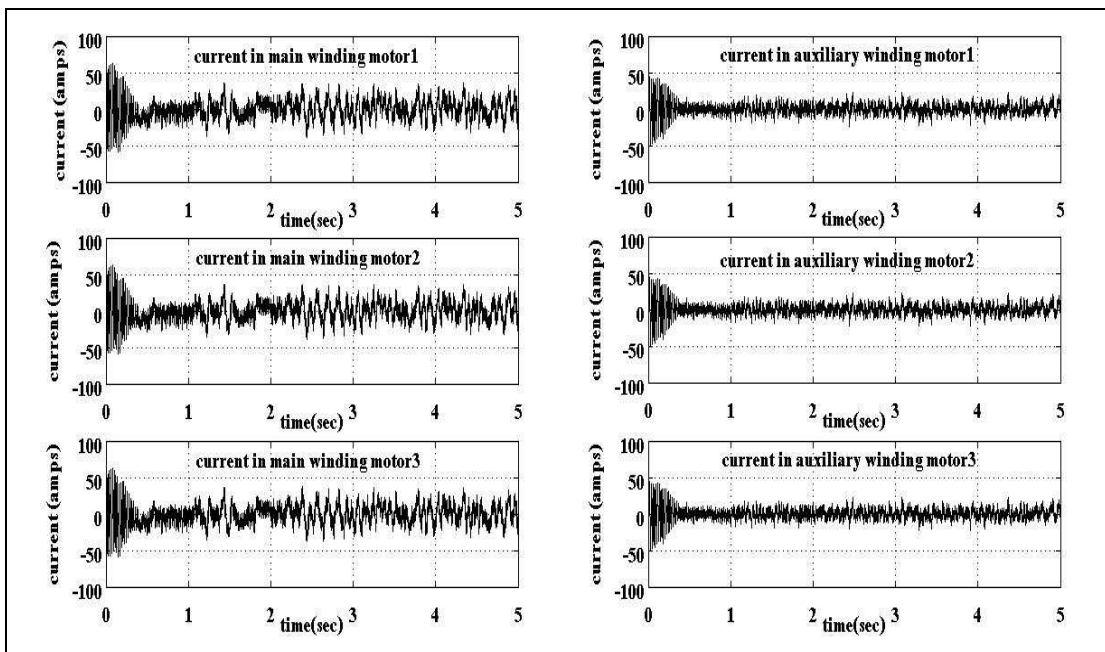
ส่วนที่สองเป็นผลการจำลองควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์ที่ 1200 rpm ขับโหลดในแต่ละช่วงเวลาตามที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ตัวควบคุมเป็นชนิดฟัซซีแบบจัดการ โดยที่มอเตอร์ทั้งสามตัวที่ต่อขนานกัน มีขนาดและกำลังพิกัดเท่ากัน ขับด้วยอินเวอร์เตอร์เพียงชุดเดียว เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบธรรมดา ที่สภาวะการทำงานเดียวกัน ในตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าผลการจำลองผลนั้น มอเตอร์ได้รับโหลดหรือสภาวะระบบการทำงานระบบควบคุมเป็น 2 ช่วงเวลาที่ตรงกันของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว กล่าวคือ เมื่อเดินเครื่องมอเตอร์ทุกตัวผ่านไป 1.0 วินาที จะเริ่มใส่สภาวะระบบให้แก่มอเตอร์แต่ละตัวด้วยขนาดของโหลด 6 3 และ 1.5 Nm ตามลำดับ จนถึงเวลา 1.7 วินาทีของการขับเคลื่อน จึงปลดสภาวะระบบออก และใส่สภาวะระบบขนาดเท่าเดิมกลับเข้าไปในระบบอีกครั้งในช่วงเวลา 2.0 ถึง 2.7 วินาทีของการขับเคลื่อน ในการจำลองแสดงไว้ในรูปที่ 5.3 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ การจำลองผลเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ไม่มีการควบคุม และที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบธรรมดา และตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเอง ดังการนำเสนอในรูปที่ 5.3 สามารถสังเกตได้จากกราฟอัตราเร็วของมอเตอร์ว่าระบบที่มีตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเองมีการไต่ระดับอัตราเร็วเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่รวดเร็วกว่า และเมื่อใส่สภาวะระบบตามตารางที่ 5.1 ระบบที่มีตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเองสามารถรักษาสถานะทางอัตราเร็วของมอเตอร์ให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย มีค่าผิดพลาดน้อยกว่าระบบควบคุมฟัซซีลอจิกและระบบที่ไม่มีการควบคุม ดังข้อมูลความเร็วเฉลี่ยที่แสดงเป็นการเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบผลการควบคุมอัตราเร็วขณะขับ โหลดระหว่างตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบธรรมดากับตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเอง

Motor	Fuzzy logic controller		Self-organizing fuzzy controller	
	Average speed (rpm)	% error	Average speed (rpm)	% error
No.1	1151	-4.08	1170	-2.50
No.2	1170	-2.50	1187	-1.08
No.3	1194	-0.50	1201	+0.08

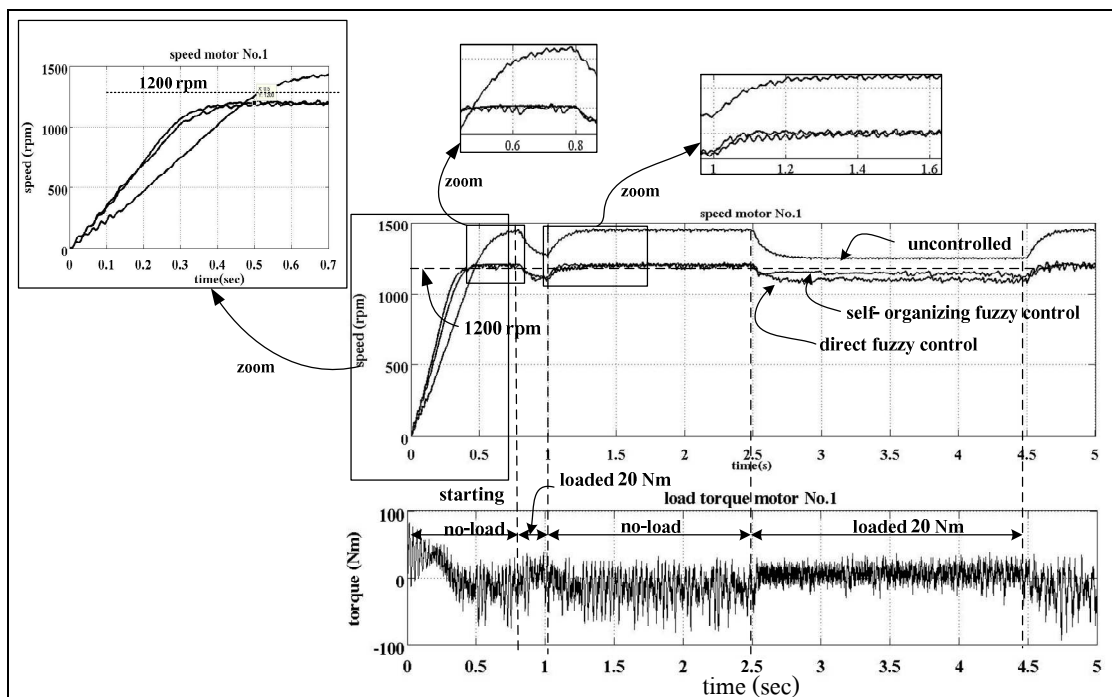


รูปที่ 5.4 รูปคลื่นกระแสที่ขั้วของมอเตอร์แต่ละตัวขับโหลดแบบไม่มีตัวควบคุม



รูปที่ 5.5 รูปคลื่นกระแสที่ขั้วของมอเตอร์แต่ละตัวขับโหลดด้วยตัวควบคุมฟิชซีแบบจัดการตัวเอง

การเปรียบเทียบการรักษาสถานะทางอัตราเร็วของมอเตอร์ของตัวควบคุมทั้ง 2 แบบ ขณะ มีสภาวะรบกวนของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว โดยคิดเป็นร้อยละของค่าผิดพลาดไปจากระดับอัตราเร็ว เป้าหมายที่ 1200 รอบต่อนาที จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเองสามารถรักษาระดับ ความเร็วให้มีความผิดพลาดในย่านที่แคบกว่า จากรูปคลื่นของกระแสมอเตอร์ที่แสดงในรูปที่ 5.4 และ 5.5 จะเห็นได้ว่ากระแสที่ระบบควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเองจะมีขนาดกระแสน้อยกว่าแบบ ไม่มีตัวควบคุม ตลอดช่วงของการขับเคลื่อน กล่าวคือ กระแสเฉลี่ยของมอเตอร์แบบที่มีระบบ ควบคุมมีค่า 3.8 A ส่วนในระบบที่ไม่มีการควบคุมจะมีค่า 4.2 A แต่จะมีกระแสมากกว่าหรือ ใกล้เคียงกันเมื่อมีสภาวะรบกวนเข้ามาเท่านั้น และในการจำลองผลยังได้เพิ่มขนาดของโหลดให้สูง ถึงระดับ 20 Nm เพื่อศึกษาสมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซีจัดแบบการตัวเองที่ได้พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบธรรมดา ผลจากการจำลองแสดงไว้ในรูปที่ 5.6 จะเห็น ว่ากราฟในช่วงที่มีสภาวะรบกวนหรือมีการกระทำ ระบบที่มีตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเอง สามารถควบคุมอัตราเร็วของมอเตอร์ให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายมีค่าผิดพลาดน้อยกว่า และมีช่วงเวลาใน การพุ่งเข้าสู่ค่าเป้าหมายเมื่อเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์น้อยกว่าอีกด้วย ซึ่งจะสังเกตเห็นได้จากภาพ ส่วนขยายของกราฟในแต่ละช่วง



รูปที่ 5.6 ผลจำลองการควบคุมการขับ โหลด 20 Nm ด้วยตัวควบคุมฟัซซีจัดการตัวเองเปรียบ เทียบ กับตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบธรรมดาและไม่มีตัวควบคุม

จากความรู้และประสบการณ์ที่เกิดจากการจำลองผลการควบคุมพีชชี ดังที่ได้อธิบายผ่านมานั้น ในขั้นตอนต่อไปจึงได้ปรับใช้เพื่อการจำลองผลการควบคุมอัตราเร็วรอบของเครื่องสับพีชที่โครงการวิจัยนี้ได้พัฒนาขึ้น เครื่องจักรนี้มีตัวถังภายนอกทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมยึดกับโครงถังด้วยเกลียวและแหวน ติดตั้งมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนชุดใบมีดไว้ด้านข้าง 3 ตัว เรียงตามแนวนอนลงล่างแบ่งเป็น 3 ชั้น ถอดแยกออกจากกันเป็นชั้น ๆ ได้ ในแต่ละชั้นสามารถแยกทำงานอิสระจากกันหรือร่วมกันทำงานเป็นกระบวนการได้ภายในแต่ละชั้นมีส่วนประกอบหลักคือใบมีดที่ออกแบบมาแตกต่างกัน 3 ชุด เรียงตามแนวนอนล่าง การทำงานของใบมีดเรียงลำดับจากบนลงล่าง ก่อให้เกิดขั้นตอนการกระแทก ขั้นตอนการสับ และขั้นตอนการเนียน กระทำตามลำดับต่อวัสดุที่ถูกป้อนเข้าทางด้านบนเป็นวัตถุดิบของเครื่องจักร ซึ่งร่วงหล่นลงสู่พื้นตามหลักแรงโน้มถ่วงของโลก ใบมีดแต่ละชุดจึงได้รับโหลดตามแนวตั้งที่ตกลงมาในลักษณะต่าง ๆ กัน ซึ่งใบมีดชุดที่หนึ่งอยู่ด้านบนสุดนั้น ทำหน้าที่กระแทกวัสดุให้แตกกระจายออกเป็นชิ้นที่มีขนาดใหญ่ ร่วงลงสู่ชั้นที่สองซึ่งมีใบรองสับคอยดักวัสดุไว้รอบใบมีดในชั้นนี้หมุนมาสับให้วัสดุดังกล่าวมีขนาดที่เล็กลง ร่วงหล่นลงสู่ชั้นที่สาม ชั้นที่สามนี้มีใบมีดสองชุดเรียงสลับกันจำนวนมาก หมุนตัดกันในทิศทางที่สวนกันคล้ายการบด เพื่อทำให้วัสดุมีขนาดเล็กจนถึงละเอียด ในการควบคุมเครื่องจักรนั้นจำเป็นต้องมีการจำลองผล เพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องจักรในสภาวะต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้น ในขณะที่เริ่มเดินเครื่อง ตลอดจนประสบกับสภาวะรบกวนซึ่งหมายถึงโหลดที่เป็นพีชผลทางการเกษตรที่ป้อนเข้าเครื่องสับพีชผลทางการเกษตร กลุ่มที่สามารถตัดสับได้ยาก เช่น หัวมัน ลำปะหลัง ท่อนอ้อยสด กะลามะพร้าว เป็นต้น มีความแข็ง เหนียว มีความชื้นสูง และมีน้ำหนักมาก การทำงานของเครื่องจักรในบางกรณีอาจเกิดปัญหาที่ระบบควบคุมไม่สามารถควบคุมได้ เช่น สภาวะรบกวนมีขนาดใหญ่เกินไป ความรู้ที่ได้จากการจำลองผลดังกล่าวสามารถนำไปสู่การป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นต่อเครื่องจักรและระบบควบคุมได้

เพื่อให้ได้เห็นพลวัตทางอัตราเร็วของมอเตอร์ที่หมุนใบมีดแต่ละชุดของเครื่องสับพีชผลทางการเกษตร จึงได้ดำเนินการจำลองผลโดยอาศัยโหลดสมมุติ ในกรณีศึกษาที่กำลังกล่าวถึงนี้ได้สมมุติให้โหลดทางกลซึ่งก็คือน้ำหนักของวัสดุที่ถูกป้อนให้เครื่องจักรมีโครงรูปต่าง ๆ ดังที่แสดงด้วยกราฟ “load profiles” เช่นในรูปที่ 5.7 (ต่อไปจะเรียกว่าโครงรูปโหลด) การสมมุติขนาดของโหลดและการเลื่อมเวลาที่โหลดปรากฏแก่มอเตอร์ อาศัยการเลียนแบบสภาวะการทำงานจริงที่เครื่องจักรเริ่มเดินเครื่องตัวเปล่าเป็นเวลา 1 วินาทีโดยประมาณ วัสดุที่จะถูกสับจึงได้รับการป้อนเข้าทางช่องเปิดด้านบนของเครื่อง วัสดุมีขนาดโตที่สุดและหนักที่สุดเมื่อกระทบกับใบมีดชั้นที่ 1 ดังจะสังเกตเห็นได้ว่าโหลดมีขนาดสะสมเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงเวลา 3-4 วินาที โหลดสะสมจึงมีขนาดมากที่สุดเป็น 20 Nm แล้วจึงหยุดป้อนโหลดด้วยการทำงานของเครื่องจักรเมื่อวัสดุถูกสับโดยใบมีดชั้นที่ 1 ย่อมมีขนาดเล็กกลงและน้ำหนักแต่ละชั้นย่อมจะเบาลง ตลอดจนมี

การกระจายน้ำหนักทั่วถึงมากขึ้น ตลอดแกนเพลลาโบริมมีการกำหนดโครงสร้างของโหนดในการจำลองการทำงานของเครื่องจักรให้แก่โบริมชั้นที่ 2 และ 3 จึงกำหนดให้น้อยลงลดหลั่นกันตามส่วน อีกทั้งกำหนดให้มีเวลาล่าหลังกันและกันอยู่ 0.5 วินาที กราฟอัตราเร็วรอบมอเตอร์ที่เป็นผลของการจำลอง สะท้อนให้เห็นว่าอัตราเร็วรอบของมอเตอร์ตัวล่างสุดที่ขับโบริมชุดที่ 3 ได้รับผลกระทบน้อยที่สุด เพราะวัสดุที่ถูกสับโดยโบริมชั้นนี้มีขนาดเล็กที่สุด และน้ำหนักน้อยที่สุดในทางตรงกันข้าม อัตราเร็วรอบของมอเตอร์ตัวบนสุดที่ขับโบริมชั้นที่ 1 ได้รับผลกระทบมากที่สุด และอัตราเร็วรอบของมอเตอร์ตัวกลาง ได้รับผลกระทบปานกลาง ทั้งนี้ตามเหตุผลทางขนาดและน้ำหนักของวัสดุที่ถูกสับ ดังที่ได้อธิบายมาข้างต้น อัตราเร็วรอบของมอเตอร์ทุกตัวได้รับการคุมค่าอย่างน่าพึงพอใจโดยการทำงานของตัวควบคุมพีซีแบบจัดการตัวเอง

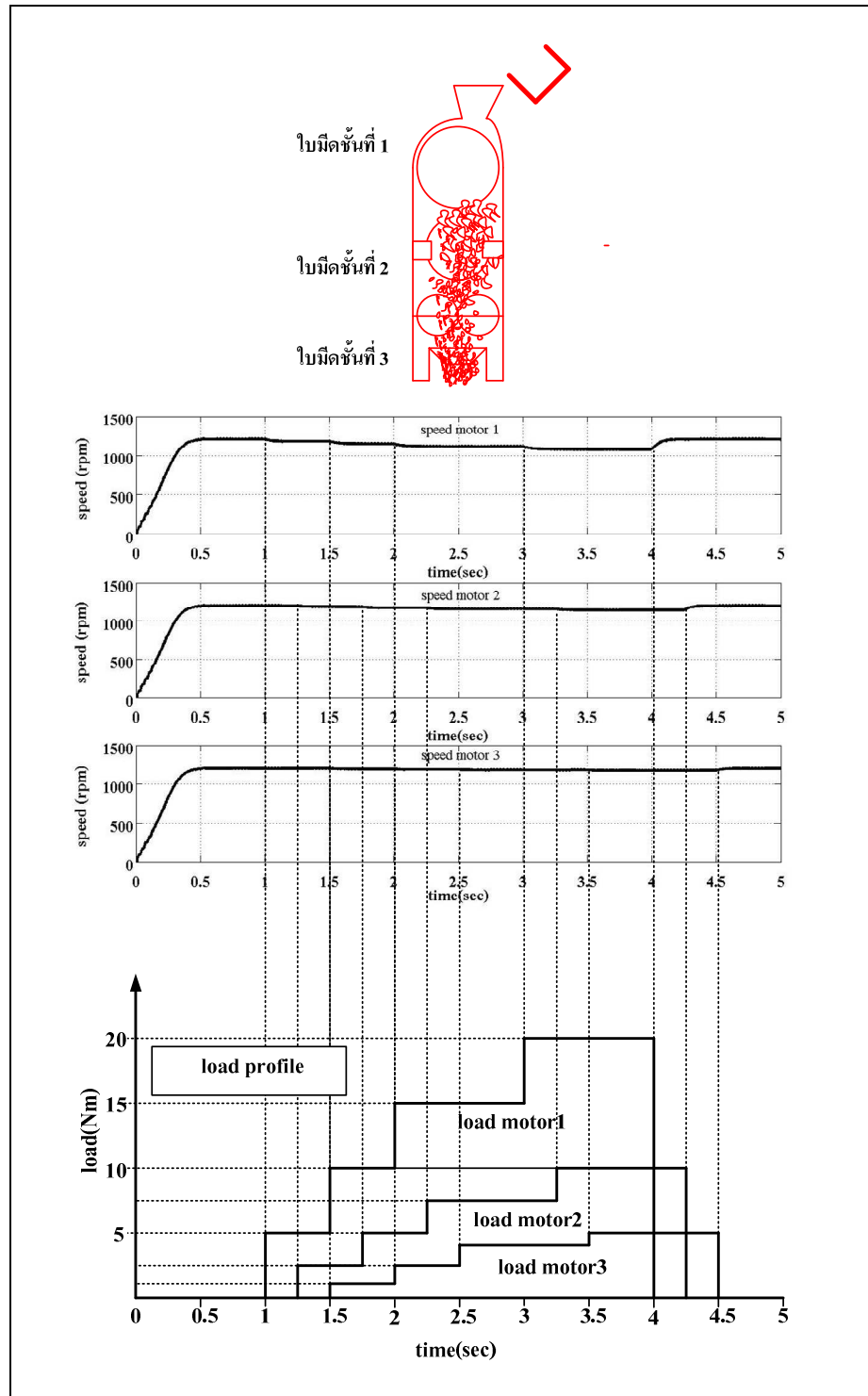
การกำหนดโหนดในกรณีที่คล้ายคลึงกับกรณี 1 ดังที่อธิบายผ่านมาได้กำหนดดังโครงสร้างของโหนดที่ปรากฏในรูปที่ 5.8 เพื่อเลียนแบบการทำงานจริงที่วัสดุที่ถูกสับได้รับการป้อนเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งอัตราการป้อนคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาที มอเตอร์ทั้ง 3 ตัว จึงได้รับโหลดคงที่จากนั้นเป็นต้นไป สามารถสังเกตเห็นได้ว่าอัตราเร็วรอบมอเตอร์ตัวที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับจะตกลงเล็กน้อย แต่ทั้งหมดได้รับการคุมค่าไว้ภายในกรอบ  $\pm 5\%$  ความผิดพลาด ในสถานะอยู่ตัวโดยตัวควบคุมพีซีแบบจัดการตัวเอง

การจำลองผลที่สนใจในกรณี 3 นั้นเป็นกรณีที่เครื่องจักรได้รับโหลดที่ร่วงหล่นเป็นกลุ่ม ๆ ไม่ต่อเนื่องสม่ำเสมอ ลักษณะของโหนดเป็นของแข็งผสมกับเส้นใย ทำให้เกาะกันเป็นก้อน โหลดดังกล่าวอาจเลียนแบบด้วยโครงสร้างดังกราฟในรูปที่ 5.9 จะเห็นได้จากผลการจำลองว่าอัตราเร็วรอบมอเตอร์มีการแกว่งตัวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

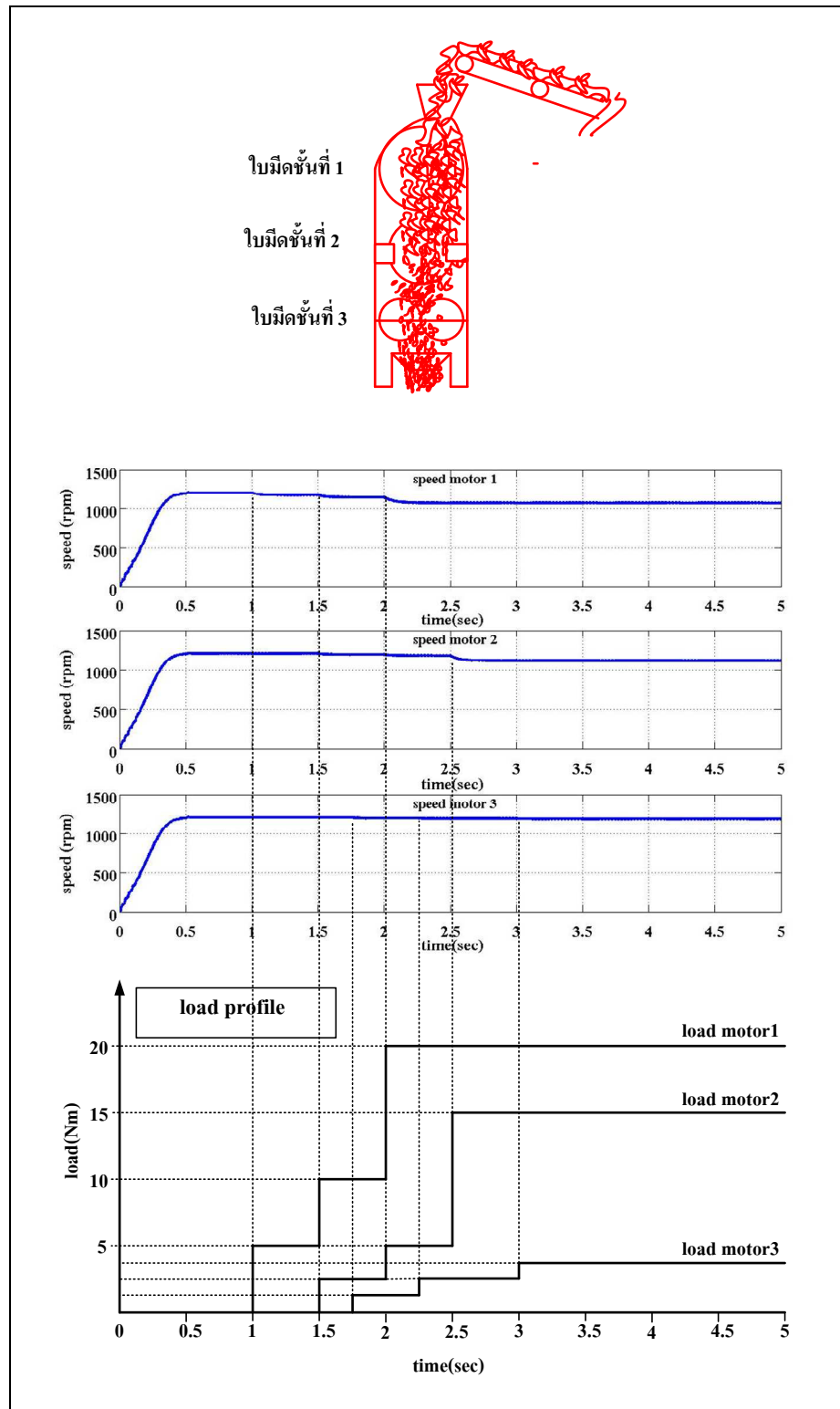
ผลการจำลองการทำงานของเครื่องจักรปรากฏอัตราเร็วรอบมอเตอร์ในลักษณะที่คล้ายกันกับกรณี 4 ด้วย ซึ่งเป็นกรณีที่โหนดมีน้ำหนักเบา ร่วงหล่นทีละก้อนไม่ต่อเนื่อง ลงสู่โบริมแต่ละชั้น รูปที่ 5.10 แสดงกราฟโครงสร้างโหนดและกราฟอัตราเร็วรอบมอเตอร์ สะท้อนให้เห็นการทำงานอย่างได้ผลดีของตัวควบคุมพีซีที่ได้ออกแบบขึ้น

กรณีที่สนใจกรณี 5 มีโหนดน้ำหนักมากเป็นก้อน ๆ ร่วงหล่นเข้าสู่ชั้นโบริมแต่ละชั้นไม่ต่อเนื่องกัน ดังที่แทนด้วยโครงสร้างโหนดที่ปรากฏในรูปที่ 5.11 ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีซีที่พัฒนาขึ้นสามารถคุมค่าอัตราเร็วรอบมอเตอร์ให้มีความผิดพลาดไม่เกิน  $\pm 5\%$  ได้กับมอเตอร์ตัวที่ 2 และ 3 เท่านั้น ความผิดพลาดทางอัตราเร็วของมอเตอร์ตัวที่ 1 มากเกินกว่าความสามารถที่ตัวควบคุมและอินเวอร์เตอร์จะรับได้ สาเหตุที่เกิดขึ้นมาจากการที่โหนดมีน้ำหนักมากถึง 20 Nm ในทางปฏิบัติสภาวะเช่นนี้ต้องได้รับการป้องกันมิเช่นนั้นเครื่องจักรและระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์จะเกิดความเสียหาย

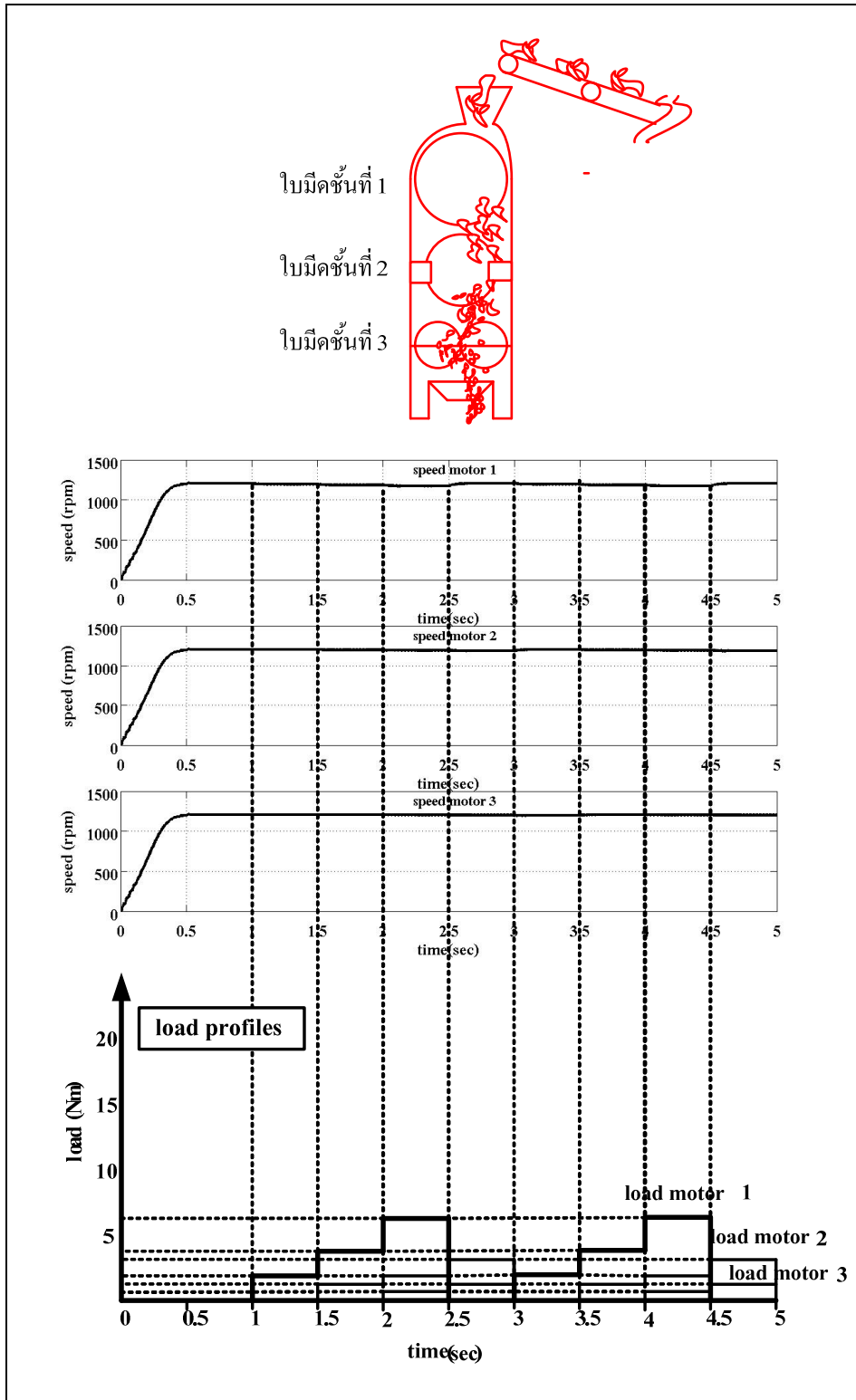




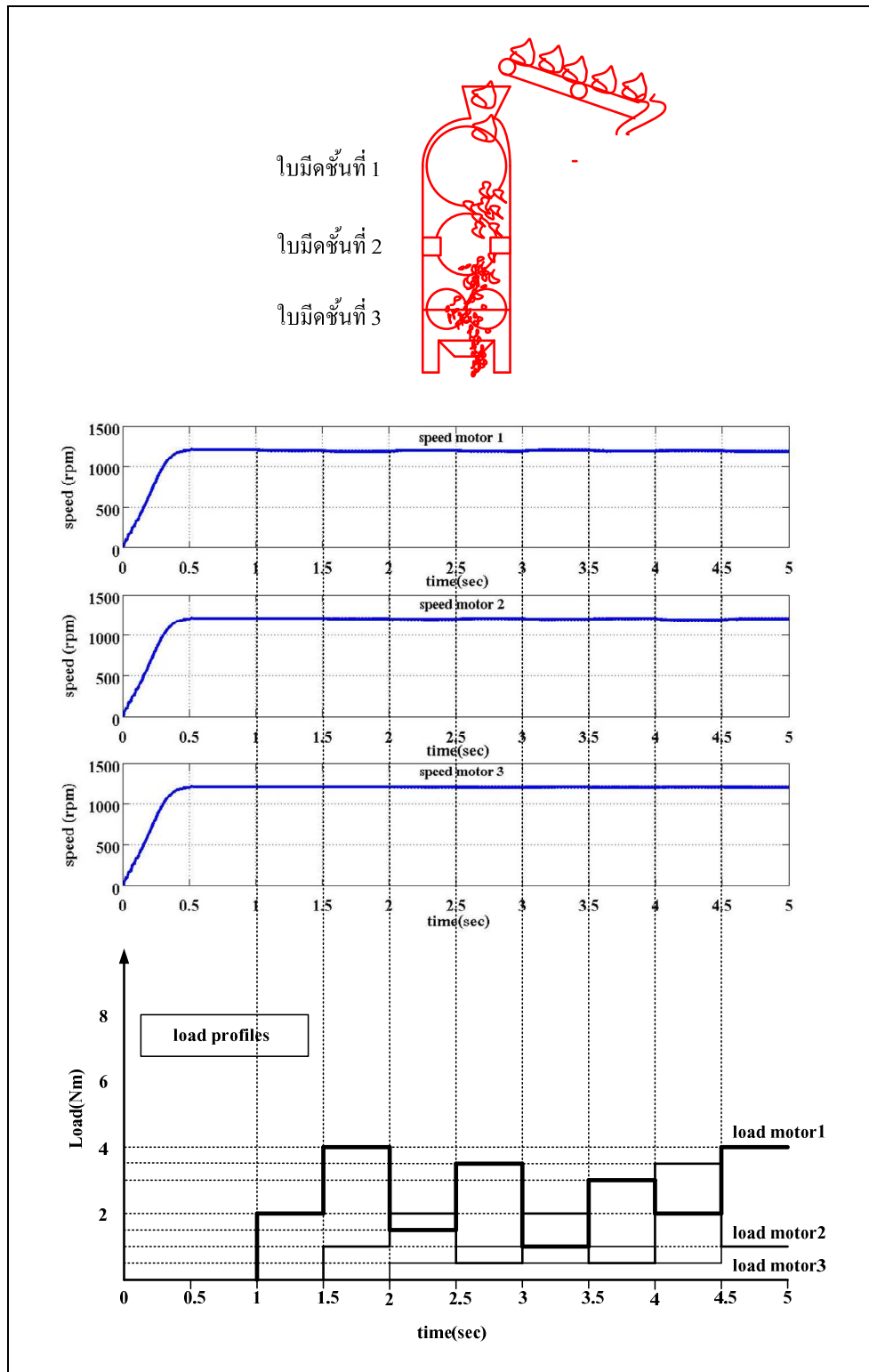
รูปที่ 5.7 การจำลองการทำงานของเครื่องจักรเมื่อได้รับโหลดตามโครงรูปที่กำหนด (กรณีที่ 1)



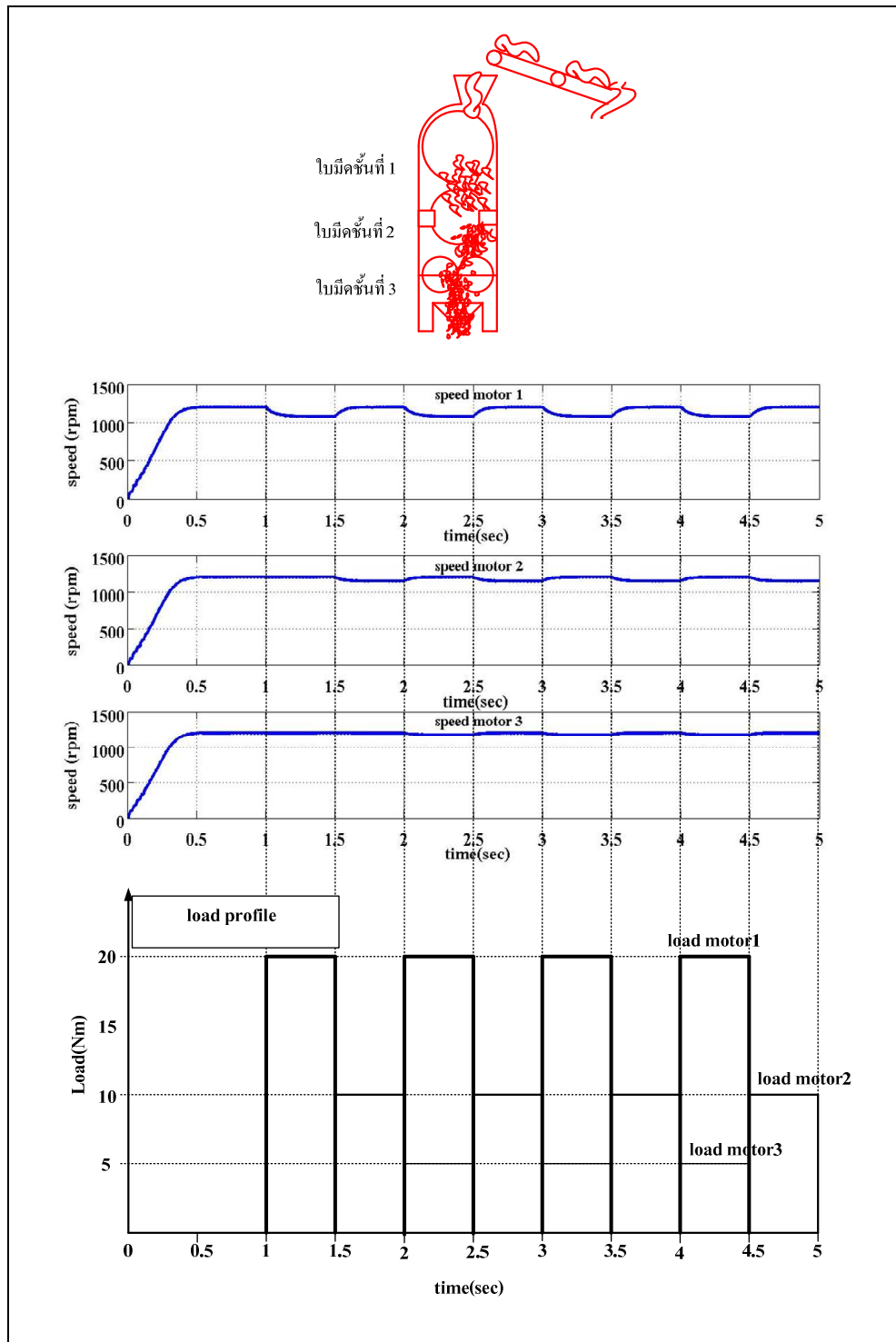
รูปที่ 5.8 การจำลองการทำงานของเครื่องจักรเมื่อได้รับโหลดตามโครงสร้างที่กำหนด (กรณีที่ 2)



รูปที่ 5.9 การจำลองการทำงานของเครื่องจักรเมื่อได้รับ โหลดตาม โครงรูปที่กำหนด (กรณี ที่ 3)



รูปที่ 5.10 การจำลองการทำงานของเครื่องจักรเมื่อได้รับ โหลดตาม โครงรูปที่กำหนด (กรณีที่ 4)



รูปที่ 5.11 การจำลองการทำงานของเครื่องจักรเมื่อได้รับโหลดตามโครงสร้างที่กำหนด (กรณีที่ 5)

### 5.3 สรุป

การใช้วิธีควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์แบบ V/f โดยใช้ตัวควบคุมพีซีแบบจัดการตัวเองเป็นตัวปรับแปรคำสั่งในการจุดชนวนอินเวอร์เตอร์ ใช้เป็นตัวจ่ายกำลังงานให้แก่มอเตอร์ทั้งสามตัว โดยรับสัญญาณป้อนกลับมาจากตัวตรวจรู้สถานะทางอัตราเร็วของมอเตอร์ ตัวควบคุมพัฒนาขึ้นด้วยหลักการศึกษาลำบาก (heuristics) มีองค์ประกอบของกฎ 2 ชุด แต่ละชุดมีกฎ 121 ข้อ ได้ทำการจำลองผลเพื่อทดสอบแนวทางการควบคุมระบบในหลาย ๆ กรณีที่เครื่องจักรรับโหลด ผลที่ได้จะนำไปสู่การออกแบบและสร้างระบบจริงเพื่อทดสอบ และจากการจำลองผลหลาย ๆ กรณีที่ได้นำเสนอไปแล้วนั้น จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมสามารถรักษาสถานะอยู่ตัวทางอัตราเร็วของมอเตอร์ให้มีค่าผิดพลาดน้อยกว่า  $\pm 5\%$  ไม่ปรากฏการฟุ้งเกิน เนื่องจากชุดไบมัดต่าง ๆ ล้วนมีความเฉื่อยสูง และในกรณีที่ระบบมีสถานะรบกวนเนื่องจากโหลดที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าจะควบคุมได้ (20 Nm) จะต้องมีระบบป้องกันตัดการทำงานของมอเตอร์ตัวดังกล่าวออกจากระบบ แต่จะยังคงรักษาการทำงานของมอเตอร์ตัวที่เหลือให้ทำงานตามค่าเป้าหมายต่อไป จนกว่าจะหยุดระบบทั้งหมดแล้วเริ่มต้นทำงานใหม่ ตัวควบคุมจึงจะกลับมาทำงานดังเดิม ค่าอัตราเร็วมอเตอร์ที่เป็นเป้าหมายนี้สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามชนิดของวัสดุ เพื่อให้เกิดความเหมาะสม และตรงตามความต้องการของกระบวนการผลิตนั้น

## บทที่ 6

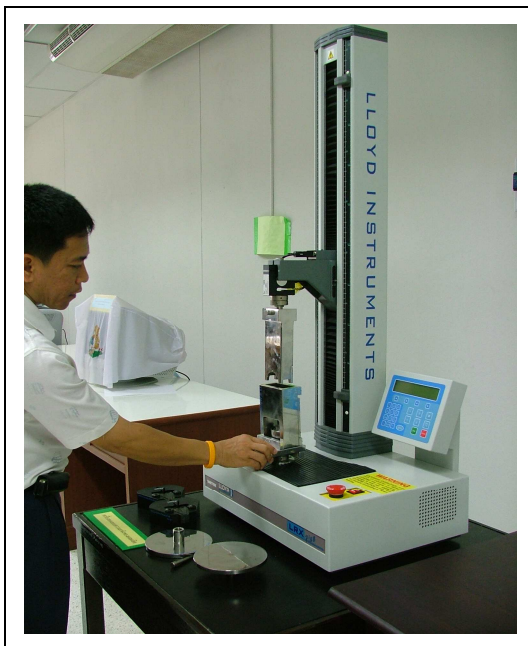
### เครื่องลับพีชผลทางการเกษตรและระบบควบคุม

#### 6.1 บทนำ

ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมเกษตรที่มีความต้องการให้มีการย่อยวัสดุทางการเกษตรให้มีขนาดเล็กลง เช่น การย่อยหัวมันสำปะหลังให้มีขนาดเล็กลงในขั้นตอนการไล่ความชื้น เป็นต้น อาจต้องใช้เครื่องจักรกลในการลับ หั่น วัสดุทางการเกษตรเหล่านั้น ซึ่งมักจะเป็วัสดุของแข็งที่มีความชื้นสูง ดังนั้นการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้มีแนวคิดที่จะออกแบบและพัฒนาใบมีด พร้อมทั้งอุปกรณ์จับยึดใบมีดที่เป็นองค์ประกอบของเครื่องจักรใช้ในการย่อยวัสดุ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยได้แบ่งขั้นตอนการย่อยวัสดุพีชผลทางการเกษตรออกเป็น 3 ขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นตอนการกระแทกให้ชิ้นวัสดุแตกออกจากกัน ขั้นตอนการลับ ขั้นตอนการเนียน ซึ่งจะได้อธิบายถึงแนวคิดในการออกแบบแต่ละขั้นตอนในหัวข้อต่อไป และนอกจากนั้นบทที่ 6 นี้ยังนำเสนอการพัฒนาาระบบควบคุมป้อนกลับสำหรับใช้งานกับเครื่องจักรดังกล่าวอีกด้วย

#### 6.2 เครื่องลับพีชผลทางการเกษตร

ดังที่ได้กล่าวถึงความสำคัญของปัญหาไว้ในบทที่ 2 มาแล้วว่า โครงสร้างและลักษณะทางกายภาพของเครื่องจักรแบบเดิมก่อให้เกิดปัญหาในทางปฏิบัติ ที่วัสดุพีชผลทางการเกษตรอัดตัวแน่นในเครื่องจักรขณะทำงาน ทำให้เครื่องติดยึดไม่สามารถทำงานได้อย่างปกติ ดังนั้นการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาเครื่องจักรกลการเกษตรสำหรับการลับย่อยพีชผลทางการเกษตร ในการพัฒนาเครื่องลับพีชนี้ได้เริ่มจากการนำวัสดุที่ต้องการลับหรือย่อยขนาดมาทดสอบดังแสดงในหัวข้อที่ 6.2.1 เพื่อหาค่าแรงต้านทานการตัดเนื้อที่กระทำต่อใบมีดด้วยเครื่องชีวะคราก รุ่น LRX plus ของบริษัท LLOYD INSTRUMENTS ประเทศอังกฤษ ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ในขั้นตอนต่อมาในหัวข้อที่ 6.2.2 ได้ทำการทดสอบวัสดุที่นำมาทำใบมีด ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเหล็กเสื่อมสภาพมาเข้ากระบวนการเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ด้วยกระบวนการที่ประดิษฐ์คิดค้นขึ้นตามหัวข้อที่ 6.2.3 จนได้เหล็กที่มีความแข็งและเหนียวเหมาะกับการลับพีชผลทางการเกษตร หลังจากนั้นได้ทำการออกแบบโครงสร้างของเครื่องลับพีชผลทางการเกษตร ให้สามารถใช้งานได้อย่างไม่ติดขัดในขณะที่ใช้งาน พร้อมทั้งขึ้นรูปใบมีดให้มีรูปทรงแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งานซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อ 6.2.4 ต่อไป



รูปที่ 6.1 ทดสอบแรงต้านทานการตัดเฉือนของมันสำปะหลังด้วยเครื่องชีวะคราก

### 6.2.1 การทดสอบวัสดุ

ในการทดสอบวัสดุมุ่งเน้นที่จะประดิษฐ์เครื่องสับมันสำปะหลัง ในการทดสอบ จึงได้นำหัวมันสำปะหลังพันธุ์ระยอง 50 จากแหล่งที่ปลูกแตกต่างกัน 3 แหล่ง ในพื้นที่จังหวัด นครราชสีมา เนื่องจากพื้นที่เพาะปลูกมีความอุดมสมบูรณ์ของแร่ธาตุในดินที่แตกต่างกัน จึงได้ ทำการเลือกมันจากแหล่งต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ได้เลือกมันสำปะหลังจากบริเวณเพาะปลูก ใกล้เคียงมหาวิทยาลัย ส่วนแหล่งที่สอง และสาม เลือกมันจากลานรับซื้อมันสองแห่งซึ่งมีการรับซื้อมัน จากหลากหลายพื้นที่ มาทำการทดสอบหาแรงตัดเฉือน การทดสอบเริ่มจากนำหัวมันสำปะหลัง มาหั่นเป็นท่อนให้มีขนาดตามความยาว 10 cm หลังจากนั้นทำการยึดไว้กับส่วนจับขึ้นวัสดุที่อยู่ บนแท่นของเครื่องชีวะคราก ที่ตัวเครื่องดังกล่าวมีแขนสำหรับจับยึดใบมีดให้เลื่อนขึ้นลงในแนวตั้ง เมื่อทั้งสองส่วนได้รับการติดตั้งเรียบร้อยแล้ว ใบมีดจะค่อย ๆ เลื่อนลงมาตามแนวตั้ง กดลงบน ท่อนมันสำปะหลังที่ถูกตรึงไว้บนแท่น จนท่อนมันขาดออกจากกัน จากการนำมันสำปะหลังพันธุ์ ระยอง 50 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวมันสำปะหลังประมาณ 10 cm มาทำการทดสอบ 3 ครั้ง ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 6.1 ทำให้ทราบได้ว่าจะต้องใช้แรงตัดเฉือนมากที่สุด คือ 29.43 N เพื่อให้ มันสำปะหลังขาดออกจากกัน



ตารางที่ 6.1 ผลทดสอบสับหัวมันสำปะหลัง

ทดสอบครั้งที่	แรงที่ใช้ในการสับ (N)
1	28.46
2	29.43
3	27.77

ในการวิจัยนี้จึงใช้ค่าแรงตัดเฉือนดังกล่าว (29.43 N) เพื่อออกแบบเครื่องจักร โดยพิจารณาหาค่าความเค้นเฉือนสำหรับสับมันสำปะหลังและพืชผลทางการเกษตรที่มีความแข็งและมีเส้นใยที่เหนียวน้อยกว่ามันสำปะหลัง จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

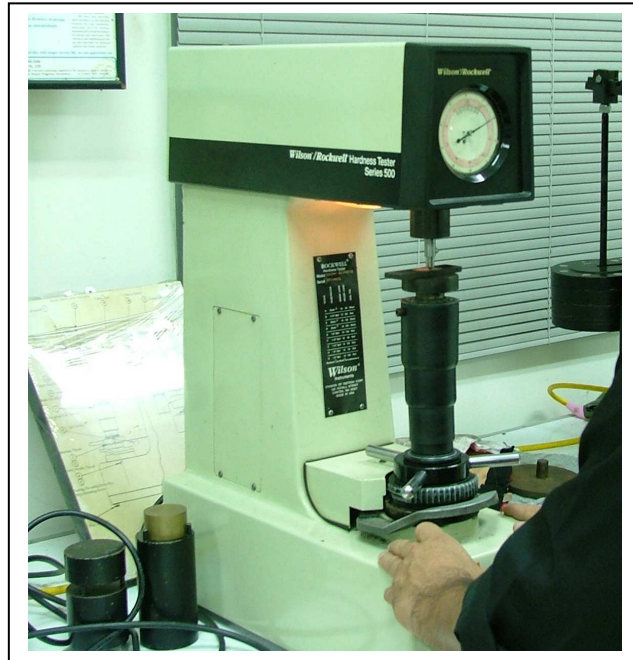
$$\tau = \frac{F}{A} \quad (6.1)$$

เมื่อ  $\tau$  คือ ความเค้นเฉือนของหัวมันสำปะหลัง ( $N/m^2$ )  
 $F$  คือ แรงตัดเฉือน (N)  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของมันสำปะหลัง ( $m^2$ )

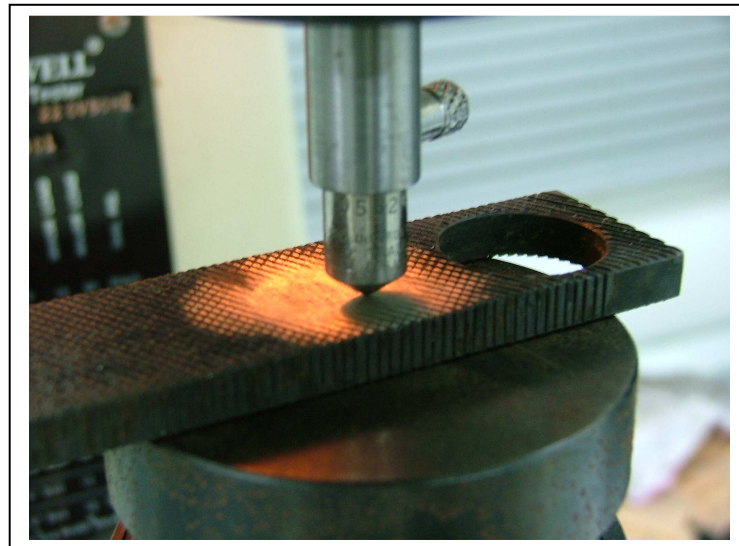
จากการทดสอบด้วยเครื่องชีวะครากทำให้ทราบว่าต้องใช้แรงตัดเฉือนสูงสุด 29.43 N เพื่อให้มันสำปะหลังขาดออกจากกัน แต่ใบมีดที่ได้ทำการออกแบบไว้เป็นชนิดไม่มีความคม กล่าวคือ มีบริเวณขอบมุมในการกดบนเนื้อของมันสำปะหลัง 2 จุด พื้นที่หน้าตัดจึงคิดเป็นสองเท่า ( $2 \times A$ ) เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 6.1 ได้ความเค้นเฉือนของหัวมันสำปะหลังเป็น  $1.874 \text{ kN/m}^2$  ทำให้ทราบว่าใบมีดหนึ่งใบที่กดลงบนหัวมันสำปะหลังจนขาดออกจากกัน มีแรงต้านทานการตัดเฉือนเท่ากับ  $1.874 \text{ kN/m}^2$  ซึ่งในการออกแบบได้พิจารณาค่าความปลอดภัยไว้ 2.5 เท่า โดยต้องคำนึงถึงขนาดของเครื่องจักรที่ได้ทำการออกแบบไว้ร่วมด้วย

## 6.2.2 การทดสอบเหล็กเชื่อมสภาพก่อนและหลังผ่านกระบวนการ

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เกี่ยวกับเครื่องสับพืช จะเห็นว่าปัญหาที่มีความสำคัญมากในเครื่องสับตามวิทยาการเดิมที่มีปรากฏมาก่อนแล้ว คือ ใบมีดที่ไม่มีความคมทนหมดความคมเร็ว ดังนั้นใบมีดของงานวิจัยนี้จึงได้รับการขึ้นรูปจากวัสดุเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอน 1% โดยนำเหล็กที่ได้มาทดสอบความแข็งและความเหนียวด้วย Rockwell Hardness Tester รุ่น B503-R ของบริษัท Wilson ดังแสดงในรูปที่ 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ



รูปที่ 6.2 เครื่องทดสอบความแข็งของเนื้อวัสดุ (hardness tester)



รูปที่ 6.3 การทดสอบความแข็งบนพื้นผิวเหล็กเสื่อมสภาพ

จากรูปที่ 6.2 แสดงการทดสอบความแข็งของเนื้อวัสดุที่ใช้ทำใบมีดของงานวิจัยนี้ ในการทดสอบได้ทำการตัดแผ่นวัสดุให้มีขนาดกว้าง 5 cm ยาว 10 cm วางบนแท่นรองรับวัสดุบนแท่นเครื่องแกนด้านบนของเครื่องมือจับแท่งทดสอบวัสดุ ส่วนปลายทำด้วยเพชร เมื่อทำการทดสอบส่วนหัวเพชรจะถูกกดลงบนผิวของวัสดุทดสอบ มาตรวัดที่อยู่บนเครื่องจะแสดงค่าแรงที่กดจนหัวเพชรจมลงไปเนื้อวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 6.3 วิธีการทดสอบลักษณะนี้ใช้ในการทดสอบเหล็กเชื่อมสภาพ ทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการอบชุบที่ได้ประดิษฐ์คิดค้นเพื่อขึ้นรูปให้เป็นใบมีดสำหรับเครื่องสับพืชผลทางการเกษตร ผลการทดสอบความแข็งเนื้อเหล็กเชื่อมสภาพก่อนผ่านกระบวนการอบชุบมีค่าความแข็ง 65 HRC และเมื่อผ่านกระบวนการอบชุบแล้วมีค่าความแข็ง 55 HRC ดังที่มีรายละเอียดแสดงไว้ในรายงานการทดสอบ จากห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ภาคผนวก ก.)

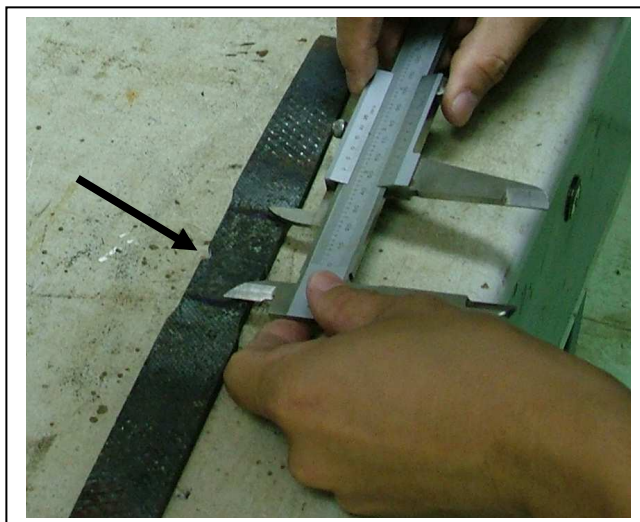
ในด้านการทดสอบความเหนียวหรือยึดตัวของเหล็กเชื่อมสภาพ การทดสอบเริ่มจากเตรียมวัสดุให้มีขนาดความกว้าง 2.5 cm หนา 6.5 cm และยาว 30 cm และทำให้บริเวณที่จะทดสอบการยึดตัวมีความกว้างน้อยกว่าส่วนปลายทั้งสอง ซึ่งบริเวณนี้เหล็กจะยึดออกและขาดออกจากกันดังแสดงในรูป 6.4 ตัวเครื่องทดสอบมีส่วนจับชิ้นงานสองส่วน คือ ส่วนบน และส่วนล่างดังแสดงในรูปที่ 6.5 ส่วนบนจะเป็นส่วนที่เคลื่อนที่ขึ้นตามแนวตั้ง วัสดุทดสอบจะถูกดึงจนแยกออกจากกันเป็นสองส่วน เครื่องวัดให้การอ่านค่าแรงดึงดังแสดงในรายงานการทดสอบ จากห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ภาคผนวก ก.) จากผลการทดสอบเหล็กเชื่อมสภาพทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการอบชุบ ทำให้ทราบได้ว่าเมื่อเหล็กเชื่อมสภาพผ่านกระบวนการอบชุบแล้ว จะมีความสามารถในการยึดตัวได้ กล่าวคือ ก่อนที่เหล็กจะขาดออกจากกันจะมีแรงดึงทำให้เกิดการยึดตัวขาดออกเป็นแนวเรียบ ไม่แตก ตรงกันข้ามกับก่อนที่จะผ่านกระบวนการ เหล็กเชื่อมสภาพที่นำมาทดสอบไม่สามารถยึดตัวได้ เมื่อดึงจนถึงจุดฉีกเนื้อวัสดุก็จะขาดออกจากกันทันที บริเวณที่ขาดจะแตกออก ไม่เป็นแนวเรียบ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.4 การเตรียมเหล็กเชื่อมสภาพสำหรับเข้าเครื่องทดสอบความยืดตัว



รูปที่ 6.5 เครื่องทดสอบความยืดตัวของเหล็กเชื่อมสภาพ



รูปที่ 6.6 (ก) เหล็กเสื่อมสภาพก่อนผ่านการอบชุบที่ถูกดึงจนขาดออกจากกัน โดยเครื่องทดสอบการยึดตัวของวัสดุ เนื้อเหล็กเกิดการแตกบิ่น



รูปที่ 6.6 (ข) เหล็กเสื่อมสภาพผ่านการอบชุบที่ถูกดึงจนขาดออกจากกัน โดยเครื่องทดสอบการยึดตัวของวัสดุ เนื้อเหล็กจะไม่แตกแต่จะแยกเป็นแนว

### 6.2.3 กระบวนการนำเหล็กเสื่อมสภาพกลับมาใช้ใหม่และขึ้นรูปใหม่

การขึ้นรูปใหม่ตามลักษณะการใช้งานหรือตามขั้นตอนการย่อยวัสดุในการวิจัยนี้ แบ่งขั้นตอนการย่อยออกเป็น 3 ขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นตอนแรกเป็นการกระแทก ใหม้ดที่ใช้ในขั้นตอนนี้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าไม่มีคม เจาะรูสำหรับสอดใส่เพลตตรงปลายด้านหนึ่ง

ในขั้นตอนที่สองเป็นการสับด้วยใบมีดชนิดไม่มีความคม ใบมีดมีรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ทั้งเมื่อมองจากด้านหน้าและเมื่อมองจากด้านบน ส่วนโคนของใบมีดสับเป็นส่วนที่ใช้ติดตั้งเข้ากับชิ้นส่วนยึดใบมีด โดยการยึดด้วยสลักเกลียวและแหวน ส่วนโคนของใบมีดสับจึงถูกเจาะเป็นรูกลม 2 รู ส่วนปลายใบมีดสับได้รับการขึ้นรูปให้มีลักษณะเรียวยาว และขั้นตอนที่สามเป็นการเชื่อมด้วยใบมีดเชื่อม บริเวณตอนกลางลำตัวของใบมีดเชื่อมได้รับการขึ้นรูปให้มีความแบนเรียบและมีลักษณะเป็นหกเหลี่ยม จุดกึ่งกลางของหกเหลี่ยมเป็นจุดศูนย์กลางของรูเจาะทะลุใบมีด มีไว้เพื่อการสอดใบมีดเชื่อมลงบนเพลากลางใบมีดเมื่อติดตั้งใช้งาน ใบมีดมีรูปลักษณะที่สมมาตรตามแนวซ้ายขวา ส่วนปลายใบมีดเชื่อมต้องได้รับการเจียรให้มีความคมมาก ส่วนปลายสุดของใบมีดเชื่อมได้รับการขึ้นรูปให้โค้งมนเพื่อให้มีความสามารถในการเชื่อม ซึ่งกระบวนการนำเหล็กเชื่อมสภาพกลับมาใช้ใหม่และขึ้นรูปใบมีดทั้งสาม ได้รับการจดสิทธิบัตรการประดิษฐ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งอาจประมวลโดยสังเขปได้ดังต่อไปนี้

**ขั้นตอนที่ 1** นำเหล็กมีปริมาณคาร์บอน 1% ที่ได้ขนาด ไปอบเพื่อเพิ่มความเหนียว ที่อุณหภูมิที่เหมาะสมตามระยะเวลาที่กำหนด (ความแข็งจะลดลงเหลือ 45-52 HRC โดยประมาณ) และทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงโดยธรรมชาติ

**ขั้นตอนที่ 2** เป็นการเผาเหล็กจากขั้นตอนที่ 1 ด้วยเพลิงจากเครื่องเผาด้วยแก๊สจนเหล็กร้อนจัดและมีสีส้ม

**ขั้นตอนที่ 3** เป็นการนำเหล็กหมกลงในทรายและทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงตามธรรมชาติ (ความแข็งจะลดลงเหลือ 28 HRC โดยประมาณ แต่จะเหนียวมากขึ้น)

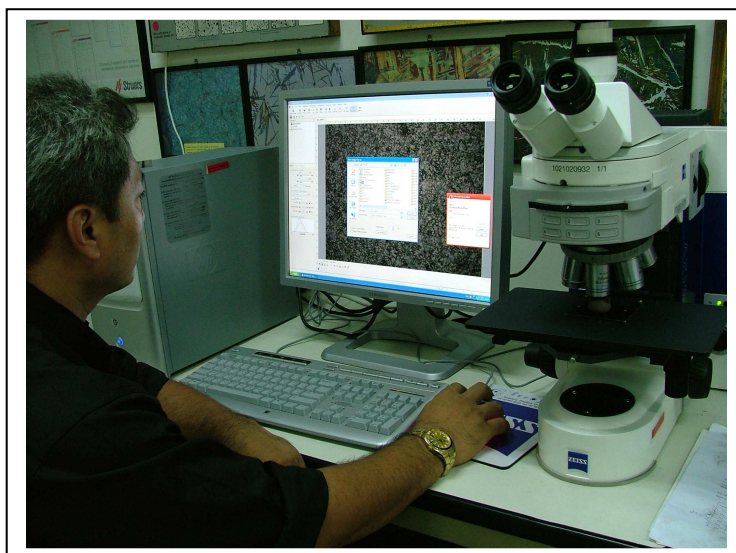
**ขั้นตอนที่ 4** นำเหล็กที่ได้ขนาดและผ่านกระบวนการตามขั้นตอนที่ 3 แล้วไปเจาะรูกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางตามขนาดที่กำหนด

**ขั้นตอนที่ 5** ทำการเจียรใบมีดที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 ด้วยหินเจียรให้เข้ารูปตามมิติต่าง ๆ ของใบมีดตามการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

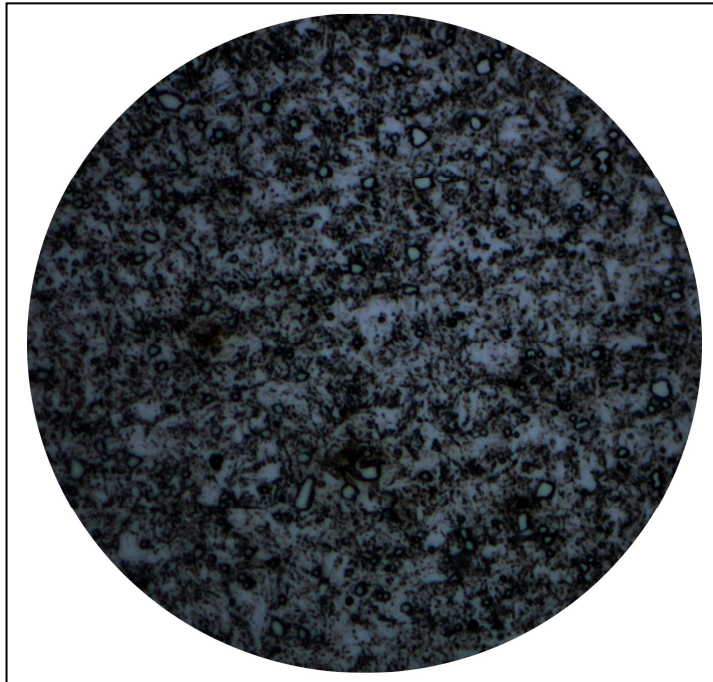
**ขั้นตอนที่ 6** หลังจากผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้วนำใบมีดมาอบให้ความร้อนและทิ้งไว้ให้เย็นลงตามธรรมชาติ (จะได้รับความแข็งของเนื้อเหล็กประมาณ 55 HRC แต่เหล็กจะเหนียวมากขึ้นกว่าก่อนผ่านกระบวนการ)

ในแต่ละกระบวนการจะต้องทำการทดสอบความแข็งตามขั้นตอนและวิธีการที่ได้อธิบายในหัวข้อ 6.2.2 การตรวจสอบจะต้องใช้กล้องกำลังขยายสูง (รูปที่ 6.7) ส่องดูเนื้อเหล็กทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการ พบว่าเนื้อเหล็กก่อนผ่านกระบวนการอบชุบ มีการรวมตัวของคาร์บอนอยู่หนาแน่นทำให้ซีเมนต์ไทต์ (cementite) มีลักษณะเป็นเม็ดคั้งแสดงในรูปที่ 6.8 ซึ่งซีเมนต์ไทต์เหล่านี้เป็นตัวการทำให้เหล็กมีความแข็ง จะอยู่กันเป็นกลุ่ม ๆ ไม่กระจายตัว และพื้นสีขาวที่เห็นในภาพเป็นเฟอร์ไรต์ (ferrite) มีคุณสมบัติทำให้เนื้อเหล็กอ่อนตัว แต่เมื่อเหล็กได้ผ่าน

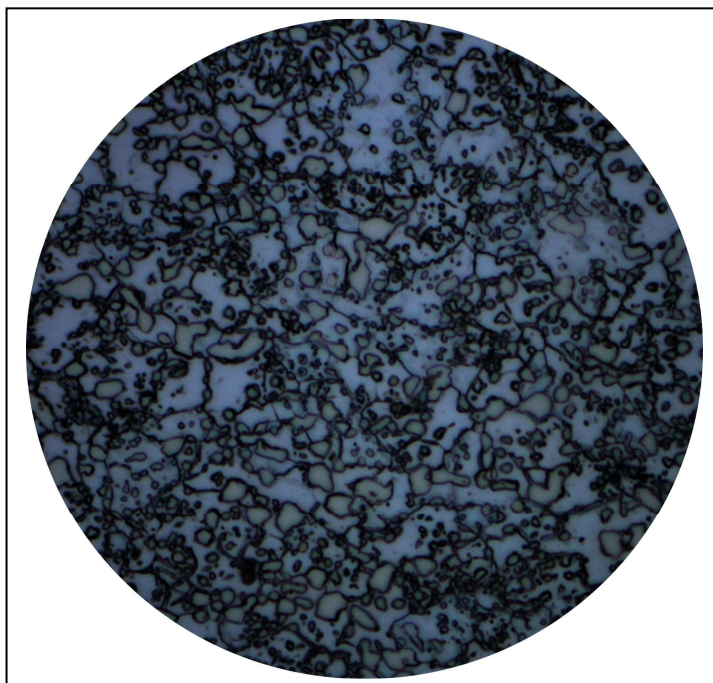
กระบวนการอบชุบแล้วจะเห็นว่าซีเมนต์ไทต์และคาร์บอนกระจายตัวออก เห็นเป็นพื้นสีขาวของเฟอไรไรท์มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6.9 ส่งผลให้เหล็กมีความสามารถยึดตัวและความแข็งแรงลดลง ซึ่งในขั้นตอนนี้จะนำเหล็กที่ได้มาตกแต่งขึ้นรูป หลังจากขึ้นรูปแล้วจึงนำเข้าสู่กระบวนการอบชุบแข็งเพื่อให้เหล็กมีความแข็งแรงใกล้เคียงกับลักษณะสมบัติเดิม แต่จะมีความเหนียวหรือยึดตัวได้มากกว่าเดิม รูปที่ 6.10 แสดงลักษณะสมบัติของเนื้อเหล็กที่ผ่านกระบวนการอบชุบเรียบร้อยแล้ว อาจสังเกตได้ว่ามีลักษณะสมบัติของเนื้อเหล็กใกล้เคียงกับกรณีของรูปที่ 6.8 แต่จะสังเกตเห็นพื้นสีขาวที่เป็นเฟอไรไรท์ว่ามีปริมาณมากกว่าเดิมมาก กระบวนการดังที่ได้อธิบายนี้ได้รับการจดสิทธิบัตรการประดิษฐ์ โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่คำขอ 0701000717



รูปที่ 6.7 กล้องกำลังขยายสูงสำหรับตรวจดูเนื้อเหล็ก

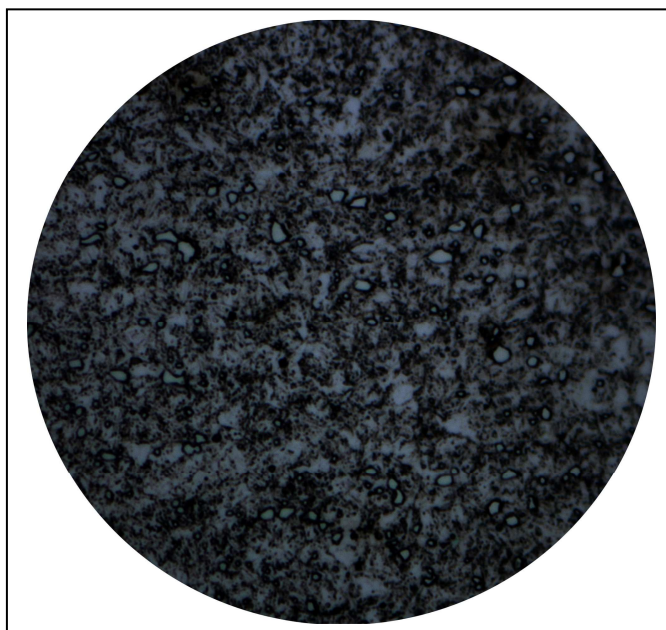


รูปที่ 6.8 เนื้อเหล็กเชื่อมสภาพก่อนผ่านกระบวนการ (กำลังขยาย 1000 เท่า)



รูปที่ 6.9 เนื้อเหล็กเชื่อมสภาพเมื่อผ่านกระบวนการอบชุบในชั้นตอนที่ 1 (กำลังขยาย 1000 เท่า)





รูปที่ 6.10 เนื้อเหล็กเชื่อมสภาพเมื่อผ่านกระบวนการอบชุบแข็งในขั้นตอนที่ 6  
(กำลังขยาย 1000 เท่า)

#### 6.2.4 เครื่องลับพีชผลทางการเกษตร

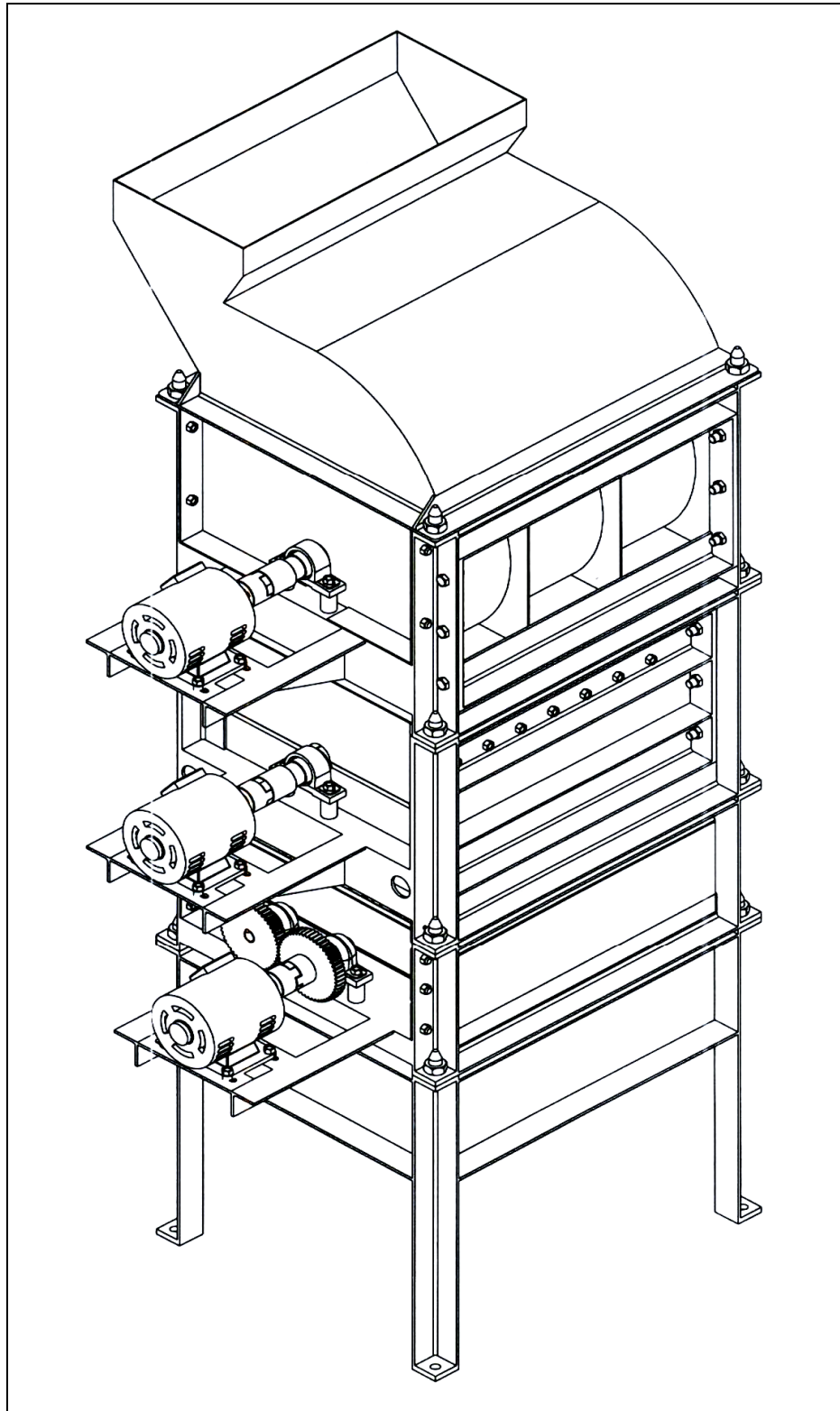
เครื่องลับพีชผลทางการเกษตรมีรูปลักษณะภายนอกดังที่แสดงในรูปที่ 6.11 ที่เป็นเครื่องปิดสะดวกแก่การใช้งาน ไม่ก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้ปฏิบัติงาน มีช่องเปิด-ปิดสำหรับซ่อมบำรุง และมีสลักยึดอย่างแน่นหนา ตัวถังทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม ยึดกับโครงถังด้วยเกลียวและแหวน ภายในมีส่วนประกอบหลักดังแสดงในรูปที่ 6.12 ซึ่งจะเห็นว่ามีใบมีดที่ออกแบบมาแตกต่างกัน 3 ชุด เรียงตามแนว บน-ล่าง การทำงานของใบมีดเรียงลำดับจากบนลงล่าง ก่อให้เกิดขั้นตอนการกระแทก ขั้นตอนการลับ และขั้นตอนการเลือน กระทำตามลำดับต่อวัสดุที่ถูกป้อนเข้าทางด้านบนเป็นวัตถุดิบของเครื่องจักร ซึ่งร่วงหล่นลงสู่พื้นตามหลักแรงโน้มถ่วงของโลก

##### ● เครื่องลับพีชผลทางการเกษตรในขั้นตอนการกระแทก

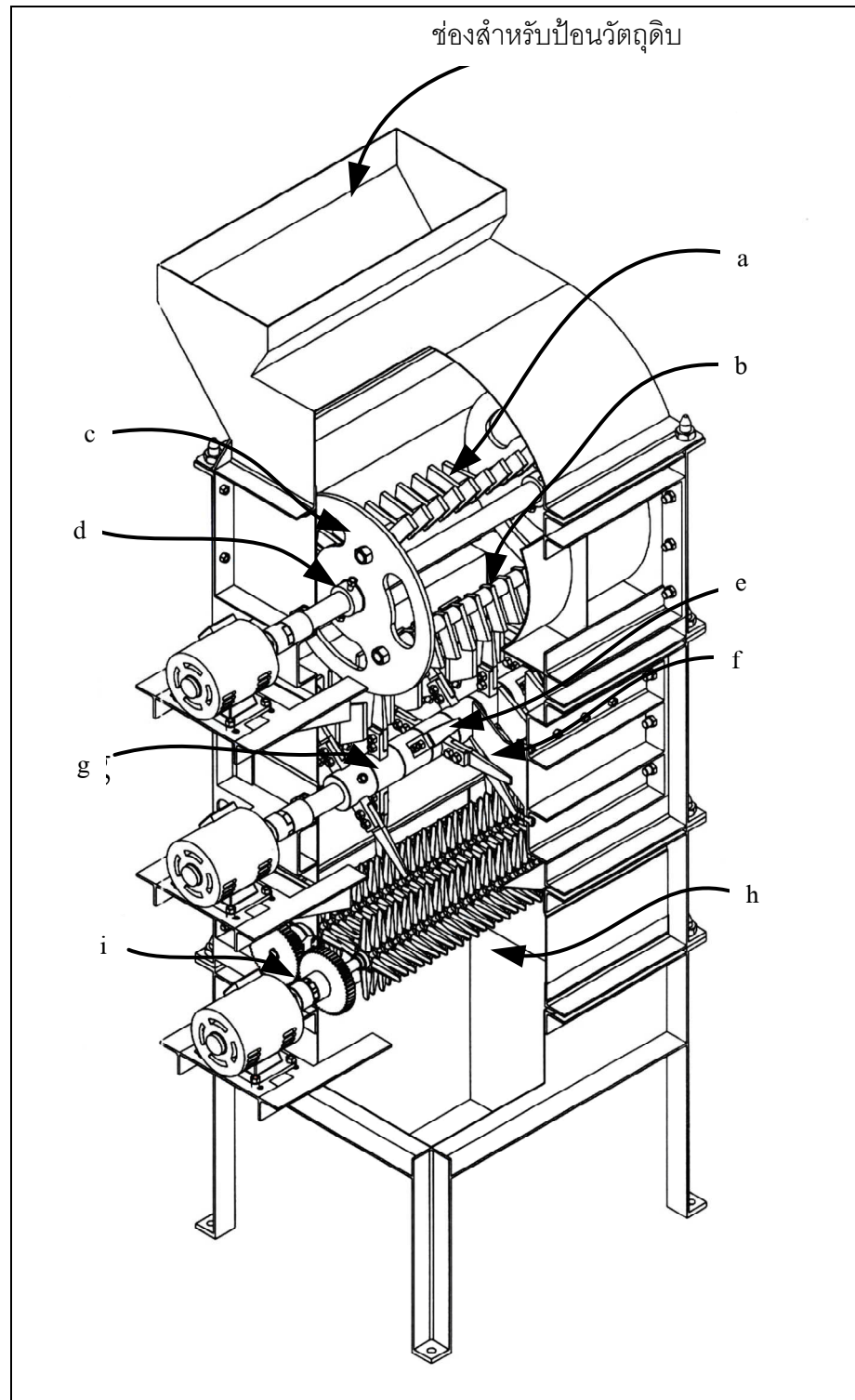
รูปที่ 6.12 แสดงใบมีด (a) ที่ใช้ในการกระแทกนั้นไม่มีความคม มีขนาดสม่ำเสมอตลอดแนวลำตัวของใบมีด ใบมีดมีพื้นฐานเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขึ้นรูปจากเหล็กตะไบ บริเวณใกล้ขอบด้านซ้ายของใบมีดมีการเจาะรูกลมทะลุตลอดความหนาเพื่อสอดแกนใบมีด แกนใบมีดมีรูปลักษณะเป็นทรงกระบอกกลมตัน ขึ้นรูปจากเหล็กกล้าไร้สนิมชุบแข็งและขัดผิวมัน ที่ปลายทั้งสองด้านของเพลลาได้รับการตีเกลียว ขอบทางปลายทั้งสองด้านของแกนใบมีดต้องปาดมนเพื่อให้ง่ายต่อการสอดใส่และขันยึด ใช้ปลอกสั้นและปลอกยาวเป็นตัวปรับเปลี่ยนความยาว

และระยะประชิดระหว่างใบมีดให้สอดคล้องกับความต้องการใช้งาน ซึ่งปกอดดังกล่าวมีรูปลักษณะเป็นทรงกระบอกกลมขึ้นรูปจากทองเหลือง (b) แผ่นโครง (c) จำนวน 2 แผ่น ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม มีลักษณะเป็นแผ่นจานกลม กึ่งกลางของแผ่น โครงมีการเจาะเป็นรูกลมเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่กว่าแกนใบมีด บริเวณโดยรอบรูเจาะดังกล่าว ได้รับการเชื่อมติดอย่างแน่นหนาด้วยวงแหวนทรงกลม (d) เพื่อใช้ยึดแผ่น โครงติดกับแกนเพลลา วงแหวนดังกล่าวขึ้นรูปจากเหล็กกล้าไร้สนิม บนแผ่น โครงมีรูเจาะทรงกลมที่เจาะทะลุแผ่น โครงด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กกว่ารูที่เจาะใบมีดเล็กน้อย เพื่อไว้สำหรับสอดแกนใบมีด และเพื่อเป็นการลดน้ำหนักของแผ่น โครงจึงทำการเจาะให้มีรูเจาะทรงถั่วจำนวน 3 รู วางตัวให้ได้ดุล ในการติดตั้งชุดใบมีดนี้ ซึ่งเรียกว่าชุดใบมีดควงแบบเป็นพวง ใช้รูเกลียวบนวงแหวนเป็นช่องเปิดเพื่อการขันยึดติดกับเพลลาทั้งสองด้านซ้ายขวาของแผ่น โครง การติดตั้งชุดใบมีดควงแบบเป็นพวงของการวิจัยนี้ ในการใช้งานอาจสอดเพลลาผ่านรูของวงแหวนทรงกลม และยึดด้านหัวด้านท้ายของเพลลานั้นด้วยสลักเกลียวให้แน่น ปลายด้านหนึ่งของเพลลาได้รับการต่อคู่ควบเข้ากับต้นก้านนิคแรงบิดด้วยวิธีปกติ ใบมีดจะกางออกเต็มที่เมื่อความเร็วรอบของต้นก้านมีอัตราเร็ว 800 rpm

ถึงประดิษฐ์ดังกล่าวอธิบายข้างต้นได้รับการจดสิทธิบัตรการประดิษฐ์ โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี: ชุดใบมีดควงแบบเป็นพวง เลขที่คำขอ 0701000718



รูปที่ 6.11 รูปลักษณะภายนอกของเครื่องสีฟืชผลทางการเกษตร  
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ เลขที่คำขอ 0701002473



รูปที่ 6.12 ส่วนประกอบภายในของเครื่องสับฟิชผลทางการเกษตร  
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ เลขที่คำขอ 0701002473

- **เครื่องสับพืชผลทางการเกษตรในขั้นตอนการสับ**

การข่อยผลผลิตทางการเกษตรด้วยวิธีการสับนั้น ใช้ใบมีดสำหรับสับใบรองสับ และปลอกจับยึดใบมีดสับ แนวคิดในการออกแบบนั้นจะให้มีการจับยึดใบมีดในลักษณะที่มีความอ่อนตัวต่อการปรับมุมใบมีด รวมทั้งปรับเปลี่ยนใบมีดได้ตามความเหมาะสมต่อการใช้งานในการสับวัตถุดิบที่เป็นพืชผลทางการเกษตรต่างชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในการออกแบบแต่ละชิ้นส่วนดังต่อไปนี้

ในรูปที่ 6.12 แสดงใบมีดสับ (e) ของการประดิษฐ์นี้ ได้รับการขึ้นรูปจากวัสดุเหล็กตะไบ มีปริมาณคาร์บอน 1% มีความแข็ง 65 HRC เป็นใบมีดชนิดไม่มีความคมและมีรูปลักษณะแบบสี่เหลี่ยมคางหมู ทั้งเมื่อมองจากด้านหน้าและเมื่อมองจากด้านบน ส่วนโคนของใบมีดสับเป็นส่วนใหญ่ที่ติดตั้งเข้ากับชิ้นส่วนยึดใบมีดใด ๆ โดยการยึดด้วยสลักเกลียวและแหวน ส่วนโคนของใบมีดสับจึงถูกเจาะเป็นรูกลม 2 รู ส่วนปลายใบมีดสับได้รับการขึ้นรูปให้มีลักษณะเรียวยาว ใบรองสับ (f) เป็นส่วนที่ใช้งานร่วมกับใบมีดสับ ทำหน้าที่พยุงและยึดวัสดุที่ถูกสับไว้หลวม ๆ พอเหมาะต่อการกดและสับตัวลงของใบมีดสับ ส่งผลให้เกิดการสับวัสดุที่พึงประสงค์ได้ตามความต้องการ ใบรองสับประกอบด้วยแผ่นใบรองสับและฐานใบรองสับ ส่วนประกอบทั้งสองชิ้นดังกล่าวทำจากเหล็กกล้าปลอดสนิมที่มีปริมาณคาร์บอนสูง และยึดติดกันด้วยการเชื่อม โครงรูปของแผ่นใบรองสับเป็นห้าเหลี่ยมไม่สมมาตร การติดตั้งใบรองสับดังกล่าวของงานวิจัยนี้เข้ากับโครงยึดติดใด ๆ ทำได้ง่าย โดยใช้สลักเกลียวหัวหกเหลี่ยมและแหวนจำนวนสองชุด ยึดติดด้านบนและด้านล่างของฐานใบรองสับผ่านทางรูกลมที่เจาะทะลุโครง ระยะห่างระหว่างใบรองสับแต่ละชุดสามารถกำหนดได้ตามความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้งาน และความเข้ากันได้กับรูปลักษณะของใบสับที่เลือกใช้

ในรูปที่ 6.12 แสดงปลอกยึดใบมีด (g) เป็นอุปกรณ์ยึดตรึงใบมีดสับเข้ากับเพลากลางใบมีด ในลักษณะที่มีความอ่อนตัวต่อการปรับมุมใบมีด รวมทั้งปรับเปลี่ยนใบมีดได้ตามความเหมาะสมต่อการใช้งานในการสับวัตถุดิบที่เป็นพืชผลทางการเกษตรต่างชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปลอกยึดใบมีดสับแบบปรับมุมในงานวิจัยนี้ มีชิ้นส่วนที่สำคัญเป็น ปลอกยึดใบมีดสับแบบปรับมุมได้ชุดแรก ปลอกยึดใบมีดสับแบบปรับมุมได้ชุดกลาง ปลอกยึดใบมีดสับแบบปรับมุมได้ชุดสุดท้าย และปลอกขันยึดชุดใบมีด

ปลอกยึดใบมีดสับแบบปรับมุมได้ชุดแรกมีส่วนประกอบเป็น ส่วนกลาง ปลอกยึดใบมีดชุดแรก ส่วนปีกยึดใบมีดด้านซ้ายและด้านขวาของปลอกยึดใบมีดชุดแรก ส่วนปีกที่กล่าวถึงทั้งสองนี้มีลักษณะเหมือนกันทุกประการ ปลอกยึดใบมีดสับแบบปรับมุมได้ชุดแรกดังกล่าว ต้องได้รับการกลึงขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนเดียวกันจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม รูปลักษณะของปลอกยึดใบมีดสับแบบปรับมุมได้ชุดแรกมีความสมมาตรกับทางซ้ายและขวาตลอดแนวยาวลำตัว

ผิวด้านหน้ามีการเจาะรูทรงกระบอกกลมแบบไม่ทะลุจำนวน 8 รู มีไว้สำหรับการสอดใส่สลักจำนวน 2 ชิ้น ที่สามารถเลือกตำแหน่งสอดสลักเพื่อการปรับมุมใบมีดสับได้ และมีรูทรงกระบอกกลมใหญ่แบบเจาะทะลุกลางปลอกยึดใบมีดสำหรับสอดเพลากลอนใบมีด ด้านบนของส่วนกลางปลอกยึดใบมีดชุดแรกมีการเจาะรูเล็กแบบทะลุผ่านสำหรับเป็นตำแหน่งสอดสลักเกลียวหัวเรียบเมื่อสอดสลักเกลียวหัวเรียบนี้ให้พอดีกับตำแหน่งรูเกลียวบนเพลากลอนใบมีด จะสามารถขันสลักเกลียวหัวเรียบนี้ให้ยึดเพลากลอนใบมีดได้อย่างแน่นหนา รูเกลียวนี้ได้รับการเจาะตามมาตรฐานรูเกลียว และสลักเกลียวหัวเรียบทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐานสลักเกลียว ส่วนสลักทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเช่นกัน ขึ้นรูปให้มีลักษณะทรงกระบอก โดยขอบด้านหัวและท้ายของสลักได้รับการปาดให้มน ส่วนปีกยึดใบมีดได้รับการขึ้นรูปให้มีรูเจาะ 2 รู และรูปลั๊กขณะพอดีรับกับการติดตั้งใบมีดสับ การยึดตรึงใบมีดสับเข้ากับส่วนปีกยึดใบมีดใช้สลักเกลียวหัวหกเหลี่ยมและแหวนที่พอดีกันสำหรับยึดสลักเกลียวหัวหกเหลี่ยมดังกล่าว

ปลอกยึดใบมีดสับแบบปรับมุมได้ชุดกลาง ทำหน้าที่ยึดใบมีดสับเช่นเดียวกับการใช้งานปลอกยึดใบมีดสับแบบปรับมุมได้ชุดแรกและยังมีรูปลั๊กขณะโดยทั่วไปทั้งภายนอกและภายในคล้ายคลึงกันกับรูปลั๊กขณะของปลอกยึดใบมีดสับแบบปรับมุมได้ชุดแรก ความคล้ายคลึงกันนั้นอาจสังเกตได้ว่า มีส่วนประกอบหลักเป็นส่วนกลางปลอกยึดใบมีดชุดกลาง ส่วนปีกยึดใบมีดด้านซ้าย และส่วนปีกยึดใบมีดด้านขวา รูปลั๊กขณะเชิงโครงสร้างภายนอกตลอดจนมิติต่าง ๆ เหมือนกันทุกประการกับปลอกยึดใบมีดสับแบบปรับมุมได้ชุดแรก ความแตกต่างกันมีอยู่ในส่วนที่เป็นส่วนกลางปลอกยึดใบมีดชุดกลางด้านบนนั้น ไม่มีการเจาะรูใด ๆ เลย ไม่ว่าจะในตำแหน่งใดของส่วนใดของผิวด้านบน นอกจากนั้นที่ผิวด้านหน้า และผิวด้านหลังของส่วนกลางของปลอกยึดใบมีดชุดกลางได้รับการเจาะเป็นรูทรงกระบอกกลมแบบไม่ทะลุ โดยเจาะเป็นจำนวนด้านละ 8 รู เท่า ๆ กัน ตำแหน่งของรูทรงกระบอกกลมแบบไม่ทะลุต่าง ๆ ทั้งสองด้านของผิวของส่วนกลางปลอกยึดใบมีดชุดกลางถูกจัดวางในรูปแบบเดียวกับการจัดให้ส่วนกลางปลอกยึดใบมีดชุดแรกตามการอธิบายรายละเอียดผ่านมาแล้วข้างต้น การเจาะทะลุเป็นรูทรงกระบอกกลมตลอดแนวยาวลำตัวของส่วนกลางปลอกยึดใบมีดชุดกลางมีเส้นผ่าศูนย์กลางการเจาะที่พอเหมาะสำหรับสอดใส่เพลากลางได้ ปลอกยึดใบมีดสับแบบปรับมุมได้ชุดกลางตามที่กล่าวถึงนี้ ต้องได้รับการกลึงขึ้นรูปเป็นชิ้นเดียวกันจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม

ปลอกยึดใบมีดสับแบบปรับมุมได้ชุดสุดท้าย ทำหน้าที่ยึดใบมีดสับเช่นเดียวกับการใช้งานปลอกยึดใบมีดสับชุดแรกและชุดกลางดังที่ได้อธิบายผ่านมาแล้ว อีกทั้งมีรูปลั๊กขณะภายนอกประกอบด้วยส่วนกลางปลอกยึดใบมีดชุดสุดท้าย ส่วนปีกยึดใบมีดด้านซ้าย และส่วนปีกยึดใบมีดด้านขวา การใช้งานเมื่อติดตั้งจะต้องสอดส่วนปลายของเพลากลอนใบมีดเข้ามาทางด้านหลังของปลอกยึดใบมีดสับแบบปรับมุมได้ชุดสุดท้ายจนสุด และขันยึดปลอก

ชั้นยึดชุดโบริมเข้าทางด้านหน้าของปลอกยึดโบริมที่กล่าวถึง จากนั้นใช้สลักเกลียวหัวเรียบ ชั้นยึดตรงชุดโบริมเข้ากับเพลากลไกโบริม ผ่านรูเล็กและรูเกลียว ส่วนกลางปลอกยึดโบริม ชุดสุดท้ายมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลม ขอบรอบนอกตามแนวเส้นรอบวงของส่วนกลางปลอกยึดโบริมดังกล่าวนี้ได้รับการปาดให้มน มีการเจาะรูทรงกระบอกกลมแบบไม่ทะลุ จำนวน 8 รู ในรูปแบบการดำเนินการเช่นเดียวกันกับการขึ้นรูปทรงกระบอกเหล่านี้สำหรับปลอกยึดโบริมแบบปรับมุมได้ชุดแรก และชุดกลาง จากผิวด้านหน้าเข้าไปภายในลำตัวของส่วนกลางปลอกยึดโบริมมีการเจาะรูทรงกระบอกที่ตีเกลียว โดยมีระยะเพื่อสำหรับรับส่วนปลายของปลอกชั้นยึดชุดโบริม และมีการเจาะรูทรงกระบอกกลมจากผิวด้านหลังเพื่อการสอดเพลากลไกโบริม

ชิ้นส่วนสำคัญอีกชิ้นหนึ่งของชุดโบริมแบบปรับมุมได้เป็นปลอกชั้นยึดชุดโบริม ชิ้นส่วนดังกล่าวนี้มีการขึ้นรูปเป็นเกลียว ซึ่งมีส่วนประกอบสองส่วน คือ ส่วนหัว และ ส่วนลำตัว ส่วนลำตัวต้องได้รับการตีเกลียวตัวผู้ตามมาตรฐาน ส่วนหัวมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลม ด้านบนและด้านล่างของส่วนหัวได้รับการเจาะรูเกลียว จุดศูนย์กลางของรูเกลียวแต่ละรูอยู่ห่างจากขอบด้านนอกของส่วนหัว กึ่งกลางตามแนวยาวลำตัวของปลอกชั้นยึดชุดโบริมได้รับการเจาะทะลุเป็นทรงกระบอกกลม สำหรับไว้สอดเพลากลไกโบริม เมื่อใช้งานปลอกชั้นยึดชุดโบริมต้องขันเข้าทางปลายด้านท้ายของเพลากลไกโบริม ตำแหน่งรูเกลียวบนส่วนหัวจะต้องอยู่ในตำแหน่งตรงกับรูเกลียวบนเพลากลไกโบริมพอดี เพื่อให้สอดสลักเกลียวหัวเรียบ และชั้นยึดได้อย่างแน่นหนา เพลากลไกโบริมนี้ต้องขึ้นรูปจากเหล็กเพลาค้ำหัวแดง ส่วนปลอกชั้นยึดชุดโบริมที่กล่าวถึงจะต้องขึ้นรูปด้วยการกลึงเป็นชิ้นเดียวกันจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม

เมื่อนำอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นมาประกอบติดตั้งเข้าด้วยกันลงบนเพลากลไกโบริม จะเกิดเป็นชุดโบริมแบบปรับมุมได้ ซึ่งปลอกยึดโบริมแบบปรับมุมได้ชุดแรก ชุดสุดท้าย และปลอกชั้นยึดชุดโบริม ใช้เพียงอย่างละ 1 ชิ้น ปลอกยึดโบริมแบบปรับมุมได้ชุดกลาง อาจเลือกใช้กี่ชิ้นก็ได้ตามความต้องการ สลักจำนวนมากใช้ในการเชื่อมโยงแบบอ่อนตัวให้ปรับมุมได้แก่ปลอกยึดโบริมแบบต่าง ๆ ในการปรับมุมโบริมเราใช้วิธีหมุนปลอกโบริมตามแนวคิดนี้ โดยสอดสลักลงในตำแหน่งที่เหมาะสม เมื่อประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ ขึ้นเป็นชุดโบริมแบบปรับมุมได้แล้วเสร็จ ปลายด้านหนึ่งของเพลากลไกโบริมซึ่งเป็นทางด้านหัวเพลากลไกจะต้องใช้เพื่อต่อคู่ควมเข้ากับแหล่งกำเนิดแรงบิด เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น

สิ่งประดิษฐ์ดังกล่าวอธิบายข้างต้นได้รับการจดสิทธิบัตรการประดิษฐ์ โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี: โบริมและกระบวนการขึ้นรูปโบริม เลขที่คำขอ 0701000717 ปลอกยึดโบริมแบบปรับมุมได้และชุดโบริมแบบปรับมุมได้ เลขที่คำขอ 0701000719 และโบริงลับ เลขที่คำขอ 0701000720

- **เครื่องสับพืชผลทางการเกษตรในขั้นตอนการเคลื่อน**

เมื่อต้องการย่อยพืชผลทางการเกษตรให้มีขนาดเล็กลงมาก ๆ เช่น การสับหัวมันสำปะหลังที่มีขนาดปกติ ให้เป็นชิ้นมันสำปะหลังชิ้นเล็ก ๆ ที่มีความยาวไม่เกิน 1 นิ้ว ไม่ว่าจะวัดทางด้านใด เครื่องจักรกลดังกล่าวจึงต้องการใบมีดที่มีความคมมากและมีขนาดพอเหมาะจำนวนมาก เป็นส่วนประกอบสำคัญส่วนหนึ่งของเครื่องจักรกล และในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงรูปลักษณะของการประกอบกันของใบมีดที่มีความคมจำนวนมากขึ้นเป็นชุดใบมีดสำหรับใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าว โดยแยกอธิบายเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นใบมีดเฉือน และส่วนที่เป็นชุดใบมีดเฉือน

รูปที่ 6.12 แสดงใบมีดเฉือน (b) ขึ้นรูปจากวัสดุเหล็กตะไบที่ผ่านการอบชุบให้แข็งและเหนียว บริเวณตอนกลางลำตัวของใบมีดเฉือนได้รับการขึ้นรูปให้มีความแบนเรียบและมีพื้นฐานเป็นหกเหลี่ยม จุดกึ่งกลางของหกเหลี่ยมเป็นจุดศูนย์กลางของรูเจาะทะลุใบมีด มีไว้เพื่อการสอดใบมีดเฉือนลงบนเพลลาแกนใบมีดเมื่อติดตั้งใช้งาน ใบมีดมีรูปลักษณะที่สมมาตรตามแนวซ้ายขวา ส่วนปลายใบมีดเฉือนต้องได้รับการเจียรให้มีความคมมาก ส่วนปลายสุดของใบมีดเฉือนได้รับการขึ้นรูปให้โค้งมน สันของใบมีดเฉือนช่วยทำให้ใบมีดเฉือนมีความแข็งแรง ส่วนปลายสุดของใบมีดเฉือน ช่วยเพิ่มความสามารถในการเฉือน ผิวด้านบนและด้านล่างของส่วนปลายใบมีดได้รับการขึ้นรูปให้มีลักษณะลาดเอียงประกบกันเป็นรูปลิ้ม โดยมีสันอยู่ตรงกลางตามแนวยาวของส่วนปลายใบมีดเพื่อเสริมความแข็งแรง ส่วนปลายใบมีดนี้เมื่อมองจากทางด้านข้างจะเห็นเป็นรูปข้าวหลามตัด

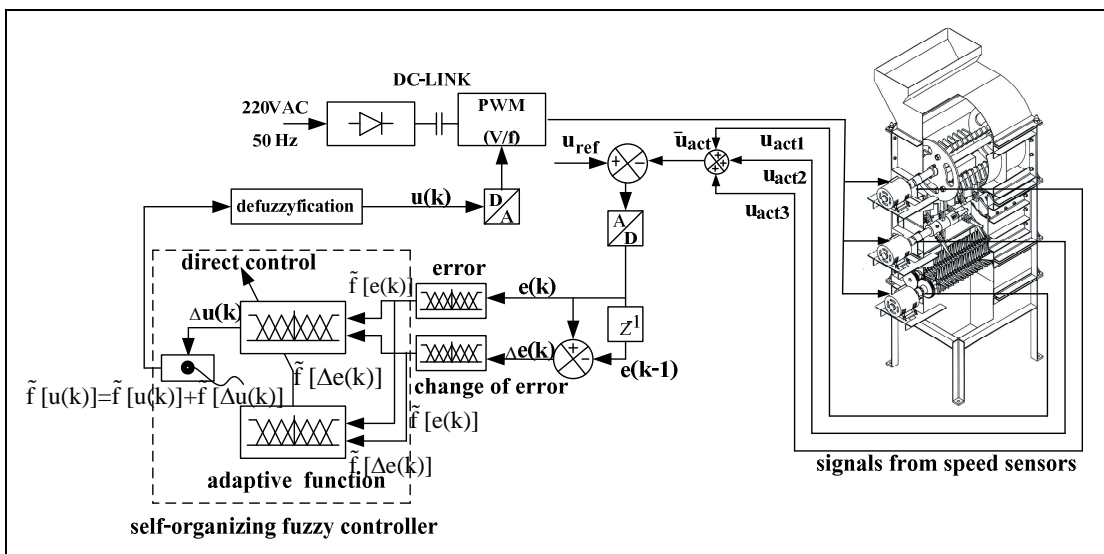
ชุดใบมีดเฉือน (i) ดังรูปที่ 6.12 ประกอบสร้างขึ้นจากใบมีดเฉือนจำนวนมาก ชุดใบมีดเฉือน มีเพลลาแกนใบมีดจำนวนสองแกนที่ติดตั้งใบมีดเฉือนไว้แล้ว การติดตั้งใบมีดเฉือนลงบนเพลลาแกนใบมีดเดียวกันนั้นต้องติดตั้งให้ใบมีดเฉือนวางตัวตั้งได้ฉากสลับกันไป โดยใช้ปลอกคั่นใบมีดที่ทำจากทองเหลืองเป็นอุปกรณ์คั่นและกำหนดระยะห่างของใบมีดเฉือนแต่ละใบ การกำหนดระยะห่างนี้ไม่ตายตัว ขึ้นอยู่กับความต้องการในการสับย่อยวัสดุ ใบมีดเฉือนที่ติดตั้งลงบนเพลลาแกนใบมีดอีกแกนหนึ่งนั้นดำเนินการติดตั้งแบบเดียวกับที่ได้อธิบายผ่านมา แต่จะต้องจัดใบมีดเฉือนให้มีตำแหน่งสับหว่างกับใบมีดเฉือนที่ติดตั้งบนเพลลาแกนใบมีดแกนแรกที่กำลังกล่าวถึงที่ปลายทั้งสองด้านของเพลลาแกนใบมีดทั้งสองแกนจะต้องมีร่องเพลลา ระหว่างใบมีดเฉือนกับร่องเพลลาจะต้องมีปลอกคั่นที่ทำจากทองเหลืองเช่นกัน ถัดมาจากร่องเพลลาทั้งสองชุดทางด้านซ้ายของเพลลาแกนใบมีดมีการติดตั้งเฟืองแบบธรรมดา โดยที่เมื่อเพลลาหนึ่งหมุนอีกเพลลาหนึ่งจะหมุนสวนทางกันตลอดเวลา อัตราทดเฟืองนั้นเป็นไปตามความต้องการในอัตราเร็วรอบของการหมุนเพลลาแกนใบมีดแกนหนึ่งของสองแกน จะต้องมีหัวเพลลาที่ประกบกับเฟือง ได้รับการขึ้นรูปตามมาตรฐานทั่วไป เพื่อการยึดเข้ากับเพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแรงบิด



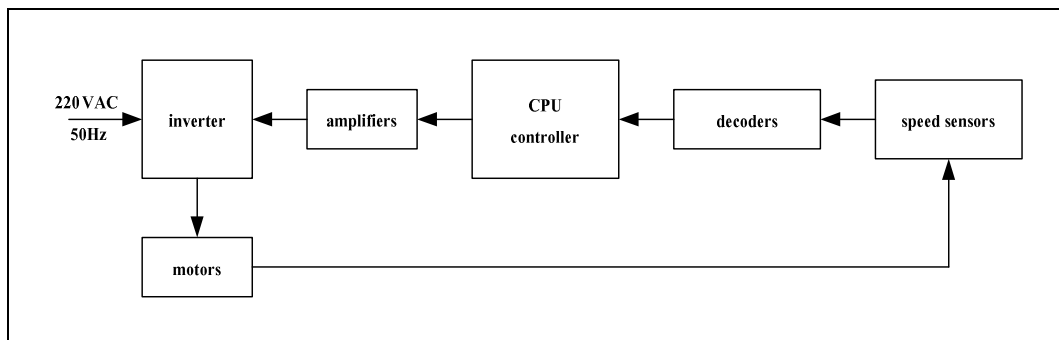
สิ่งประดิษฐ์ดังกล่าวอธิบายข้างต้นได้รับการจดสิทธิบัตรการประดิษฐ์ โดย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี: ใบมีดเดือน เลขที่คำขอ 0701001328

### 6.3 ระบบควบคุม

งานวิจัยนี้ได้ตั้งต้นจากการศึกษาลักษณะสมบัติของระบบขับเคลื่อนที่ใช้อินเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน การออกแบบพิกัดของอินเวอร์เตอร์พิจารณาเฉพาะขนาดของมอเตอร์เพียงอย่างเดียวไม่ได้ แต่จะต้องพิจารณาถึงลักษณะสมบัติของโหลด วิธีและสภาพการเดินเครื่องด้วย เพราะเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ขับมอเตอร์ในย่านอัตราเร็วต่ำ การควบคุม V/f จะทำให้ได้แรงบิดน้อยลงกว่าการต่อมอเตอร์กับแหล่งจ่ายโดยตรง แต่วิธีการควบคุมนี้สามารถนำมาควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ได้พร้อม ๆ กันหลายตัว แผนภาพผังรูปที่ 6.13 แสดงส่วนประกอบหลักสามส่วน กล่าวคือ ส่วนของพลานต์ที่ถูกควบคุม ส่วนตัวควบคุม และส่วนแปลงผันพลังงาน ในส่วนแปลงผันพลังงานซึ่งเป็นอินเวอร์เตอร์ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้อินเวอร์เตอร์ขนาด 3.7 kw 17 A รับคำสั่งการทำงานจากส่วนตัวควบคุม ซึ่งตัวควบคุมประกอบด้วยตัวประมวลผล (ARM 7024) ที่ถูกโปรแกรมให้เป็นตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเอง (self-organizing fuzzy controller) รับสัญญาณป้อนกลับจากตัวตรวจรู้อัตราเร็วผ่านทางตัวแปลงสัญญาณ A/D ตัวตรวจรู้อัตราเร็วเป็นแบบสะท้อนแสงอ่านแถบรหัส ติดตั้งอยู่บริเวณส่วนต่อขยายของเฟลามาอเตอร์ 3 ตัว ซึ่งต่อขนานกันรับไฟสลับ 220 V 50 Hz เพื่อขับใบมีดทั้ง 3 ชุดของเครื่องจักร



รูปที่ 6.13 โครงสร้างของระบบควบคุมเครื่องสับพีชผลทางการเกษตร

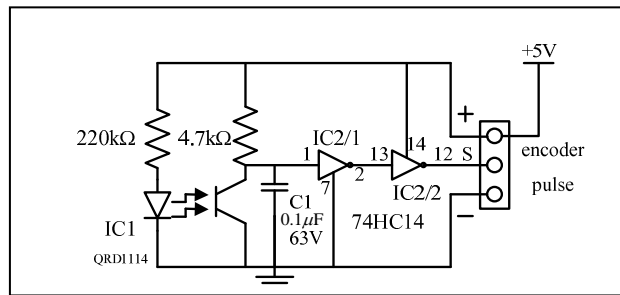


รูปที่ 6.14 แผนภาพบล็อกแทนฮาร์ดแวร์โดยรวมของระบบ

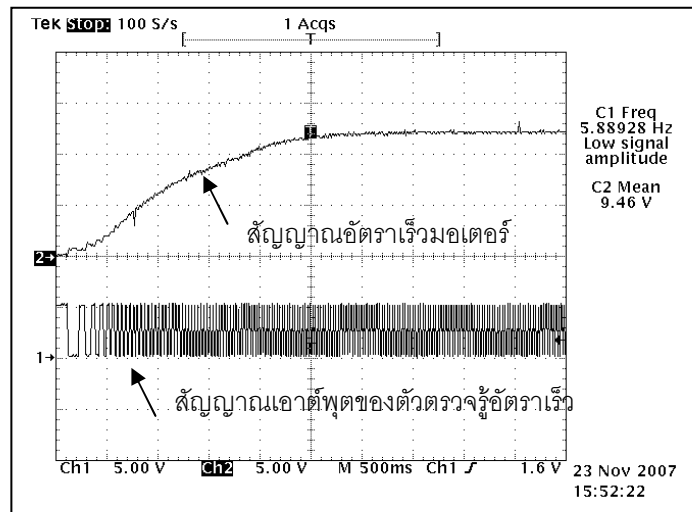
ระบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อทดสอบแนวคิดและหลักการของการวิจัยนี้ มีโครงสร้างระบบโดยรวมดังแผนภาพบล็อกในรูปที่ 6.14 ประกอบด้วยวงจรตัวตรวจรู้อัตราเร็ว วงจรถอดรหัส ตัวตรวจรู้อัตราเร็ว ตัวประมวลผลระบบควบคุม วงจรขยายสัญญาณ อินเวอร์เตอร์ และมอเตอร์

### 6.3.1 วงจรตัวตรวจรู้อัตราเร็ว

ในการควบคุมอัตราเร็วของมอเตอร์ ได้ใช้ตัวตรวจรู้อัตราเร็วในการป้อนกลับสัญญาณ ข้อมูลอัตราเร็วรอบมอเตอร์ที่วัดได้ถูกส่งไปยังเครื่องบันทึกข้อมูลด้วย เพื่อทำการบันทึกข้อมูลอัตราเร็วรอบของมอเตอร์ทุก ๆ 0.16 วินาที วงจรของตัวตรวจรู้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.15 วงจรดังกล่าวต้องใช้ไฟเลี้ยง +15 V มีส่วนรับและส่งแสงไปกระทบกับแถบรหัสที่ติดตั้งบนส่วนต่อขยายของเพลลา สัญญาณที่ได้มีลักษณะเป็นพัลส์ มีจำนวนลูกคลื่นแปรตามอัตราเร็วของมอเตอร์ แถบรหัสที่ใช้มีสีขาวสลับกับสีดำอย่างละ 10 แถบ แสงอินฟราเรดที่ส่งออกมาจากโฟโตทรานซิสเตอร์ IC1 QRD1114 จะสะท้อนกับแถบสี หากแสงกระทบกับแถบสีดำ แสงสะท้อนที่โฟโตทรานซิสเตอร์รับได้จะน้อย ทำให้เกิดลอจิก “1” ส่งไปยังส่วนจัดการสัญญาณดิจิทัล ซึ่งประกอบด้วยนอตเกต IC2/1 และ IC2/2 74HC14 แต่ถ้าสะท้อนกับแถบสีขาวจะเกิดการสะท้อนแสงมาก โฟโตทรานซิสเตอร์ทำงานได้ดีส่งผลให้เกิดลอจิก “0” เมื่อแกนเพลลามอเตอร์หมุน แถบรหัสสีก็จะหมุนเกิดการสะท้อนแสงสลับกันไปเรื่อย ๆ สัญญาณที่ได้จึงมีลักษณะเป็นสัญญาณขบวนพัลส์ (รูปที่ 6.16) ซึ่งถูกส่งไปยังอุปกรณ์ถอดรหัสตัวตรวจรู้อีกต่อหนึ่ง ผ่านสายนำสัญญาณ ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 6.15 วงจรตัวตรวจรู้อัตราเร็ว



รูปที่ 6.16 รูปคลื่นสัญญาณอัตราเร็วมอเตอร์และเอาต์พุตของตัวตรวจรู้อัตราเร็ว

### 6.3.2 วงจรถอดรหัสตัวตรวจรู้อัตราเร็ว

วงจรถอดรหัสดังแสดงในรูปที่ 6.17 มีทั้งหมด 3 ชุด แต่ละชุดถอดรหัสสัญญาณที่ได้จากมอเตอร์แต่ละตัว วงจรดังกล่าวใช้ไฟเลี้ยง +15 V พร้อมทั้งวงจรรักษาระดับแรงดันเป็นแหล่งจ่ายกำลังให้แก่วงจร เมื่อสัญญาณขบวนพัลส์ที่ได้รับมาจากวงจรตัวตรวจรู้อัตราเร็วในหัวข้อที่ผ่านมา สัญญาณขบวนพัลส์ที่ได้มีความถี่สัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับอัตราเร็วรอบของมอเตอร์ ก่อนที่สัญญาณจะเข้าสู่ตัวประมวลผลระบบควบคุม ต้องแปลงหรือถอดรหัสสัญญาณความถี่ดังกล่าวให้มีค่าเป็นระดับแรงดัน ที่มีขนาดไม่เกิน 2.5 V ตามพิกัดทางด้านอินพุตของตัวประมวลผลแรงดันเอาต์พุตของวงจรตามรูปที่ 6.17 ขึ้นอยู่กับความถี่ ( $f_{in}$ ) ของสัญญาณอินพุตสัมพันธ์กับขนาดของความต้านทานและตัวเก็บประจุตามสมการ 6.2 (Robert, 1995)

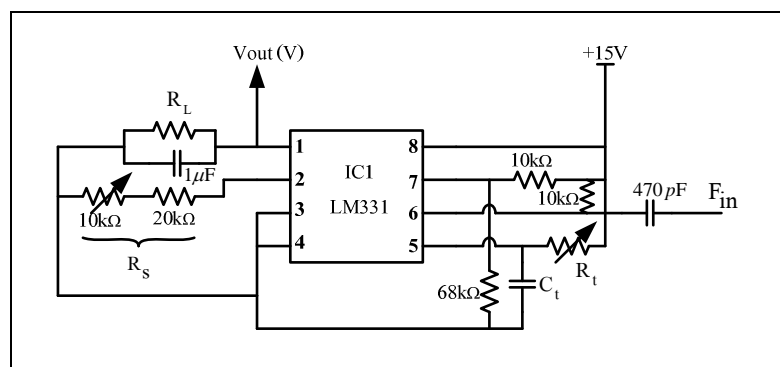
$$V_{out} = f_{in} \times 2.09 \times \frac{R_L}{R_S} \times (R_t \times C_t) \quad (6.2)$$

โดยมีคำอธิบายถึงความต้องการระดับแรงดันสัมพันธ์กับอัตราเร็ว ดังต่อไปนี้

- ถ้าวางจรอครหัสสี่ให้ระดับแรงดันออกมา 2.5 V อัตราเร็วรอบมอเตอร์ที่กำลังหมุนขณะนั้นคือ 1500 รอบต่อนาที และ

- ถ้าวางจรให้ระดับแรงดันออกมา 2.0 V อัตราเร็วรอบมอเตอร์ที่กำลังหมุนขณะนั้นคือ 1200 รอบต่อนาที

เมื่อพิจารณาความต้องการข้างต้นกับความสัมพันธ์ตามสมการ 6.2 เพื่อการออกแบบวงจร สามารถออกแบบวงจรให้มี  $R_S=30 \text{ k}\Omega$   $R_L=100 \text{ k}\Omega$   $R_t=5 \text{ k}\Omega$  และ  $C_t=1 \mu\text{F}$  ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและอัตราเร็วดังกล่าวเป็นแบบต่อเนื่องและเป็นเชิงเส้น อย่างไรก็ตาม สัญญาณที่ได้มีสัญญาณรบกวนปนเข้ามาด้วย เนื่องจากสายนำสัญญาณไม่มีการหุ้มฉนวนและเครื่องจักรมีการสั่นอยู่ตลอดเวลาขณะทำงาน ทำให้ตัวตรวจรู้เกิดการสั่นไหว ค่าที่ได้จึงอาจมีความคลาดเคลื่อนบางส่วน อาจแก้ไขได้ด้วยการใช้ตัวตรวจรู้ที่มีอุปกรณ์เก็บและหน่วยข้อมูลก่อนส่งสัญญาณไปที่ตัวอครหัส ซึ่งอาจมีราคาแพง เหมาะกับงานในภาคอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ แต่ในงานวิจัยนี้สัญญาณจากตัวตรวจรู้อัตราเร็วทั้ง 3 ชุด จะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วย ADC ขนาด 12 bit ที่มีอยู่ภายใน ET-BASE ARM7024 ก่อนเข้าสู่ตัวประมวลผล MCU ADUC7024 การทำงานของ ADC ที่มีธรรมชาติเป็นตัวกรองต่ำผ่านอยู่แล้ว สามารถช่วยลดทอนสัญญาณรบกวนจากการวัดอัตราเร็วรอบได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 6.17 วงจรอครหัสสี่ตัวตรวจรู้อัตราเร็ว

### 6.3.3 ตัวประมวลผลระบบควบคุม

สัญญาณที่ได้จากวงจรถอดรหัสทั้ง 3 ชุด จะถูกส่งมายังตัวควบคุมพีซีซีแบบจัดการตัวเองผ่านสายส่งสัญญาณ ตัวควบคุมพีซีซีแบบจัดการตัวเองประกอบไปด้วย บอร์ด ET-BASE ARM7024 ที่มี ADUC7024 เป็นตัวประมวลผล สัญญาณจากตัวตรวจรู้ทั้ง 3 ชุด จะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วย ADC ขนาด 12 bit ที่มีอยู่ในชิป ADUC7024 ก่อนเข้าสู่ตัวประมวลผล MCU ADUC7024 สัญญาณที่ได้จากตัวประมวลผลจะถูกแปลงกลับเป็นสัญญาณแอนะล็อก โดย DAC ขนาด 12 bit ที่มีอยู่ในชิป ADUC7024 เพื่อส่งออกไปควบคุมอินเวอร์เตอร์ ระดับแรงดันที่ออกจากบอร์ด ET-BASE ARM7024 มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 2.5 V ซึ่งมีความหมาย คือ เมื่อระดับแรงดันมีค่า 0 อัตราเร็วมอเตอร์ที่ถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์มีค่าเป็น 0 rpm แต่ถ้าระดับแรงดันมีค่า 2.5 V มอเตอร์จะถูกควบคุมให้มีอัตราเร็ว 1500 rpm

ET-BASE ARM7024 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล ARM7 ขนาด 64 Pin ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ ADUC7024 ของ Analog Device เป็น MCU ประจําบอร์ด บรรจุอยู่ในตัวถังแบบ 64 Pin LQFP โดย MCU ตัวนี้มีความสามารถในการเชื่อมต่อกับสัญญาณแบบแอนะล็อกซึ่งมีทั้ง ADC ขนาด 12 bit จำนวน 10 ช่องสัญญาณ และ DAC ขนาด 12 bit จำนวน 2 ช่องสัญญาณ สามารถทำงานได้ด้วยความถี่สูงสุด 41.78 MHz โดยใช้ XTAL 32.768 kHz ร่วมกับวงจรถูกความถี่แบบล็อกเฟสภายในตัว MCU นอกจากนี้แล้วยังมีหน่วยความจำแบบแฟลช ขนาด 62 kB และหน่วยความจำใช้งานแบบ RAM ขนาด 8 kB โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จะได้กล่าวในหัวข้อที่ 6.4 ถูกแปลงเป็น hex file ด้วยโปรแกรม Keil uVision3 ซึ่งแสดงรายละเอียดโปรแกรมไว้ในภาคผนวก ข. หลังจากนั้นจะต้องทำการดาวน์โหลดไฟล์ให้กับหน่วยความจำของ MCU ในบอร์ด ขั้นตอนนี้จะใช้โปรแกรมชื่อ“ARMWSD” ของ Analog Device ซึ่งจะติดต่อกับ MCU ผ่านพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ โปรแกรม ARMWSD (ARM Windows Serial Download) เป็นโปรแกรมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM ของ Analog Device โดยสามารถใช้สนับสนุนการพัฒนาโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล ARM7 ที่ผลิตโดย Analog Device ได้หลายเบอร์ รวมถึง ADUC7024 ด้วย โปรแกรมจะทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการของ Windows9X/Me/NT/2000 และ Windows XP สนับสนุนการเชื่อมต่อกับระบบฮาร์ดแวร์ RS232

### 6.3.4 วงจรขยายสัญญาณ

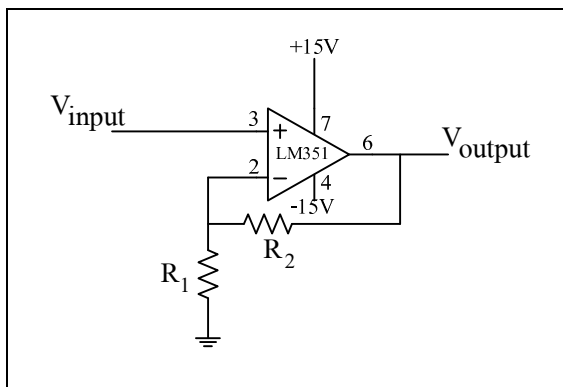
สัญญาณที่ได้ออกมาจาก ADC ของบอร์ด ET-BASE ARM7024 จะมีขนาด 0-2.5 V แต่ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไปจะต้องใช้ระดับแรงดัน 0-5 V จึงต้องทำการปรับความชันสัญญาณให้เป็น 0-5 V ก่อนเข้าอินเวอร์เตอร์ โดยใช้วงจรในรูปที่ 6.18 เป็นวงจรปรับความชันหรือวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส ในการวิจัยนี้ต้องทำการขยายสัญญาณให้เป็น 2 เท่า ของระดับแรงดันอินพุต มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับแรงดันอินพุตแสดงได้ด้วยสมการที่ 6.3

$$V_{\text{output}} = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{\text{input}} \quad (6.3)$$

ระดับแรงดันที่ออกมาที่มีความหมายดังนี้

- ถ้าสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรปรับความชันมีระดับแรงดัน 5 V อินเวอร์เตอร์จะสวิทซ์ที่ความถี่ 50 Hz
- ถ้าสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรปรับความชันมีระดับแรงดัน 4 V อินเวอร์เตอร์จะสวิทซ์ที่ความถี่ 40 Hz

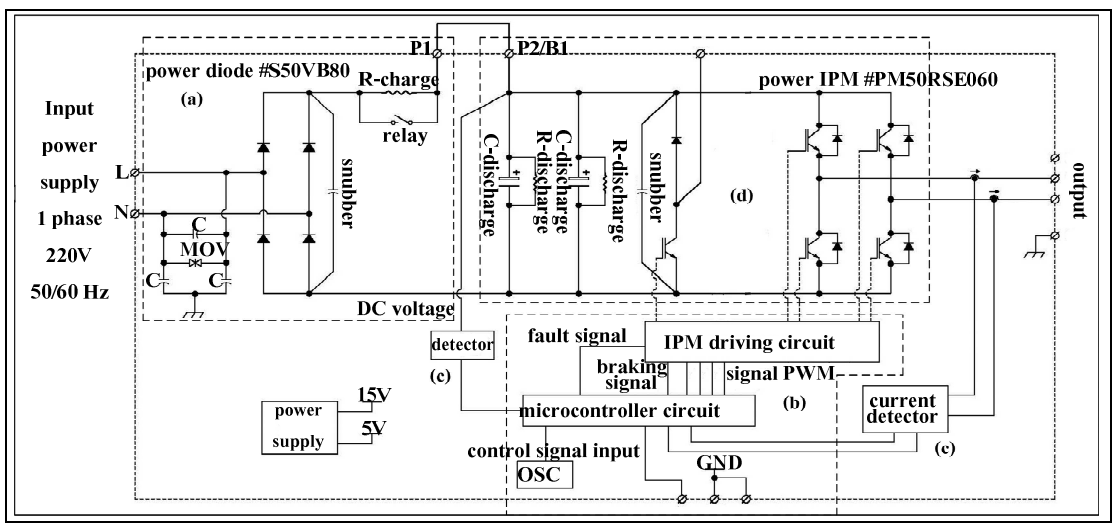
ความถี่ดังกล่าวสัมพันธ์กับอัตราเร็วรอบมอเตอร์ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วก่อนหน้านี้ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความถี่มีรูปแบบต่อเนื่องเชิงเส้น ในย่านของการใช้งานของการวิจัยนี้ สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรปรับความชันเป็นสัญญาณที่ควบคุมอินเวอร์เตอร์สำหรับการขับมอเตอร์



รูปที่ 6.18 วงจรขยายสัญญาณ (ปรับความชัน)

### 6.3.5 อินเวอร์เตอร์

เมื่อสัญญาณการควบคุมจากตัวควบคุมถูกขยายให้มีขนาดเป็น 2 เท่า ด้วยวงจรปรับความชันแล้ว จะถูกส่งมาควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 6.19 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่าย 220 V 50 Hz แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับถูกแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยวงจรคอนเวอร์เตอร์ จากนั้นไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าวจะถูกแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถแปรขนาดแรงดันและความถี่ได้โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรทั้งสองส่วนนี้เป็นวงจรหลักที่ทำหน้าที่แปลงรูปคลื่นและส่งผ่านพลังงานของอินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้ยังมีวงจรควบคุมการทำงานของทั้งสองส่วน ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้อินเวอร์เตอร์ของบริษัท APY ENGINEERING รุ่น Frecon F005i-2x ขนาดพิกัด 220 V 5 HP 3.7 kW 17 A ที่ใช้ขั้วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว พิกัด 220 V 1 HP 5.2 A ที่ต่อขนานกัน 3 ตัว รูปที่ 6.19 แสดงโครงสร้างภายในของอินเวอร์เตอร์ ประกอบด้วย วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (a) ตัวประมวลผลและสร้างสัญญาณขับนำ (b) อุปกรณ์ป้องกันกระแสและแรงดันเกิน (c) ตัว IPM50RSE060 ทำหน้าที่เป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์แปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (d) ที่มีขนาดแรงดันและความถี่สำหรับจ่ายให้มอเตอร์สอดคล้องกับสัญญาณควบคุม



รูปที่ 6.19 โครงสร้างภายในของอินเวอร์เตอร์ รุ่น Frecon F005i-2x  
ขนาดพิกัด 5 HP 3.7 kW 17 A

#### 6.4 โปรแกรมประมวลผลระบบควบคุมด้วยตัวควบคุมพีซีแบบจัดการตัวเอง

ในการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์เฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัวด้วยอินเวอร์เตอร์เพียงชุดเดียว ด้วยตัวควบคุมพีซีแบบจัดการตัวเองในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ อาศัยโปรแกรมและตารางพีซีที่ถูกเขียนลงบอร์ด ET-BASE ARM7024 โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมี 2 ส่วนใหญ่ ๆ ด้วยกัน กล่าวคือ ส่วนของโปรแกรมควบคุมพีซีแบบจัดการตัวเอง และโปรแกรมสำหรับควบคุมการแปลงและรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ภายนอก ในส่วนของโปรแกรมควบคุมพีซีแบบจัดการตัวเอง แบ่งออกเป็นโปรแกรมหลักสำหรับประกาศตัวแปรและกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 6.20 ส่วนของการรับค่าจากตัวตรวจรู้มาดำเนินการทางพีซีพีเคชันแสดงได้ด้วยรูปที่ 6.21 ส่วนของโปรแกรมประมวลผลด้วยกระบวนการทางพีซีแบบจัดการตัวเองแสดงได้ด้วยรูปที่ 6.22 ส่วนของโปรแกรมการเปิดตาราง (lookup table) พีซีเพื่อใช้ในการคำนวณแสดงได้ด้วยรูปที่ 6.23 และส่วนของตารางพีซีแบบจัดการตัวเองแสดงได้ด้วยรูปที่ 6.24

ในส่วน โปรแกรมที่เกี่ยวกับการเชื่อมต่อกับภายนอกประกอบไปด้วย โปรแกรมส่วนของการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแสดงได้ด้วยรูปที่ 6.25 ส่วนของการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกแสดงได้ด้วยรูปที่ 6.26 และส่วนสุดท้ายแสดงได้ด้วยรูปที่ 6.27 คือส่วนของโปรแกรมรับและส่งข้อมูลผ่านทางพอร์ตอนุกรม RS232 โดยอาศัย UART ซึ่งโดยทั่วไปมีใช้งานกันอยู่ 2 เบอร์ คือ 8250 และ 16450 ในงานนี้ใช้เบอร์ 16450 เนื่องจากมีความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่สูงกว่า มีรีจิสเตอร์สำหรับพักข้อมูล และมีฟิร็วรีจิสเตอร์แบบ FIFO (first in first out) ขนาด 16 B ทำให้สามารถสนับสนุนความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่ 256 kB/s



```

//=====
//Self Organizing fuzzy controller
// Program For "ET BASE ARM ADuC7024" Board
// Target MCU : Analog Device ADuC7024
// : X TAL : 32.768 KHz
// : Run Speed 41.78 MHz (With PLL)
// : Select CD:CPU Clock Divider = 0
// Keil Editor : uVision3 V3.03a
// Compiler : Keil CARM V2.50a
//=====

int main(void)
{
    Initial_Serial();
    Initial_ADC();
    Initial_DAC();
    printf(" CM Fuzzy Control '\n\0"); // Call printf F unction

    New_Start:
    V_Oper = 4.0;
    DAC_Out = (V_Oper / 2.0) * 4096 / 2.5; // Scale to 0FFFxxxx
    DAC0DAT = ((int)DAC_Out)<<16; // ADUc = 32 bit Data is
    // DDDDxxxx

    Wait_Start:
    sMotor0 = 2.0 * ADC_Read(2); Fuzzy Input 5.0V
    printf("Wait Start to 1200 rpm '\n");
    Delay(500000);
    if (sMotor0>=4.0) goto Wait_Start;

    while(1) // Loop Continue
    {
        sMotor0 = 2.0 * ADC_Read(2); Fuzzy Input 5.0V
        sMotor1 = 2.0 * ADC_Read(4);
        sMotor2 = 2.0 * ADC_Read(6);
        //if (sMotor0<0.5) goto New_Start;
        V_Oper = Chopping_Machine_Fuzzy(sMotor0,sMotor1,sMotor2);
        DAC_Out = (V_Oper / 2.0) * 4096 / 2.5; // Scale to 0FFFxxxx
        DAC0DAT = ((int)DAC_Out)<<16; // ADUc = 32 bit Data is
        DDDDxxxx printf(" #Vi:%6.4f,%6.4f,%6.4f",sMotor0,sMotor1,sMotor2);
        printf(" #Vo:%6.4f(%4.2f)\n",V_Oper,V_Oper/2.0);
        Delay(500000);
    }

#define EN_DECODE_TB_ROWS 16
#define EN_DECODE_TB_COLS 11
#define FUZ_SET_TB_ROWS 12
#define FUZ_SET_TB_COLS 12
#define Hold_Speed 4.0
#define Fuzzy_Gain 0.5 // Range [0.1 to 1 0.0]

#include "ADuC7042_SrLc"
#include "ADuC7042_ADC.c"
#include "ADuC7042_DAC.c"
#include "CM_Fuzzy.c"
    double Chopping_Machine_Fuzzy(double speed_motor0,
        double speed_motor1,
        double speed_motor2);
}

```

รูปที่ 6.20 ส่วนของโปรแกรมหลักสำหรับกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

```

//=====
double fuzzy_error(double error)
{
    return enfuzzy(error) * 10.0;
}

//=====
double fuzzy_change_in_error(double error)
{
    return enfuzzy(error) * 100.0;
}

//=====
double fuzzy( const double fuzzy_table[FUZ_SET_TB_ROWS]
[FUZ_SET_TB_COLS],
double f1,double f2)
{
    int i, j;
    double lower, upper;

    // printf("\n\n Print Test Data in Fuzzy Table ");
    for (i=0; i<=FUZ_SET_TB_ROWS_1; i++)
    // { printf("\nRow %d >",i);
    // for (j=0; j<=FUZ_SET_TB_COLS_1; j++)
    // printf("%7.3f",fuzzy_table[i][j]);
    // }

    //==== check f2 =====
    if (f2 <= ((fuzzy_table[1][0] + fuzzy_table[2][0]) / 2.0))
    {
        i = 1;
    }

    else if (f2 > ((fuzzy_table[FUZ_SET_TB_ROWS_1][0] +
fuzzy_table[FUZ_SE_TB_ROWS_2][0]) / 2.0))
    {
        i = FUZ_SET_TB_ROWS_1;
    }

    else
    {
        for (i = 2; i < FUZ_SET_TB_ROWS_1; i++)
        {
            lower = (fuzzy_table[i][0] + fuzzy_table[i+1][0]) / 2.0;
            upper = (fuzzy_table[i][0] + fuzzy_table[i+1][0]) / 2.0;
            if ((lower < f2) && (f2 <= upper))
                break;
        }
    }

    //==== check f1 =====
    if (f1 <= ((fuzzy_table[0][1] + fuzzy_table[0][2]) / 2.0))
    {
        j = 1;
    }

    else if (f1 > ((fuzzy_table[0][FUZ_SET_TB_COLS_1] +
fuzzy_table[0][FUZ_SET_TB_COLS_2]) / 2.0))
    {
        j = FUZ_SET_TB_COLS_1 - 1;
    }

    else
    {
        for (j = 2; j < FUZ_SET_TB_COLS_1; j++)
        {
            lower = (fuzzy_table[0][j] + fuzzy_table[0][j+1]) / 2.0;
            upper = (fuzzy_table[0][j] + fuzzy_table[0][j+1]) / 2.0;
            if ((lower < f1) && (f1 <= upper))
                break;
        }
    }

    return fuzzy_table[i][j];
}

```

รูปที่ 6.21 โปรแกรมส่วนของการรับค่าจากตัวตรวจรู้เข้ามาดำเนินการทางฟัซซี่

```

// Fuzzy Control for Chopping Machine Process
//=====
double Chopping_Machine_Fuzzy( double speed_motor0,
                               double speed_motor1,
                               double speed_motor2 )
{
    double speed_error0 = 0.0;
    double error_first0 = 0.0;
    double V_Oper = 0.0;
    double speed_motor_all, control_signal, Vcon;
    double a1, a2, speed_error1, error_first1;

    speed_motor_all = (speed_motor0 + speed_motor1
+ speed_motor2) / 3.0;
    speed_error1 = (speed_motor_all - Hold_Speed )
/ Hold_Speed;

    a1 = fuzzy_error(speed_error1);
    a2 = fuzzy_change_in_error((speed_error1 - speed_error0));
    //printf("a1,a0:%7.4f,%7.4f ",a1,a2);

    speed_error0 = speed_error1;
    error_first1 = f1_and_f2(a1, a2);
    //printf("Er_1st1:%7.4f ",error_first1);

    control_signal = f1_and_f2_self(error_first1, (error_first1-error_first0));
    //printf("Ctrl_Sgn:%7.4f ",control_signal);

    error_first0 = error_first1;
    Vcon = defuzzy(control_signal);
    printf("#DeFz:%7.4f",Vcon);

    V_Oper = Hold_Speed - ( Vcon * Fuzzy_Gain / 10.0 );
    return V_Oper;
}

```

รูปที่ 6.22 โปรแกรมส่วนของกระบวนการฟัซซีแบบจัดการตัวเอง

```

//=== Look Table For Print out Test Decode Fuzzy Table ===
// printf("\n\n Look Table For Print out Test Decode fuzzy Table ");
// for (i=0;i<=EN_DECODE_TB_ROWS-1;i++)
// {
//     printf("\nRow %d >",i);
//     for (j=0;j<=EN_DECODE_TB_COLS-1;j++)
//         printf("%7.3f,",error_table[i][j]);
// }

if (error<error_table[0][0])
{
    i = 0;
}
else if (error >= error_table[EN_DECODE_TB_ROWS-1][0])
{
    i = EN_DECODE_TB_ROWS-1;
}
else
{
    for (i=1; i<EN_DECODE_TB_ROWS-1; i++)
    {
        if ((error_table[i-1][0]<=error)&&(error<error_table[i][0]))
            break;
    }
}

// Calculate F when F = Num/Den
// Num = (H_1 * C_1) + (H_2 * C_2) + (H_3 * C_3) +
(H_4 * C_4) + (H_5 * C_5)
// Den = (H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5)
num = 0;
den = 0;
for (j=1; j<EN_DECODE_TB_COLS-1; j+=2)
{
    num += (error_table[i][j] * error_table[i][j+1]);
    den += error_table[i][j];
}

return (num / den);
}

//=== Look Table For Print out Test Encode Fuzzy Table ===
// printf("\n\n Look Table For Print out Test Encode fuzzy Table ");
// for (i=0;i<=EN_DECODE_TB_ROWS-1;i++)
// {
//     printf("\nRow %d >",i);
//     for (j=0;j<=EN_DECODE_TB_COLS-1;j++)
//         printf("%7.3f,",cs_table[i][j]);
// }

if (cs < cs_table[0][0])
{
    i = 0;
}
else if (cs >= cs_table[EN_DECODE_TB_ROWS-1][0])
{
    i = EN_DECODE_TB_ROWS-1;
}
else
{
    for (i=1; i<EN_DECODE_TB_ROWS-1; i++)
    {
        if ((cs_table[i-1][0] <= cs) && (cs < cs_table[i][0]))
            break;
    }
}

// Calculate Fcon when Fcon = Num/Den
// Num = (Hcon_1 * Ccon_1) + (Hcon_2 * Ccon_2) +
(Hcon_3 * Ccon_3)
// + (Hcon_4 * Ccon_4) + (Hcon_5 * Ccon_5)
// Den = (Hcon_1 + Hcon_2 + Hcon_3 + Hcon_4 + Hcon_5);
num = 0;
den = 0;
for (j=1; j < EN_DECODE_TB_COLS-1; j += 2)
{
    num += (cs_table[i][j] * cs_table[i][j+1]);
    den += cs_table[i][j];
}

return (num / den);
}

```

รูปที่ 6.23 โปรแกรมส่วนของการเปิดตารางฟัซซีเพื่อใช้ในการคำนวณค่าการควบคุม

```

//-----*/
double f1_and_f2(double f1, double f2)
{
    const double fuzzy_table[FUZ_SET_TB_ROWS][FUZ_SET_TB_COLS] = {
        // F2 \ F1
        {9999, -1, -0.8, -0.6, -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1},
        {-1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0},
        {-0.8, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0},
        {-0.6, 1, 1, 1, 1, 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0, -0.1, -0.3},
        {-0.4, 1, 1, 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0, -0.1, -0.3, -0.6},
        {-0.2, 1, 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8},
        {0, 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8, -1},
        {0.2, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8, -1, -1},
        {0.4, 0.6, 0.3, 0.1, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8, -1, -1, -1},
        {0.6, 0.3, 0.1, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8, -1, -1, -1, -1},
        {0.8, 0.1, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8, -1, -1, -1, -1, -1},
        {1, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8, -1, -1, -1, -1, -1, -1});
    return fuzzy(fuzzy_table, f1, f2);
}

//-----*/
double f1_and_f2_self(double f1, double f2)
{
    const double fuzzy_table[FUZ_SET_TB_ROWS][FUZ_SET_TB_COLS] = {
        // F2 \ F1
        {9999, -1, -0.8, -0.6, -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1},
        {-1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0.8, 0, 0, 0, 0},
        {-0.8, 1, 1, 1, 1, 0.8, 0.6, 0, 0, 0, 0, 0},
        {-0.6, 1, 1, 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0, 0, 0, 0, 0},
        {-0.4, 1, 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0, 0, 0, 0, 0},
        {-0.2, 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0, 0, 0, 0, 0, 0},
        {0, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0, 0, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8},
        {0.2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8, -1},
        {0.4, 0, 0, 0, 0, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8, -1, -1},
        {0.6, 0, 0, 0, 0, 0, -0.3, -0.6, -0.8, -1, -1, -1},
        {0.8, 0, 0, 0, 0, 0, -0.6, -0.8, -1, -1, -1, -1},
        {1, 0, 0, 0, 0, 0, -0.8, -1, -1, -1, -1, -1});
    return fuzzy(fuzzy_table, f1, f2);
}

```

รูปที่ 6.24 โปรแกรมส่วนของตารางคี่ฟัซซีพีเคชันชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ของฟัซซีแบบจัดการตัวเอง

```

//=====
// ADUC7042_ADC: Procedure ADC for
// ET-BASE ARM ADUC7024
//=====
void Initial_ADC(void)
// Power-ON ADC
{
    ADCCON = 0x00000000;
// Reset ADC Config
    ADCCON |= 0x00000020;
// Power-ON ADC Function
    Delay(1000);
// Wait ADC Power-on Ready
    ADCCON |= 0x00001400;
// ADC Clock = fADC/32
    ADCCON |= 0x00000300;
// Acquisition Time
// = 16 Cycle Clock
    ADCCON &= 0xFFFFFE7;
// ADC = Single-End Mode
    ADCCON |= 0x00000004;
// Continue Software Convert
    REFCON = 0x00000001;
// Used Internal 2.5V Reference
    ADCCON |= 0x00000080;
// ADC Start Conversion
}

float ADC_Read(int channel)
{
    float volt;
// ADC Result Volt
    unsigned int val;
// ADC Result (HEX)
    ADCCP = channel;
// Select Channel to Conversion
    Delay(1000);
// Wait Select Channel Ready
    while (!ADCSTA);
// Wait ADC Conversion
    Complete (Bit0="1")
    val = (ADCDAT >> 16) & 0x00000FFF;
// Shift ADC
    Result to Integer
    volt = val * (2.50 / 4096.0);
// Volt = ADC Result x [2.5V / 4095]
    return (volt);
}

```

รูปที่ 6.25 โปรแกรมควบคุมการทำงานส่วนของการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

```

=====
// ADUc7042_DAC: Procedure DAC for ET-BASE ARM ADUc7024
=====
void Initial_DAC(void) // Initial DAC0
{
    DAC0CON &= 0xDF; // DAC0 Used System Clock
    DAC0CON |= 0x10; // Enable DAC0
    DAC0CON |= 0x02; // DAC1 Output Range = +Vref..AGND
    REFCON = 0x01; // Used Internal 2.5V Reference
    // Initial DAC1
    DAC1CON &= 0xDF; // DAC0 Used Sysytem Clock
    DAC1CON |= 0x10; // Enable DAC1
    DAC1CON |= 0x02; // DAC1 Output Range = +Vref..AGND
    REFCON = 0x01; // Used Internal 2.5V Reference
}

```

รูปที่ 6.26 โปรแกรมควบคุมการทำงานส่วนของการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก

```

===== //-----
// SERIAL.C : Initial UART For ET-BASE ARM ADUc7024 // Write Character To UART using for scanf command
===== //-----
#define CR 0x0D // Enter Code //-----

//----- int putchar(int ch) // Write character to Serial Port
// Delay Time Function 1-4294967296 { if (ch == '\n') { while (!(0x40==(COMSTA0 & 0x40)))
//----- // Wait TX Complete {}
void Delay(unsigned long int count1) // Loop Decrease Counter { while(count1 > 0) {count1--;} COMTX = CR;
// Loop Decrease Counter } // Write CR
//----- while (!(0x40==(COMSTA0 & 0x40)))
// Initial UART = 9600, N, 8, 1 when Uclk = 41.78 MHz // Wait TX Complete
//----- {}
//----- return (COMTX = ch);
//-----

void Initial_Serial(void) //-----
{ GP1CON &= 0xFFFFFCC; // Read Character From UART using for printf command
// Reset P1.1 & P1.0 Pin Function GP1CON |= 0x00000011; //-----
// Setup P1.1 = TXD & P1.0 = RXD

// Initial UART = 9600BPS int getchar (void)
COMCON0 = 0x80; // Read character from Serial Port
// Setting DLAB { while(!(0x01==(COMSTA0 & 0x01)))
COMDIV0 = 0x88; // Wait Receive Data Ready {}
// Setting DIV0 and DIV1 to DL calculated return (COMRX);
COMDIV1 = 0x00; }
COMCON0 = 0x07;
// Clearing DLAB
}

```

รูปที่ 6.27 โปรแกรมส่วนของการเชื่อมต่อสัญญาณรับและส่งแบบอนุกรม RS232

## 6.5 สรุป

เครื่องจักรกลทางการเกษตรที่ได้พัฒนาขึ้นตามสิทธิบัตรการประดิษฐ์ เลขที่คำขอ 0701002473 มีลักษณะเด่นเฉพาะของของโครงสร้าง คือ สามารถถอดแยกใช้งานได้ในแต่ละชั้น ตามความเหมาะสมของกระบวนการผลิต เนื่องจากในแต่ละชั้นมีมอเตอร์สำหรับใช้ในการขับเคลื่อนและใบมีดที่ได้รับการประดิษฐ์คิดค้นให้มีความคงทน ทั้งความคมและความคงรูปทางกายภาพ ตามกระบวนการที่ได้กล่าวมาแล้ว และมีรูปลักษณะแตกต่างกันในแต่ละชั้นเพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนหรือเลือกใช้ในแต่ละกระบวนการผลิตที่หลากหลายรูปแบบ

วัสดุที่นำมาทำใบมีดในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ผลิตมาจากเหล็กเชื่อมสภาพที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ซึ่งเหล็กชนิดนี้มีความแข็งแรงแต่ไม่เหนียวแตกหักง่ายเมื่อได้รับแรงกระแทก การที่จะนำเหล็กดังกล่าวมาทำการขึ้นรูปเป็นใบมีดสำหรับเครื่องจักรกลของงานวิจัยนี้ จำเป็นจะต้องได้รับการปรับแปรให้มีความแข็งแรงและเหนียวด้วยกระบวนการตามที่ได้จดสิทธิบัตรการประดิษฐ์ เลขที่คำขอ 0701000717 และทำการขึ้นรูปใบมีดตามสิทธิบัตรการประดิษฐ์ชุดใบมีดควงแบบเป็นพวง เลขที่คำขอ 0701000718 สิทธิบัตรการประดิษฐ์ใบมีดสับและกระบวนการขึ้นรูปใบมีดสับ เลขที่คำขอ 0701000717 สิทธิบัตรการประดิษฐ์ปลอกยึดใบมีดสับแบบปรับมุมได้และชุดใบมีดสับแบบปรับมุมได้ เลขที่คำขอ 0701000719 สิทธิบัตรการประดิษฐ์ใบรองสับ เลขที่คำขอ 0701000720 และสิทธิบัตรการประดิษฐ์ใบมีดเฉือน เลขที่คำขอ 0701001328

ระบบควบคุมพีซีแบบจัดการตัวเองถูกโปรแกรมขึ้นด้วยภาษา C ซึ่งต้องดาวน์โหลด MCU ด้วยโปรแกรม ARMWSD (ARM Windows Serial Download) ผ่าน RS232 มีตัวตรวจรู้ความเร็วรอบมอเตอร์แบบอ่านรหัสแถบสะท้อนแสงติดตั้งอยู่บริเวณส่วนต่อขยายเพลลาของมอเตอร์เป็นตัวสร้างสัญญาณป้อนกลับให้แก่ระบบควบคุม ผ่านวงจรถอดรหัสเพื่อแปลงสัญญาณเข้าสู่ตัวควบคุมพีซีแบบจัดการตัวเอง ที่ใช้บอร์ด ET-BASE ซีพียู ARM 7024 ทำการประมวลผลสร้างสัญญาณควบคุมไปสั่งการทำงานของอินเวอร์เตอร์ผ่านวงจรขยายสัญญาณหรือปรับความชันสองเท่า อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการวิจัยนี้จะต้องใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ต่อขนานกัน 3 ตัว แต่ในขณะที่เริ่มเดินมอเตอร์แต่ละตัวใช้กระแสที่สูงกว่าช่วงคงตัว ดังนั้น ในการเริ่มเดินเครื่องจึงต้องมีวิธีการเริ่มเดินที่เหมาะสมกับกำลังของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะได้อธิบายในบทต่อไป

โปรแกรมที่งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาขึ้นในส่วนของระบบควบคุม แบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ ด้วยกัน กล่าวคือ ส่วนของโปรแกรมควบคุมพีซีแบบจัดการตัวเอง และโปรแกรมสำหรับควบคุมการแปลงและรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ภายนอก ในส่วนของโปรแกรมควบคุมพีซีแบบจัดการตัวเอง แบ่งออกเป็น โปรแกรมหลักสำหรับประกาศตัวแปรและกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ส่วนของการรับค่าจากตัวตรวจรู้มาดำเนินการทางพีซี ส่วนของโปรแกรมประมวลผลด้วย

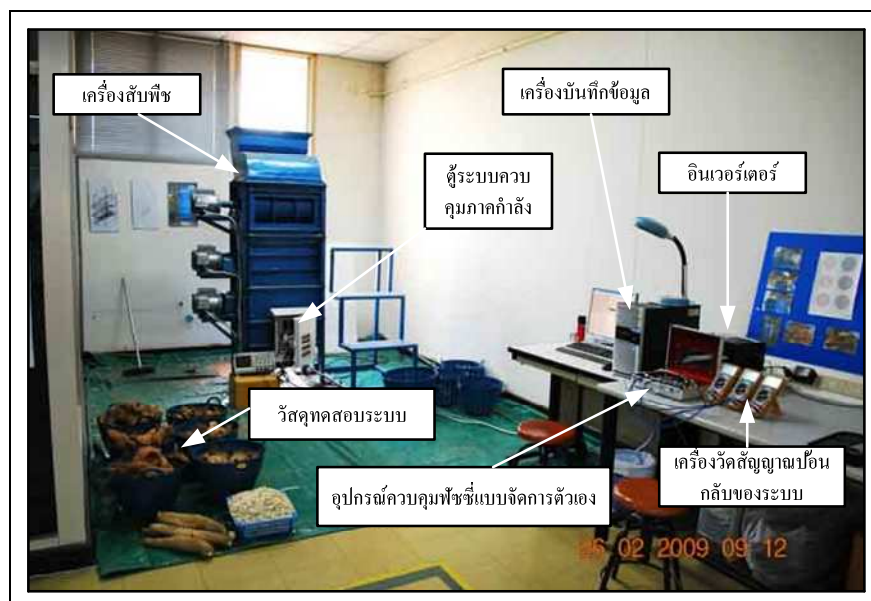
กระบวนการทางพีชชีแบบจัดการตัวเอง ส่วนของโปรแกรมการเปิดตาราง (lookup table) พีชชี เพื่อใช้ในการคำนวณ และส่วนของตารางพีชชีแบบจัดการตัวเอง ในส่วนโปรแกรมที่เกี่ยวกับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกประกอบไปด้วย โปรแกรมในส่วนของการรับและส่งข้อมูลผ่านทางพอร์ตอนุกรม ส่วนของการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล และส่วนสุดท้ายคือการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก โปรแกรมในแต่ละส่วนที่กล่าวมาได้แสดงรายละเอียดของโปรแกรมไว้ในภาคผนวก ข.

## บทที่ 7

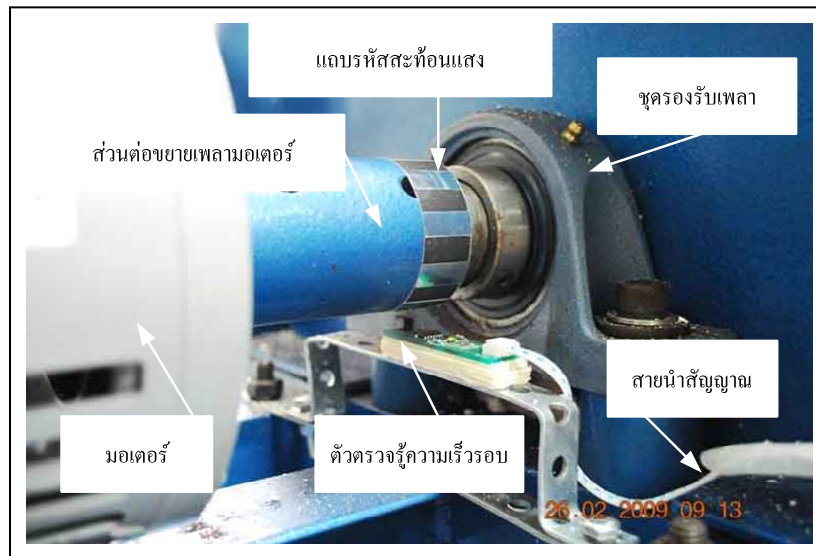
### การทดสอบระบบและอภิปรายผล

#### 7.1 บทนำ

ระบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อทดสอบแนวคิดและหลักการของการวิจัยนี้มีโครงสร้างดังแผนภาพในรูปที่ 7.1 เครื่องสับพีชผลทางการเกษตรที่ประดิษฐ์ขึ้นขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว 3 ตัว ต่อขนานกัน ขับด้วยอินเวอร์เตอร์ตัวเดียว (Frecon 3.7 kW 17 A) การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ถูกควบคุมด้วยสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีชชีของงานวิจัยนี้ซึ่งใช้ชิพยูนี ARM 7024 โดยรับสัญญาณป้อนกลับจากตัวตรวจรู้อัตราเร็วของมอเตอร์ อุปกรณ์ทางฮาร์ดแวร์ทั้งหมดจัดตั้งที่ห้องปฏิบัติการ 3206 อาคารเครื่องมือ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งจะเห็นเครื่องสับพีชติดตั้งมอเตอร์ 3 ตัว ชุดใบมีดและตัวถัง วัสดุที่ใช้ทดสอบระบบประกอบด้วยมันสำปะหลัง กะลามะพร้าว และใยมะพร้าว เครื่องบันทึกข้อมูลจะทำการบันทึกข้อมูลการทำงานของตัวควบคุมพีชชีและอัตราเร็วรอบของมอเตอร์ทุก ๆ 0.16 วินาที ต่อ 1 จุดข้อมูล ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะได้มาจากตัวตรวจรู้ที่ติดตั้งอยู่บริเวณใต้เพลาล้อมและมีแถบรหัสสะท้อนแสงติดอยู่บริเวณส่วนต่อขยายของเพลาดังแสดงในรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.1 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบระบบพร้อมทั้งวัสดุทดสอบระบบ



รูปที่ 7.2 การติดตั้งแฉบรหัสสะท้อนแสงและตัวตรวจรู้อัตราเร็วรอบมอเตอร์ พร้อมทั้งสายนำสัญญาณ

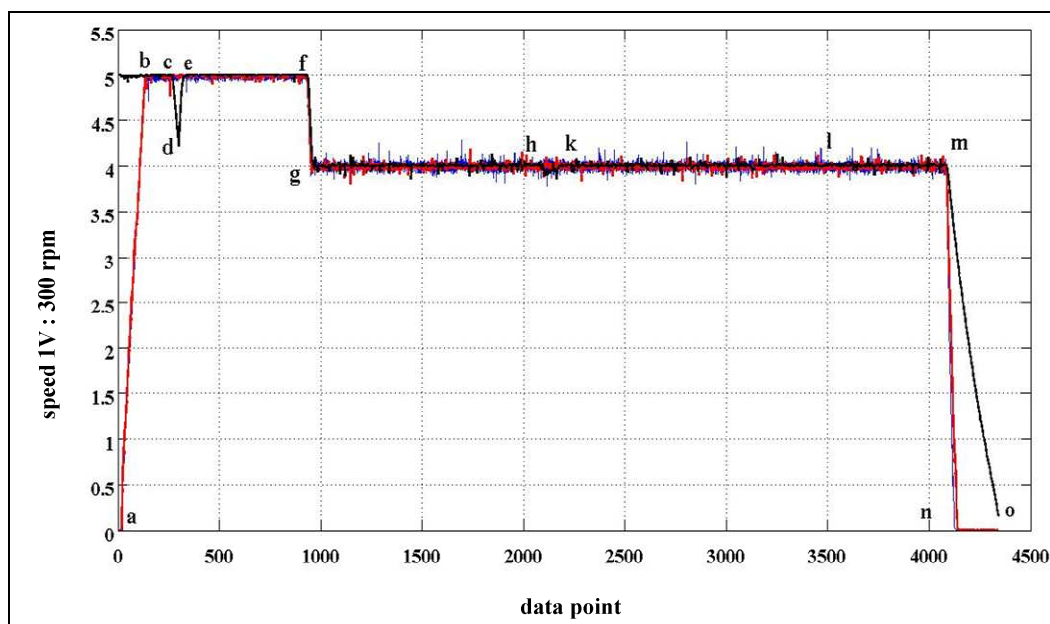
## 7.2 ผลการทดสอบเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์

การทดสอบเริ่มจากการเปิดเครื่องบันทึกข้อมูล เปิดอุปกรณ์ควบคุมให้พร้อมที่จะทำงาน ต่ออินเวอร์เตอร์เข้ามอเตอร์ตัวกลางและตัวล่าง ต่อระบบไฟ 220 V 50 Hz จากภายนอกเข้ามอเตอร์ตัวบน เนื่องจากในตอนเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ตัวบนมีชุดไบริมที่มีระยะห่างจากศูนย์กลางมวลมากกว่าไบริมอีก 2 ชุด โครงสร้างเป็นแบบกรงกระรอกติดอยู่ที่เพลลา แรงที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เพื่อให้เกิดแรงกระแทกสูง การออกตัวของมอเตอร์จำเป็นต้องใช้แรงบิดสูง ทำให้มอเตอร์ดึงกระแสสูงมากกว่าการเดินเครื่องในสภาวะปกติ หากใช้อินเวอร์เตอร์ในช่วงเริ่มออกตัวพร้อม ๆ กัน เพื่อขับไบริมทั้ง 3 ชุด ในทันทีทันใด อินเวอร์เตอร์จะต้องมีขนาดกำลังพิกัดสูงกว่าที่ใช้เป็นอย่างมาก และจะทำให้ต้นทุนการผลิตต้นแบบสูงขึ้นมาก

การทดสอบเริ่มด้วยการออกตัวมอเตอร์ตัวบนก่อน แล้วจึงเริ่มออกตัวมอเตอร์ 2 ตัวล่าง การอธิบายนี้แทนได้ด้วยกราฟอัตราเร็วรอบมอเตอร์ในรูปที่ 7.3 ที่เวลา  $t = 0$  จุด a มอเตอร์ตัวกลางและตัวล่างถูกขับด้วยอินเวอร์เตอร์ อัตราเร็วรอบจึงเริ่มไต่ระดับจากศูนย์ไป 1500 รอบต่อนาที ถึงจุด b ซึ่งที่จุดนี้มอเตอร์ตัวบนถูกขับด้วยไฟสลับ 220 V 50 Hz หมุนด้วยอัตราเร็ว 1500 รอบต่อนาที รออยู่ก่อนแล้ว เมื่อมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวหมุนด้วยอัตราเร็วรอบเดียวกันมาจนถึงจุด c จึงได้ทำการตัดแหล่งจ่ายของมอเตอร์ตัวบนออก ทำให้อัตราเร็วรอบของมอเตอร์ตัวบนตกลงอย่างช้า ๆ เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 วินาที จึงเชื่อมต่อแหล่งจ่ายจากอินเวอร์เตอร์เข้าสู่มอเตอร์ตัวบน

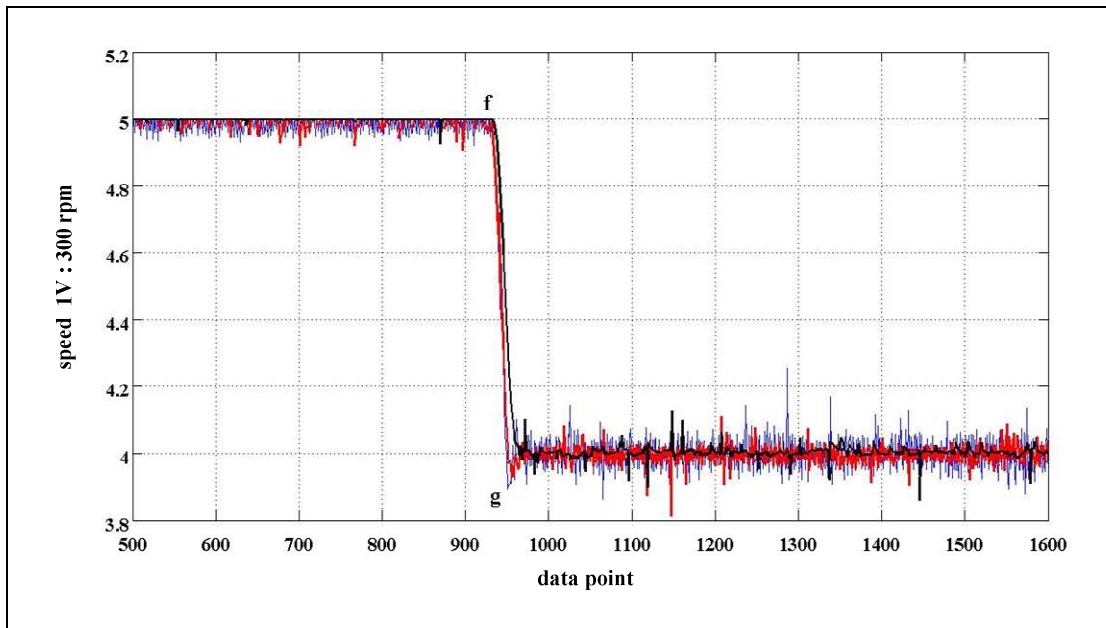


จะสังเกตเห็นได้ว่าอัตราเร็วของมอเตอร์ตัวบนจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนกลับมามีอัตราเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที ที่จุด e ใช้เวลาประมาณ 5.8 วินาที สาเหตุที่ไม่ออกตัวพร้อมกันและใช้การชิงโครไนซ์ มอเตอร์กับอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธีนี้ถึงแม้จะแยกแหล่งจ่าย เพราะการเดินเครื่องจักรใช้ไฟฟ้าจาก ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าเดียวกันของห้องปฏิบัติการ ซึ่งขนาดพิกัดของสายส่งไม่สามารถทนกระแส สูงได้ การเดินเครื่องมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว พร้อมกันอาจทำให้ระบบไฟฟ้าภายในห้องปฏิบัติการ เสียหายได้

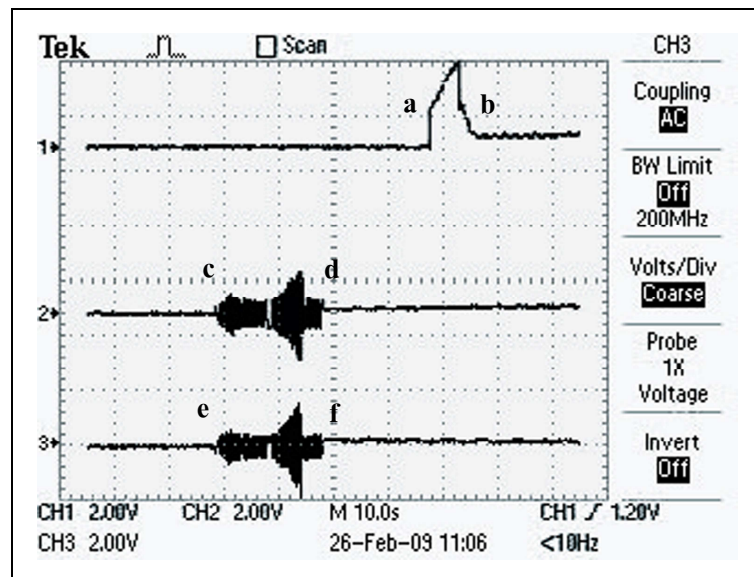


รูปที่ 7.3 กราฟอัตราเร็วรอบมอเตอร์ที่สถานะต่าง ๆ

เมื่อมอเตอร์ทั้งสามตัวที่ถูกขับด้วยอินเวอร์เตอร์ตัวเดียวกันไปจนถึงจุด f (อัตราเร็ว 1500 รอบต่อนาที) จึงเริ่มทำการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีชซีแบบจัดการตัวเอง ดึงให้อัตราเร็วรอบ มอเตอร์เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่จุด g (อัตราเร็ว 1200 รอบต่อนาที) ใช้เวลาประมาณ 3.2 วินาที ดังแสดง ภาพขยายช่วงจุด f ถึง g ในรูปที่ 7.4 และเมื่อมอเตอร์ทั้งสามตัวถูกขับเคลื่อนด้วยตัวควบคุมไป จนถึงจุด h (ดูรูปที่ 7.3) ได้ทำการใส่สถานะรบกวนเข้าไปในระบบจนถึงจุด k ด้วยการป้อนวัตถุคิบ ให้เครื่องจักรสับ หลังจากสถานะรบกวนออกไปจากระบบแล้ว มอเตอร์ทั้ง 3 หมุนด้วยอัตราเร็ว เป้าหมายต่อไปจนถึงจุด m จึงได้ทำการตัดแหล่งจ่ายออกจากระบบ จะเห็นว่ามอเตอร์ 2 ตัวล่าง อัตราเร็วลดลงมาถึงจุด n ตัวบนจะลดลงมาถึงจุด o มอเตอร์ตัวบนมีอัตราหมุนที่ต่ำกว่าสองตัวล่าง เพราะมีความเฉื่อยมากกว่า

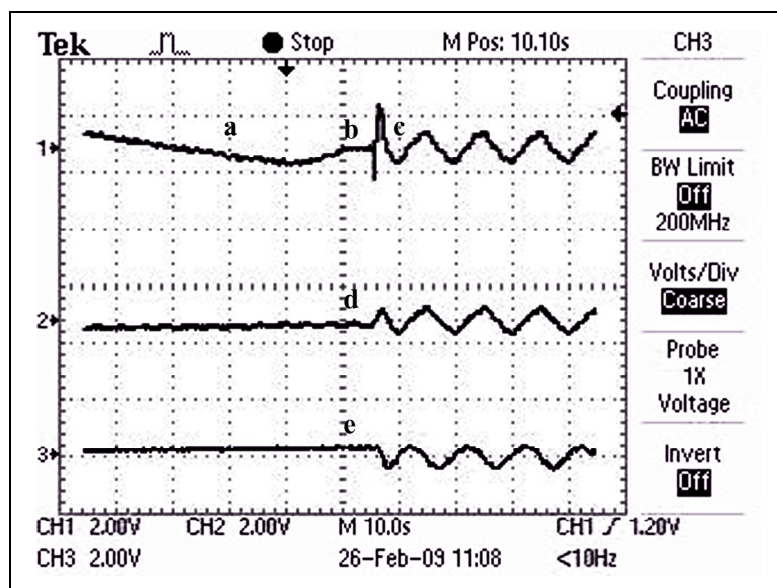


รูปที่ 7.4 จุดที่เริ่มทำการควบคุมอัตราเร็วให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย



รูปที่ 7.5 กราฟกระแสขณะเริ่มออกตัวของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว

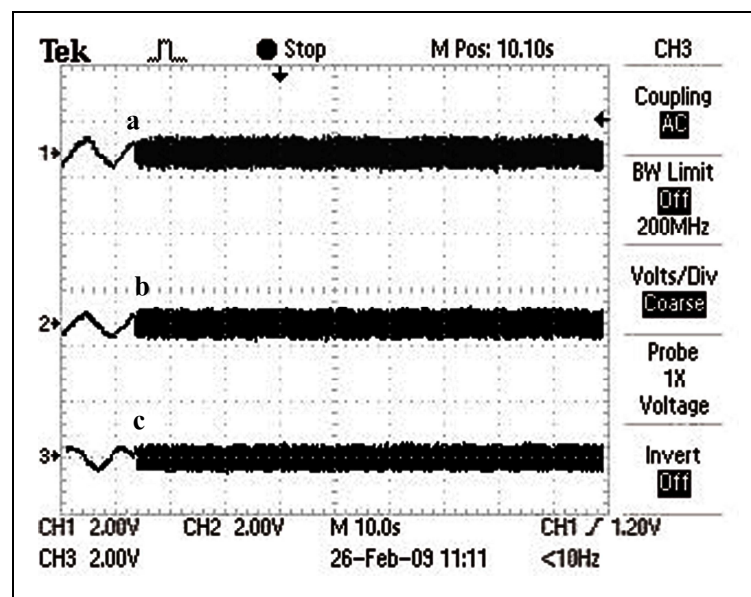
รูปที่ 7.5 แสดงกราฟของกระแสมอเตอร์ที่บันทึกไว้ด้วยออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัลของ Tektronix รุ่น TPS 2024 จุด a ถึง b ในกราฟเส้นบนแสดงกระแสช่วงออกตัวของมอเตอร์ตัวบน ส่วนจุด c ถึง d ในกราฟเส้นกลาง แสดงกระแสเริ่มออกตัวของมอเตอร์ชุดกลาง จุด e ถึง f ในกราฟเส้นล่างสุด แสดงกระแสช่วงออกตัวของมอเตอร์ตัวล่าง มอเตอร์ทุกตัวหมุนที่อัตราเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที ในสภาวะคงตัว ทั้งนี้ช่วงเวลากาการตั้งกระแสของมอเตอร์สัมพันธ์กับช่วงเวลากการทำงานของเครื่องจักรดังที่อธิบายไว้แล้วข้างต้น



รูปที่ 7.6 กระแสช่วงเชื่อมต่อมอเตอร์ตัวบนเข้าแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 7.6 แสดงกราฟกระแสมอเตอร์ กราฟเส้นบนสุด แสดงกระแสของมอเตอร์ตัวบน ขณะที่กราฟเส้นกลางและล่างเป็นของมอเตอร์ตัวกลางและตัวล่างสุด พิจารณากราฟเส้นบนจะเห็นจุด a b และ c ซึ่งสัมพันธ์กับสภาวะการทำงานของมอเตอร์ตัวบนดังการอธิบายก่อนหน้านี้ ซึ่งอ้างอิงรูปที่ 7.3 ในช่วงเวลาที่มอเตอร์ตัวบนได้รับกำลังไฟฟ้าโดยตรงจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 220 V 50 Hz ณ เวลาที่จุด b แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับถูกตัดออกจากมอเตอร์ มอเตอร์ตัวบนจึงหมุนด้วยความเฉื่อยต่อไปเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ จนถึงเวลาที่จุด c อินเวอร์เตอร์จึงถูกต่อเข้าอินพุตมอเตอร์ตัวบน ซึ่งสามารถสังเกตเห็นการกระชากของกระแสได้จากกราฟที่จุด c นี้เป็นเวลาในจังหวะเดียวกับจุด d และ e ของกราฟเส้นกลางและล่างสุดนับจากเวลาที่ c (d หรือ e) เป็นต้นไป จะสังเกตเห็นการแกว่งตัวของกระแสของมอเตอร์ ซึ่งมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว รับพลังงานจากอินเวอร์เตอร์ตัวเดียวกัน โดยที่มอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ต่อขนานกัน

สภาวะต่อจากนั้น ระบบควบคุมทำการควบคุมอัตราเร็วให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย เมื่อทำการเริ่มสั่งการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีชซีแบบจัดการตัวเองในรูปที่ 7.3 ที่จุด f อัตราเร็วมอเตอร์ถูกคุมค่าเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่จุด g (อัตราเร็ว 1200 รอบต่อนาที) ใช้เวลาประมาณ 3.2 วินาที รูปคลื่นกระแสซึ่งเป็นผลการวัดที่จุด a b และ c ของมอเตอร์ตัวบน ตัวกลาง และตัวล่าง ตามลำดับ (ดูรูปที่ 7.7) มีค่าความถี่เปลี่ยนแปลงไปตามระบบควบคุมพีชซี ซึ่งจะเห็นได้ว่าความถี่ช่วงก่อนทำการควบคุมหรือก่อนถึงจุด a b และ c จะน้อยกว่าความถี่หลังการควบคุม ดังที่แสดงด้วยกราฟกระแสของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ในรูปที่ 7.7



รูปที่ 7.7 กระแสของมอเตอร์ขณะเริ่มถูกควบคุมให้มีอัตราเร็วมอเตอร์เข้าสู่ค่าเป้าหมาย

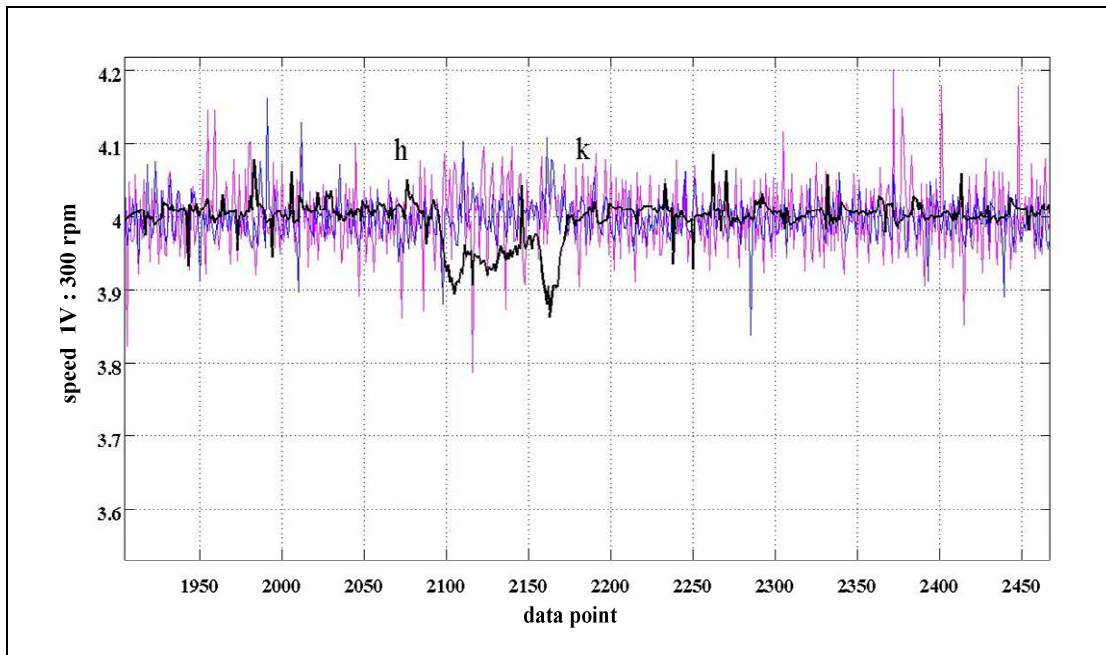
### 7.3 ผลทดสอบการขับโหลด

ในขั้นตอนต่อไปเป็นการป้อนสภาวะรบกวนให้แก่ระบบ ในที่นี้สภาวะรบกวนหมายถึง วัสดุเพื่อการสับ ถูกป้อนให้เครื่องจักรทำการสับ การทดสอบได้เตรียมวัสดุทดสอบระบบใส่ภาชนะสำหรับเทลงด้านบนของเครื่องสับพีช ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7.8 วัสดุที่เทลงไปเป็นตัวรบกวนการทำงานของระบบควบคุม โดยจะเทลงไปเป็นช่วง ๆ เพื่อเฝ้าตรวจสอบผลตอบสนองของระบบและดำเนินการทดสอบ 3 ครั้ง ด้วยวัสดุที่แตกต่างกัน



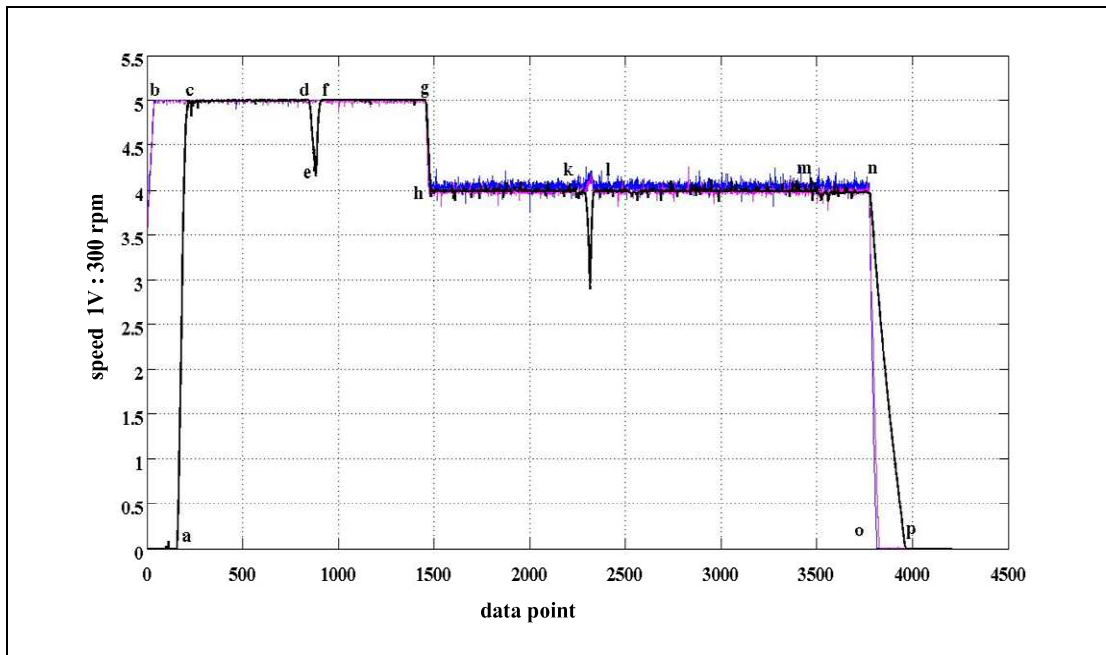
รูปที่ 7.8 การเทวัสดุทดสอบเข้าไปปรับจนสภาวะการทำงานของระบบควบคุม

- วัสดุชนิดที่ 1 คือ มันสำปะหลัง ซึ่งมีลักษณะแข็งและมีเส้นใยที่มีความชื้นสูงอัดแน่นอยู่ภายใน ในการทดสอบได้เริ่มป้อนวัสดุสำหรับสับที่จุด h ในรูปที่ 7.9 จะเห็นว่ามอเตอร์ตัวบนมีอัตราเร็วรอบตกลง (สังเกตได้จากกราฟเส้นทึบในภาพ) แต่ระบบควบคุมพยายามรักษาอัตราเร็วรอบของมอเตอร์ 2 ตัวล่าง ที่ได้รับโหลดน้อยกว่า ให้คงระดับอัตราเร็วคงตัวตามที่ต้องการ และเมื่อมีสภาวะรบกวนเข้ามากระทำต่อเครื่องจักรซ้ำอีก กล่าวคือ มีวัสดุบดเพิ่มทำให้อัตราเร็วรอบของมอเตอร์ตัวบนตกลงมากกว่าเดิม เนื่องจากยังคงมีวัสดุค้างอยู่ในเครื่องจักร ซึ่งระบบควบคุมพยายามรักษาอัตราเร็วรอบให้คงระดับตามต้องการได้ โดยสามารถสังเกตกราฟระหว่างจุด h ถึง k และจากจุด k เป็นต้นไป

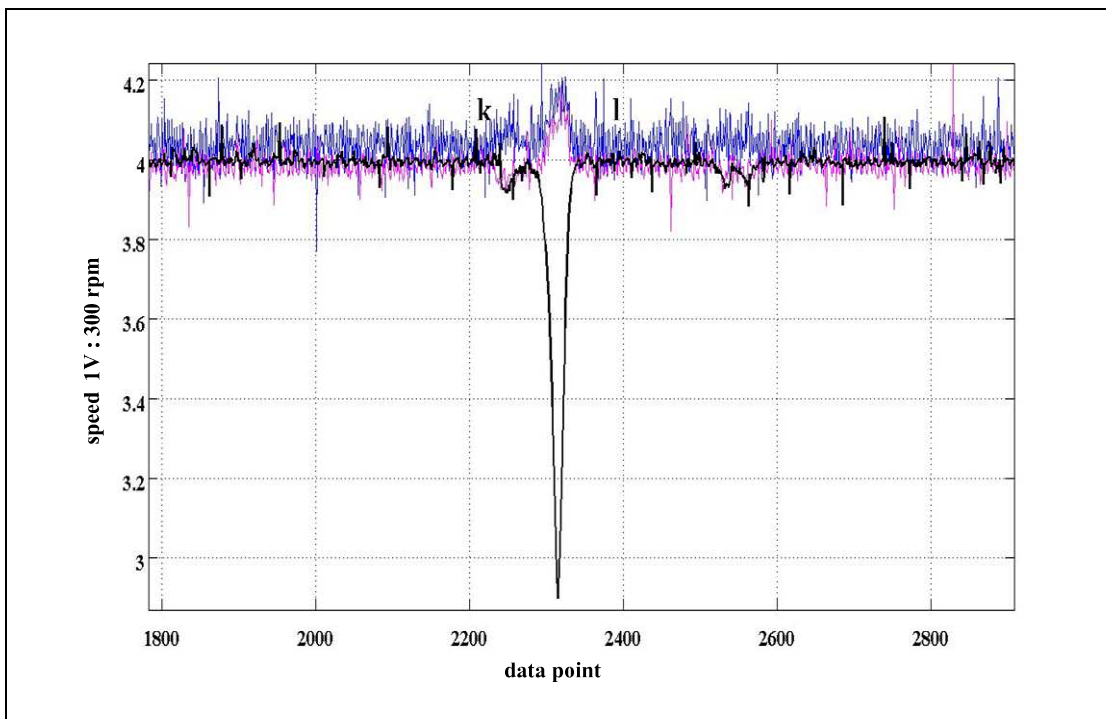


รูปที่ 7.9 อัตราเร็วรอบมอเตอร์ช่วงที่ระบบมีสถานะรบกวนจากภายนอก

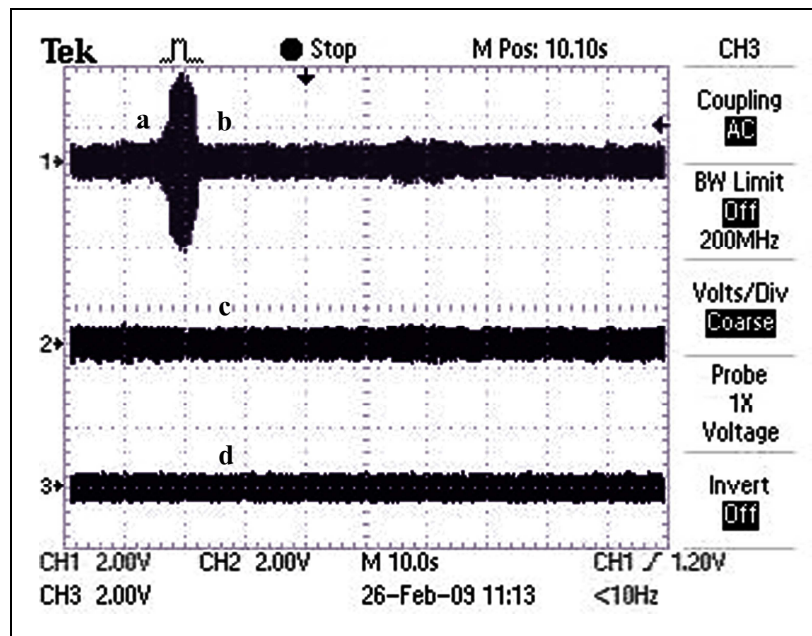
- วัตถุชนิดที่ 2 คือ กะลามะพร้าวป่นด้วยใยมะพร้าว ได้ทำการเริ่มเดินเครื่องทดสอบเหมือนครั้งที่ 1 ในรูปที่ 7.10 แสดงจุดเริ่มป้อนวัตถุเข้าระบบที่จุด k แต่เนื่องจากวัตถุที่เตรียมไว้จับตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ เพราะมีเส้นใยมะพร้าวปนอยู่ วัตถุดังกล่าวจึงปรากฏเป็นภาระกรรมปริมาณมากและมีแรงกดสูง ด้านการหมุนของใบมีดชุดบน จึงสังเกตเห็นได้ว่าอัตราเร็วรอบของมอเตอร์ตัวบนตกลงมากกว่าปกติดังปรากฏในช่วง k ถึง l ช่วงเวลาดังกล่าวได้ขยายให้เห็นอย่างชัดเจนในรูปที่ 7.11 ซึ่งอัตราเร็วรอบของมอเตอร์ตัวบนตกจาก 1200 รอบต่อนาที เหลือประมาณ 800 รอบต่อนาที เป็นช่วงเวลาสั้น ๆ และได้รับการควบคุมปรับระดับอัตราเร็วกลับไปคงค่าที่ 1200 รอบต่อนาที ตามเดิม



รูปที่ 7.10 อัตราเร็วรอบมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ในสถานะต่าง ๆ ของการทดสอบ



รูปที่ 7.11 อัตราเร็วรอบมอเตอร์ช่วงเกิดสภาวะรบกวนระบบ

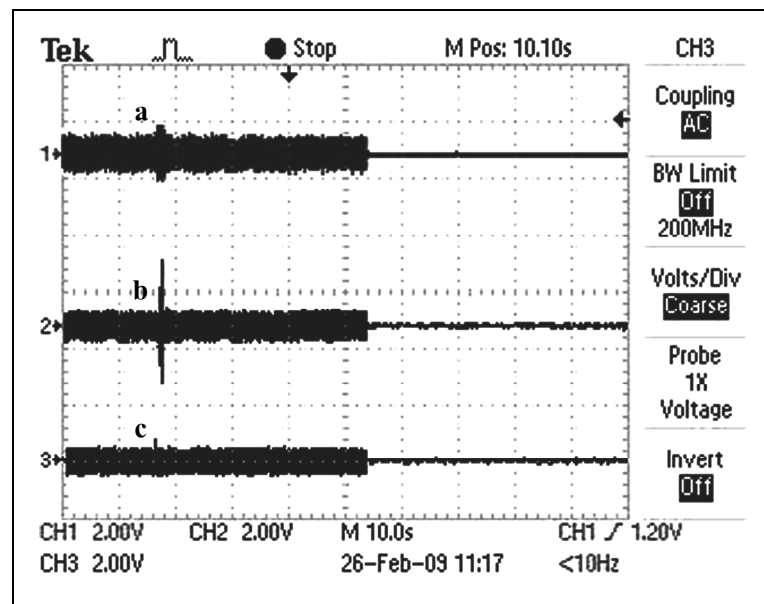


รูปที่ 7.12 กระแสมอเตอร์ในการทดสอบสับกะลามาพร้อมด้วยไข่มะพร้าว

รูปที่ 7.12 แสดงกราฟของกระแสมอเตอร์ กราฟเส้นบนสุดเป็นของกระแสมอเตอร์ตัวบน ช่วง a ถึง b เป็นช่วงที่มอเตอร์ตัวบนดึงกระแสสูง สัมพันธ์กับการทำงานที่ชุดใบมีดควงแบบเป็นพวง ดัดล็อกด้วยวัตถุเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ ที่อัตราเร็วรอบตกลงในช่วงเวลา k ถึง l ในรูปที่ 7.11 แต่กระแสของมอเตอร์ตัวกลางและตัวล่างในช่วงเวลาดังกล่าวไม่เพิ่มสูงตามไปด้วย ซึ่งแสดงด้วยจุด c และ d ตามลำดับ ตามที่อธิบายมาก่อนหน้านี้ว่า สภาพะดังกล่าวหากเกิดขึ้นยาวนานกว่านี้ ทำให้ระบบป้องกันตัดมอเตอร์ตัวบนออกจากระบบ เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับกระบวนการ และระบบจะต้องหยุดทั้งหมดก่อนที่กระบวนการจะเริ่มดำเนินงานใหม่

- วัตถุชนิดที่ 3 ในการทดสอบเป็นก้ามมะพร้าว ก้ามมะพร้าวมีเส้นใยที่ยาวและเหนียวแตกต่างจากวัตถุที่ใช้ทดสอบที่ผ่านมา ณ เวลาที่ จุด m ในรูปที่ 7.10 ได้เริ่มเทก้ามมะพร้าวลงสู่เครื่องจักร สภาพะรบกวนที่เกิดขึ้นมีลักษณะของการพันของไข่มะพร้าวที่ใบมีดชุดบนและใบรองสับของใบมีดชุดกลาง ทำให้อัตราเร็วของใบมีดสองชุดนี้ตกลง และกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์สูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7.13 จุด a b และ c ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม อัตราเร็วรอบมอเตอร์ที่ตกลงนี้เป็นปริมาณเพียงเล็กน้อย เมื่อใบมีดสับเส้นใยขาดลง กระแสจะเข้าสู่สภาวะการทำงานปกติ พร้อมทั้งอัตราเร็วรอบของมอเตอร์ปรับเข้าสู่ค่าเป้าหมาย และทำการสับวัสดุที่อัตราเร็วตามค่าเป้าหมายที่กำหนด





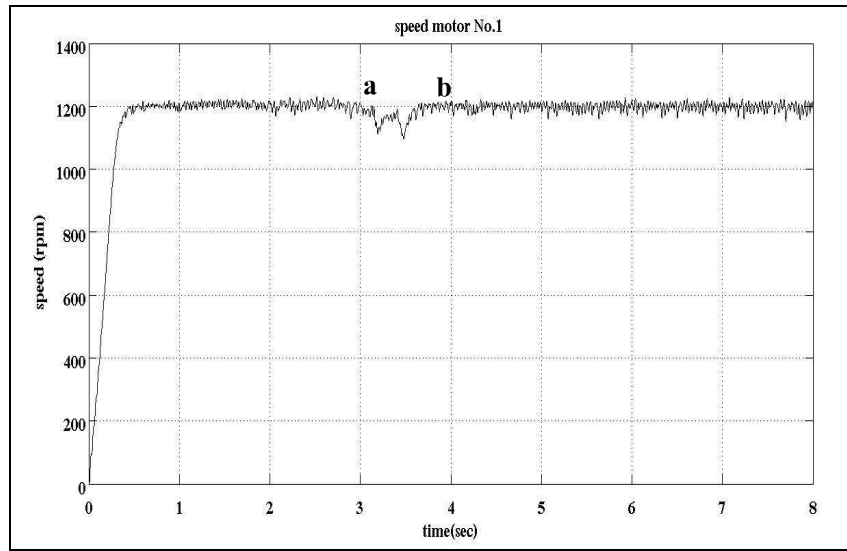
รูปที่ 7.13 กระแสมอเตอร์เมื่อทดสอบให้สับกานมะพร้าว

#### 7.4 การจำลองผลเลียนแบบการทดสอบจริง

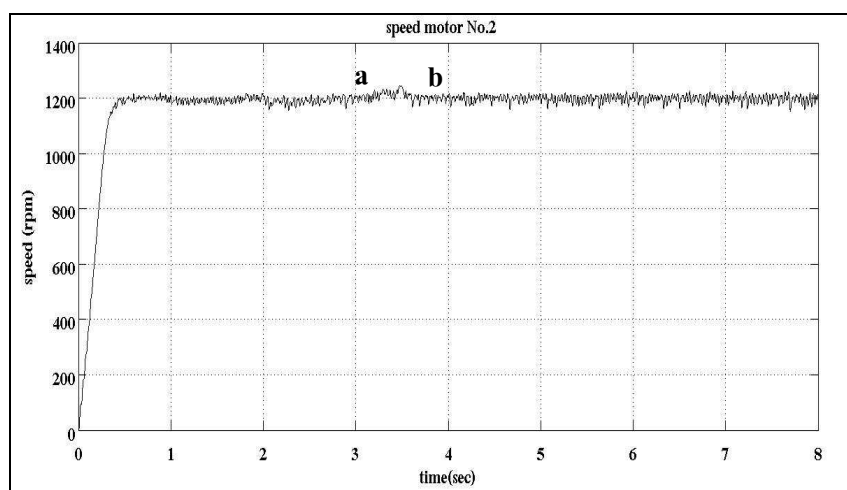
ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองผลเลียนแบบการใส่โหลดเสมือนจริง กล่าวคือ จากการทดสอบระบบจริงที่ผ่านมาดังที่ได้นำเสนอข้างต้น ทำให้ทราบว่าลักษณะหรือช่วงเวลาการเทว้สลดลงไปในระบบ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็ว และปรากฏสภาวะภาระกรรมปริมาณมาก มีแรงดูดสูง ด้านการหมุนของใบมีดชุดบน ก่อให้เกิดผลกระทบต่ออัตราการเร็ว ดังนั้นเพื่อศึกษาถึงความสามารถในระบบควบคุมในการคงค่าอัตราเร็ว จึงได้ทำการจำลองผลเลียนแบบการใส่ภาระกรรมในกรณีต่าง ๆ อิงผลการทดสอบ

- กรณีของผลทดสอบดังที่แสดงในรูปที่ 7.9 วัตถุคิที่เครื่องจักรสับมีลักษณะแข็งและมีเส้นใยอัดแน่นอยู่ภายใน มีความชื้นสูง ในการทดสอบเริ่มป้อนวัตถุคิสำหรับสับที่จุด h มอเตอร์ตัวบนมีอัตราเร็วรอบตกลง และเมื่อมีสภาวะระบบวนเข้ามากระทำต่อเครื่องจักรซ้ำอีก กล่าวคือมีวัตถุคิเทลงมาเพิ่ม ทำให้อัตราเร็วรอบตกลงมากกว่าเดิม เนื่องจากยังคงมีวัตถุคิค้างอยู่ในระบบ ในการจำลองผลได้ทำการใส่โหลดเลียนแบบ โดยโหลดชุดแรกปริมาณ 5 Nm เริ่มใส่ที่จุด a ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในรูปที่ 7.14 และเมื่อเวลาผ่านไป 0.15 วินาที ได้ใส่โหลดที่มีปริมาณ 25 Nm สังเกตได้ว่าอัตราเร็วรอบมอเตอร์จะตกลงมาที่ประมาณ 1160 รอบต่อนาที และระบบควบคุมพยายามรักษาให้เข้าหาค่าเป้าหมาย จนเมื่อเวลาผ่านไป 0.42 วินาที ได้เทว้สลดลงไปเพิ่มอีก แต่ในระบบยังมีว้สคู้ค้างอยู่ จึงทำให้เหมือนมีโหลดปริมาณมาก ๆ เข้าสู่ระบบ ทำให้อัตราเร็วรอบตกลงถึง 1145

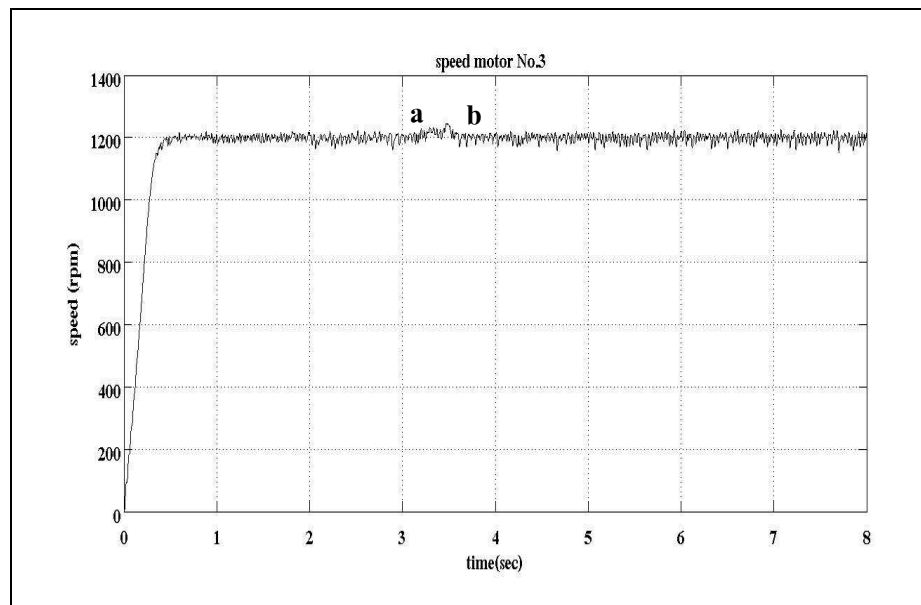
- รอบต่อมาที่ และเมื่อเวลาผ่านไประบบควบคุมพยายามรักษาอัตราเร็วให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายดังแสดงในรูปที่จุด b และในมอเตอร์ตัวที่ 2 และ 3 จุด a ถึง b ในรูปที่ 7.15 และ 7.16 อัตราเร็วมอเตอร์ของทั้งสองตัวสูงขึ้นเล็กน้อย แต่ไม่เกินขอบเขตการควบคุมที่กำหนด ในช่วงเวลาที่มอเตอร์ตัวที่หนึ่งพยายามดึงอัตราเร็วให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย



รูปที่ 7.14 ผลการจำลองผลด้วยโพลคัลการทดสอบจริง (วัตถุชนิดที่ 1) ของมอเตอร์ตัวบน

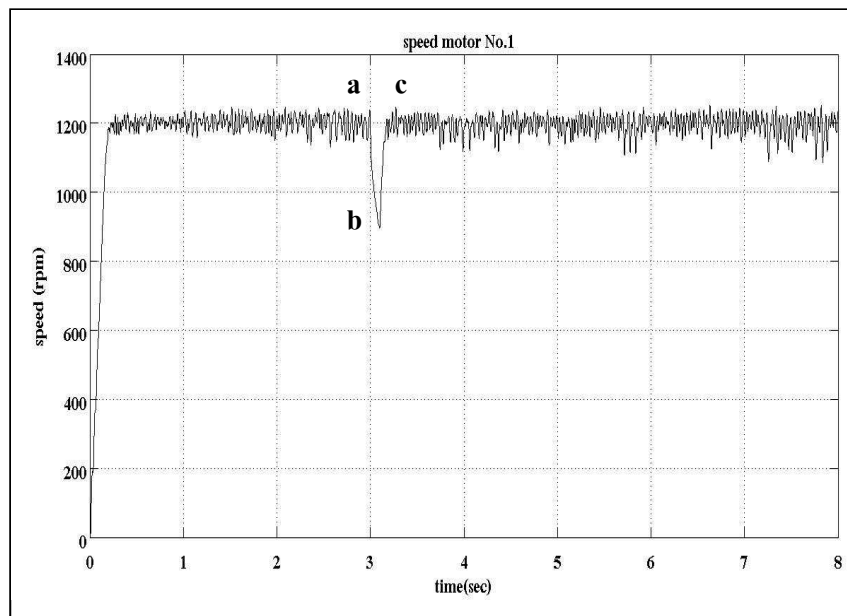


รูปที่ 7.15 ผลการจำลองผลด้วยโพลคัลการทดสอบจริง (วัตถุชนิดที่ 1) ของมอเตอร์ตัวกลาง

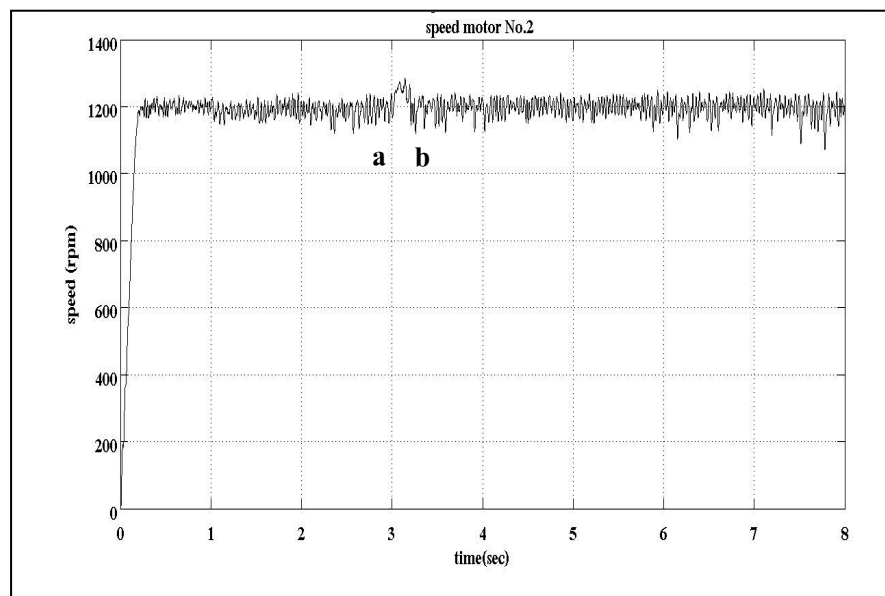


รูปที่ 7.16 ผลการจำลองผลด้วยโพลคัลลายการทดสอบจริง (วัตถุบิชนิดที่ 1)  
ของมอเตอร์ตัวล่าง

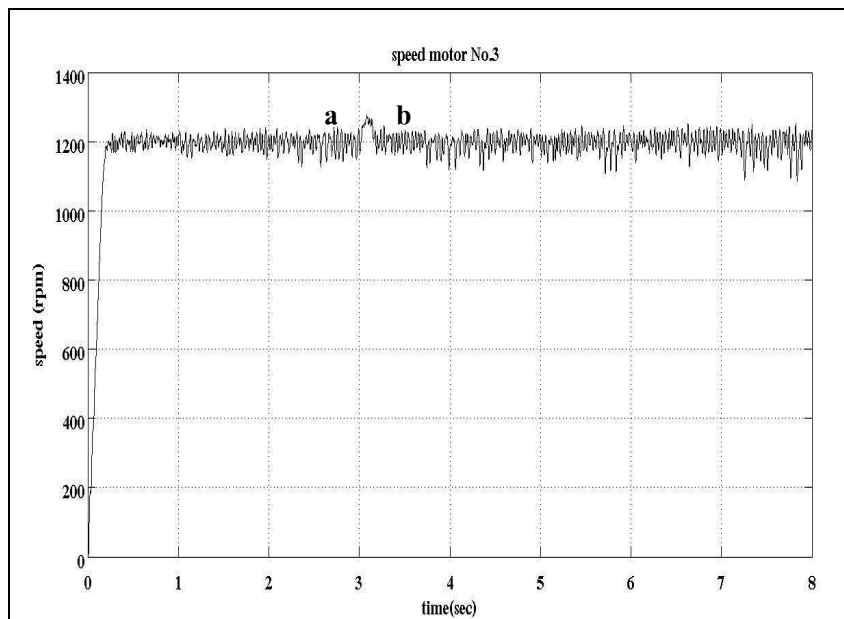
- จากรูปที่ 7.11 ที่นำเสนอผ่านมา เป็นผลจากการทดสอบระบบจริงด้วยวัตถุบิชนิดที่ 2 คือ กะลามะพร้าวปนด้วยโยมะพร้าว แต่วัตถุบิที่เตรียมไว้จับตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ เพราะมีเส้นโยมะพร้าวปนอยู่ วัตถุบิดังกล่าวจึงปรากฏเป็นภาระกรรมปริมาณมากและมีแรงกดสูง ด้านการหมุนของโยมีดชูดบน ทำให้อัตราเร็วรอบของมอเตอร์ตัวบนตกลงจาก 1200 รอบต่อนาที เหลือประมาณ 800 รอบต่อนาที เป็นช่วงเวลาดึ้น ๆ และได้รับการควบคุมปรับระดับอัตราเร็วกลับไปคงค่าที่ 1200 รอบต่อนาที ตามเดิม ในการจำลองผลเลียนแบบสภาวะดังกล่าว ได้ใส่โพลคัลที่มีปริมาณ 45 Nm ลงไปในระบบเป็นเวลา 1 วินาที ผลทำให้ทำให้อัตราเร็วรอบของมอเตอร์ตัวบนตกลงจาก 1200 รอบต่อนาที เหลือประมาณ 900 รอบต่อนาที เป็นช่วงเวลาดึ้น ๆ การอธิบายนี้แทนได้ด้วยกราฟอัตราเร็วรอบมอเตอร์ที่เป็นผลการจำลองในรูปที่ 7.17 ในช่วง a ถึง b และได้รับการควบคุมปรับระดับอัตราเร็วกลับไปคงค่าที่ 1200 รอบต่อนาที ตามเดิมที่จุด c คล้ายผลจากการทดสอบจริง และในมอเตอร์ตัวที่ 2 และ 3 จุด a ถึง b ในรูปที่ 7.18 และ 7.19 อัตราเร็วมอเตอร์ของทั้งสองตัวสูงขึ้นพอประมาณ แต่ไม่เกินขอบเขตการควบคุมที่กำหนด ในช่วงเวลาที่มอเตอร์ตัวที่หนึ่งพยายามดึงอัตราเร็วให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย



รูปที่ 7.17 ผลการจำลองผลด้วยโหนดคล้ายการทดสอบจริง (วัตถุคิบนชนิดที่ 2)  
ของมอเตอร์ตัวบน



รูปที่ 7.18 ผลการจำลองผลด้วยโหนดคล้ายการทดสอบจริง (วัตถุคิบนชนิดที่ 2)  
ของมอเตอร์ตัวกลาง



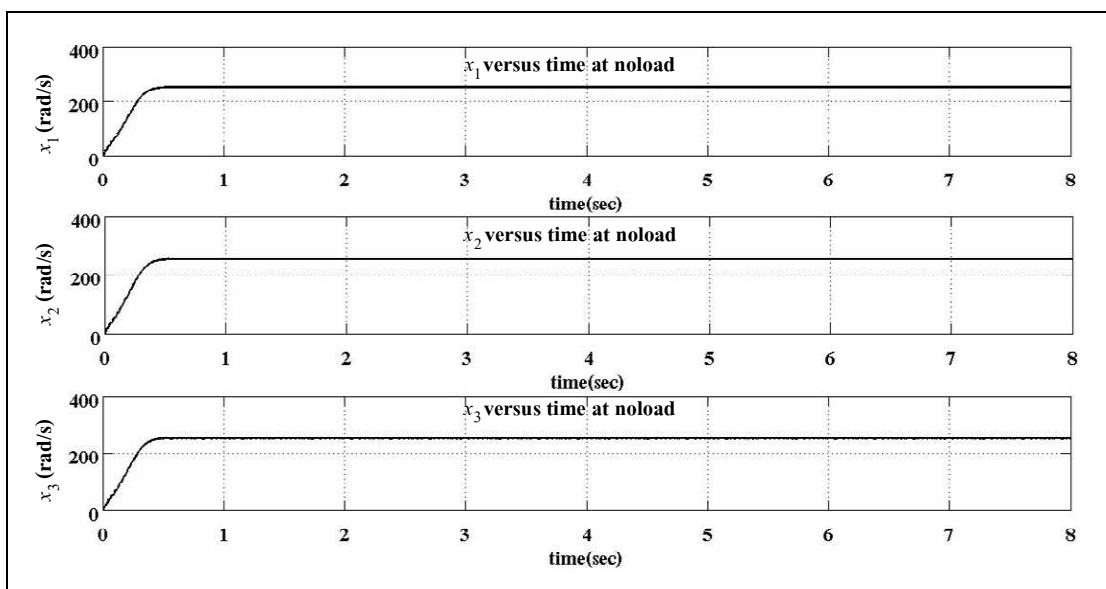
รูปที่ 7.19 ผลการจำลองผลด้วยโพลคัลการทดสอบจริง (วัตถุบิชนิดที่ 2) ของมอเตอร์ตัวล่าง

## 7.5 อภิปรายด้านเสถียรภาพ

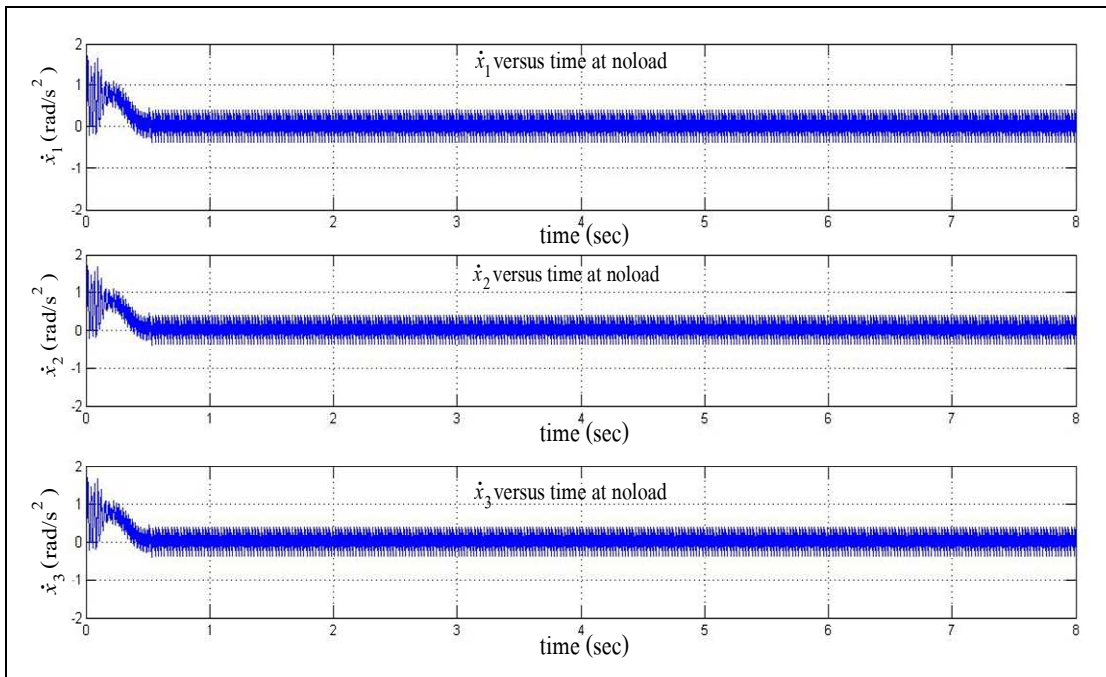
จากผลการทดสอบในหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า ระบบควบคุมสามารถควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัว ทำการสับพีชผลทางการเกษตรได้เป็นอย่างดี กล่าวคือ ระบบควบคุมพีชซีแบบจัดการตัวเองสามารถควบคุมความเร็วในการสับวัสดุพีชผลทางการเกษตร ในแต่ละชั้นที่มีโพลคัลไม่เท่ากัน ให้มีความเร็วเข้าใกล้ค่าเป้าหมายทุกชั้นใบมีด โดยสังเกตได้จากกราฟที่ได้นำเสนอไว้อย่างละเอียดในหัวข้อที่ 7.2 และ 7.3 ระบบควบคุมรักษาอัตราเร็วรอบมอเตอร์เข้าใกล้ค่าเป้าหมายมีความผิดพลาดอัตราเร็วไม่เกิน  $\pm 5\%$

ในการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุม โดยอาศัยวิธีระนาบเฟส (phase-plane) ซึ่งวิธีการนี้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในงานวิศวกรรมควบคุม เพื่อศึกษาผลกระทบของความไม่เป็นเชิงเส้นในระบบควบคุมป้อนกลับ (Bharat and Madhusudan, 2008) ในที่นี้กำหนดให้  $x_1$ ,  $x_2$  และ  $x_3$  แทนอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ตัวที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ และกำหนดให้  $\dot{x}_1$ ,  $\dot{x}_2$  และ  $\dot{x}_3$  แทนอัตราเร่งเชิงมุมของมอเตอร์ กราฟที่ได้จากการคำนวณตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นวิถีพลวัตมีจุดเริ่มต้นของกราฟที่จุดกำเนิด แนวระยะโคจรจะถูเข้าและวนซ้ำรอบค่าอ้างอิงอัตราเร็วที่ตั้งไว้ ในการจำลองผล phase-plane plot ได้ทำการจำลองผล ทั้งไม่ขับโพลคัลและขับโพลคัล กราฟที่ได้ตามลำดับดังนี้

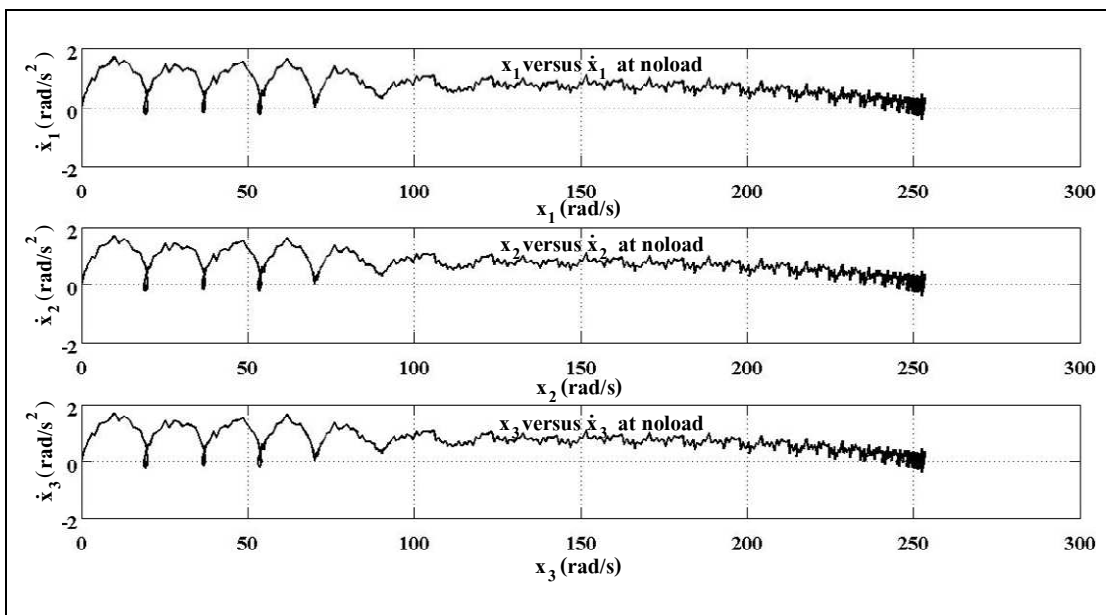
จากผลการจำลองควบคุมด้วยตัวควบคุมพีซีแบบจัดการตัวเอง ทั้งมีโหลดและไม่มีโหลด ในรูปที่ 7.20 เป็นกราฟอัตราเร็วเชิงมุมเทียบกับเวลาของมอเตอร์ทั้งสามตัวในขณะไม่มีโหลด ในรูปที่ 7.21 แสดงกราฟอัตราเร่งเทียบกับเวลา สังเกตเห็นว่าในช่วงเริ่มต้นอัตราเร่งมีค่าพุ่งสูงขึ้น และเมื่อมอเตอร์เข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่าเป้าหมายหรือค่าอ้างอิง อัตราเร่งจะเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยรอบค่า  $0 \text{ rad/s}^2$  เพียงแต่มีการแกว่งบ้างเล็กน้อย ในรูปที่ 7.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมกับอัตราเร็วเชิงมุม สังเกตว่ากราฟเริ่มต้นที่ศูนย์หรือจุดกำเนิด มีการโคจรลู่เข้าหาอัตราเร่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ขณะนั้นมอเตอร์เข้าสู่สภาวะสอดคล้องกับกราฟอัตราเร่งในรูปที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์สามารถเข้าถึงเป้าหมายที่อัตราเร็วเชิงมุมที่  $250 \text{ rad/s}$  ได้อย่างดี และในรูปที่ 7.23 แสดงส่วนขยายช่วงที่มอเตอร์ลู่เข้าหาจุดศูนย์กลาง จะสังเกตได้ว่าระบบมีพฤติกรรมแกว่งไกวเล็กน้อย รอบค่าอ้างอิงหรือเป้าหมายของการควบคุมอัตราเร็วที่กำหนด การแกว่งนั้นมีแนวโน้มลู่เข้าจุดอ้างอิงไม่วนออก และในสภาวะขับโหลดของมอเตอร์ทั้งสามตัว ที่แสดงในรูปที่ 7.24 7.25 และ 7.26 เช่นกัน สังเกตได้จากภาพขยายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมกับอัตราเร็วเชิงมุมในรูปที่ 7.27 สังเกตได้ว่าการแกว่งจะมีขอบเขตที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากขนาดของโหลดที่มอเตอร์แต่ละตัวได้รับ  $15 \text{ Nm}$  และ  $5 \text{ Nm}$  แต่แต่ละตัวแตกต่างกันตามลำดับ การแกว่งเป็นวงนี้จะวนเวียนซ้ำ และลู่เข้าไม่วนออก



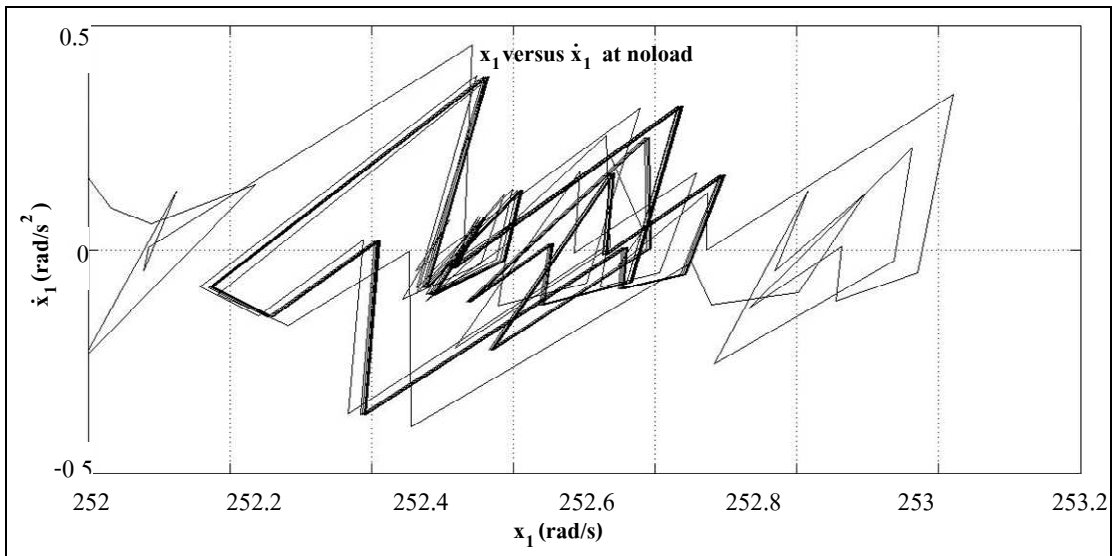
รูปที่ 7.20 ผลการจำลองอัตราเร็วเทียบกับเวลาขณะไม่มีโหลด



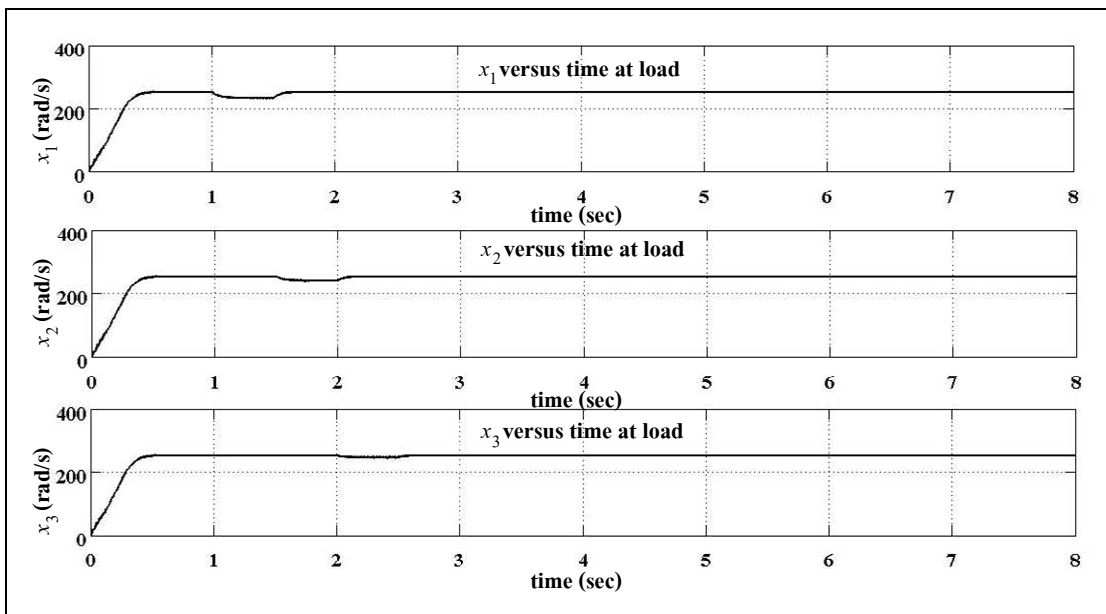
รูปที่ 7.21 ผลการจำลองอัตราเร่งเทียบกับเวลาขณะไม่มีโหลด



รูปที่ 7.22 ผลการจำลองอัตราเร็วเทียบกับอัตราเร่งขณะไม่มีโหลด

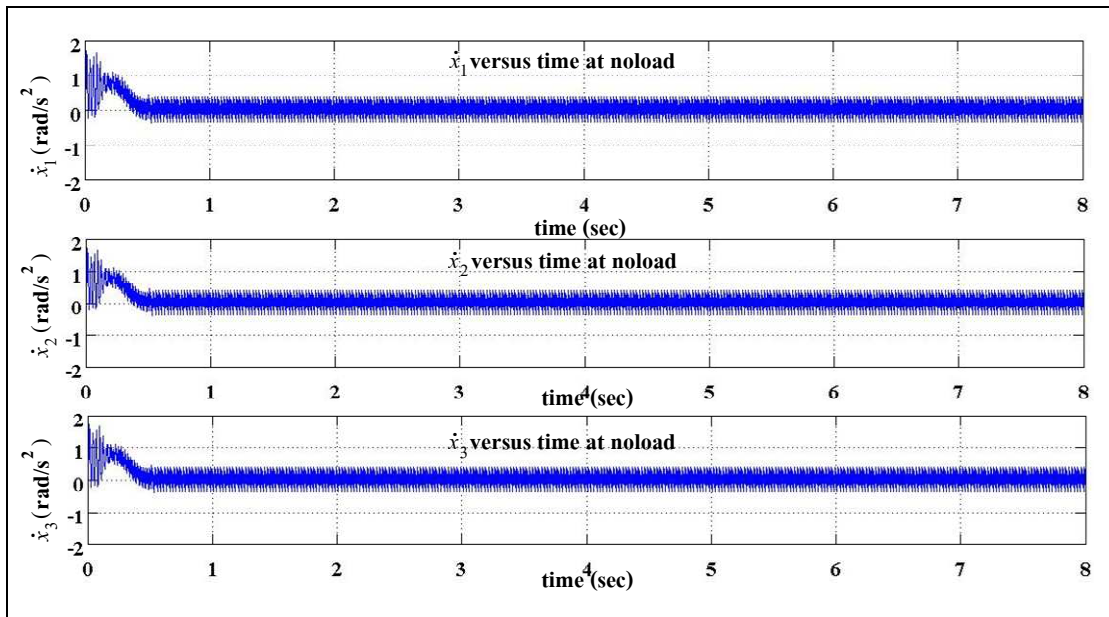


รูปที่ 7.23 ภาพขยายผลการจำลองอัตราเร็วเทียบกับอัตราเร่งขณะไม่มีโหลด

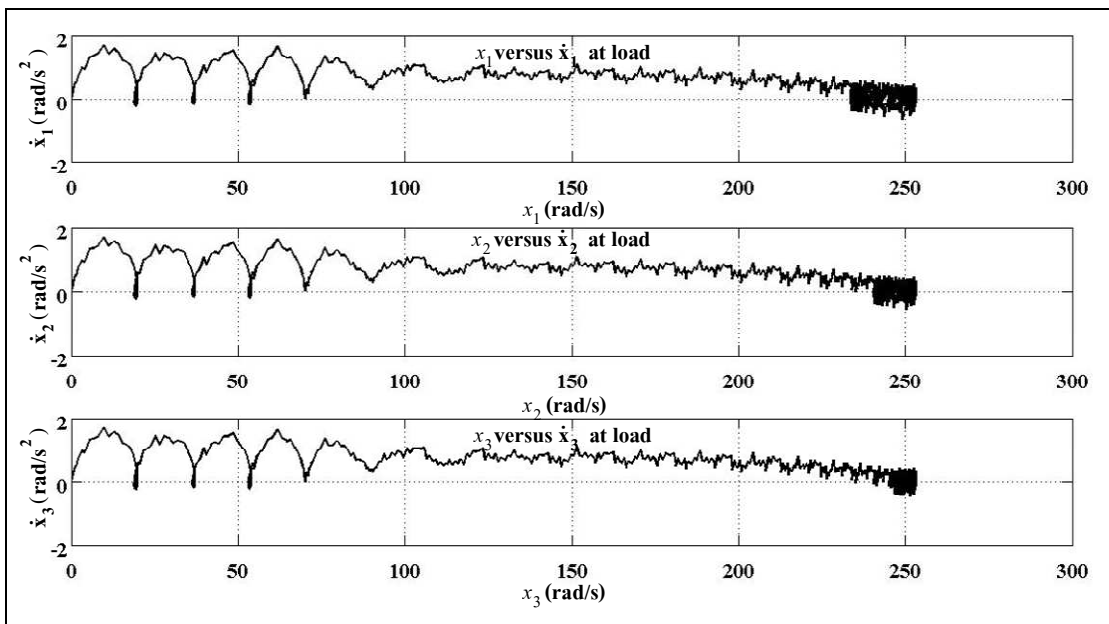


รูปที่ 7.24 ผลการจำลองอัตราเร็วเทียบกับเวลาขณะขับโหลด

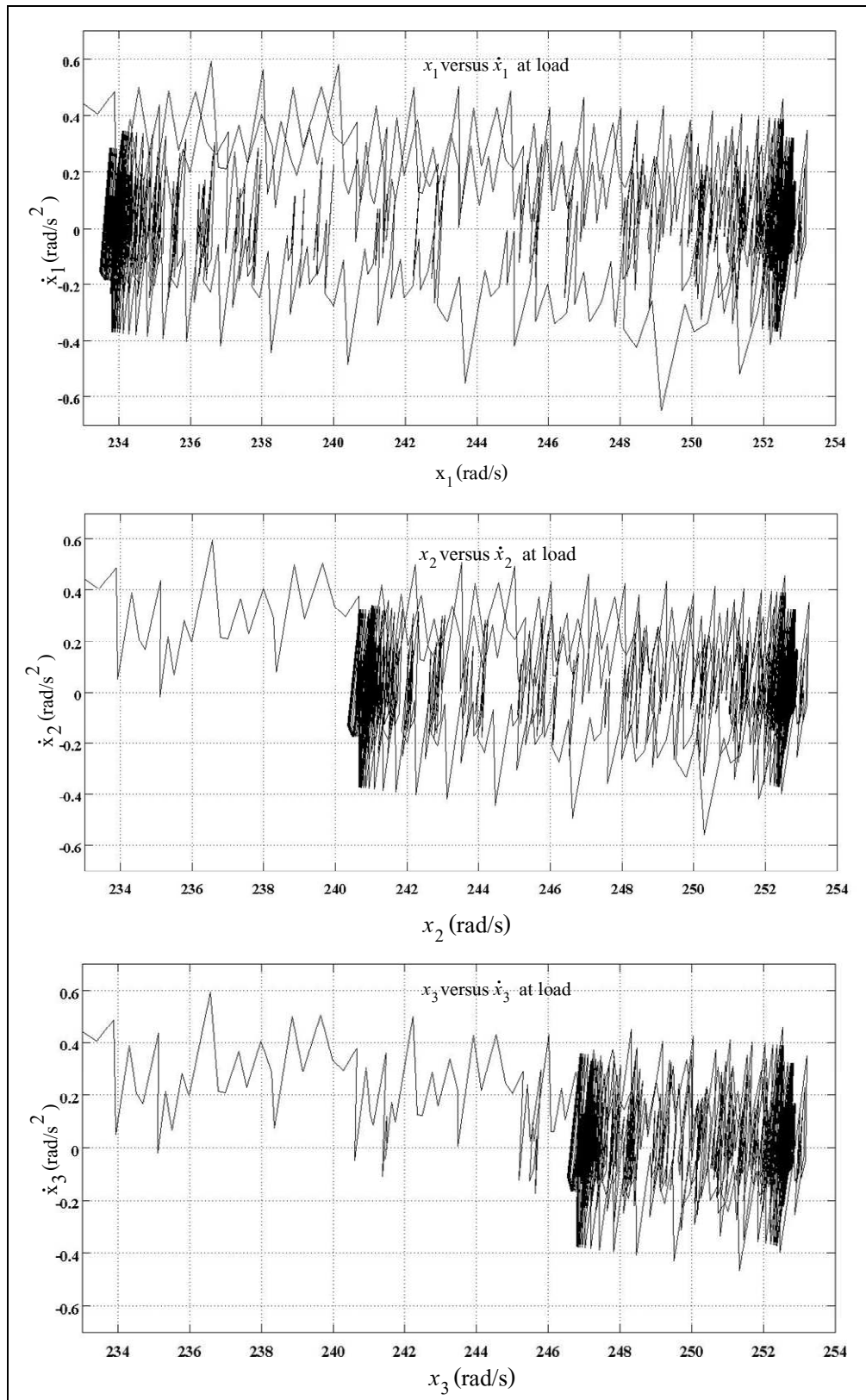




รูปที่ 7.25 ผลการจำลองอัตราเร่งเทียบกับเวลาขณะขับโหลด



รูปที่ 7.26 ผลการจำลองอัตราเร็วเทียบกับอัตราเร่งขณะขับโหลด



รูปที่ 7.27 ภาพขยายผลการจำลองอัตราเร็วเทียบกับอัตราเร่งขณะขับ โหลด

## 7.6 สรุป

จากการทดสอบระบบโดยรวมจะเห็นได้ว่า เครื่องสับพีชผลทางการเกษตรที่ประดิษฐ์ขึ้น ขับด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว 3 ตัวต่อขนานกัน ขับด้วยอินเวอร์เตอร์ตัวเดียว (Frecon 3.7 kW 17 A) การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ถูกควบคุมด้วยสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีชชีของงานวิจัยนี้ซึ่งใช้ชิพยูนิต ARM 7024 โดยรับสัญญาณป้อนกลับจากตัวตรวจรู้อัตราเร็วของมอเตอร์ วัสดุที่ใช้ทดสอบระบบประกอบด้วย มันท้าปะหลัง กะลามะพร้าวและใยมะพร้าว บันทึกข้อมูลการทำงานของตัวควบคุมพีชชีและอัตราเร็วรอบของมอเตอร์ทุก ๆ 0.16 วินาที ต่อ 1 จุดข้อมูลจากตัวตรวจรู้อัตราเร็ว ซึ่งการทดสอบเริ่มจากต่ออินเวอร์เตอร์เข้ามอเตอร์ตัวกลางและตัวล่าง ต่อระบบไฟ 220 V 50 Hz จากภายนอกเข้ามอเตอร์ตัวบน เนื่องจากมีชุดไบมีดที่มีระยะห่างจากศูนย์กลางมวลมากกว่าไบมีดอีก 2 ชุด แรงที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เพื่อให้เกิดแรงกระแทกสูง การออกตัวของมอเตอร์จำเป็นต้องใช้แรงบิดสูง ทำให้มอเตอร์ดึงกระแสสูงมากกว่าการเดินเครื่องในสภาวะปกติ หากใช้อินเวอร์เตอร์ในช่วงเริ่มออกตัวพร้อม ๆ กันเพื่อขับไบมีดทั้ง 3 ชุด ในทันทีทันใด อินเวอร์เตอร์จะต้องมีขนาดกำลังพิกัดสูงกว่าที่ใช้เป็นอย่างมาก และจะทำให้ต้นทุนการผลิตแบบสูงขึ้นมาก เมื่อมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว หมุนด้วยอัตราเร็วรอบเดียวกัน ได้ทำการตัดแหล่งจ่ายของมอเตอร์ตัวบนออก และเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งจ่ายจากอินเวอร์เตอร์ สาเหตุที่ไม่ออกตัวพร้อมกันและใช้การชิงโครโนซ่มอเตอร์กับอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธีนี้ถึงแม้จะแยกแหล่งจ่ายเนื่องจากระบบไฟฟ้าที่ใช้มาจากจุดเดียวกันของห้องปฏิบัติการ ซึ่งขนาดของสายส่งไม่โตพอที่จะสามารถทนกระแสสูงได้ การเดินเครื่องมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวพร้อมกันอาจทำให้ระบบไฟฟ้าภายในห้องปฏิบัติการเสียหายได้ เมื่อมอเตอร์ทั้งสามตัวถูกควบคุมให้มีอัตราเร็วเข้าสู่ค่าเป้าหมาย ได้เทวัตุดิบ 3 ชนิด ที่เป็นสภาวะระบบกวนลงไปในระบบ ผลจากการทดสอบระบบจริงจะเห็นได้ว่า ตัวควบคุมพีชชีแบบจัดการตัวเองพยายามรักษาระดับการควบคุมอัตราเร็วรอบมอเตอร์ทั้งสามตัวให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย แม้ว่าในบางกรณีจะเกิดสภาวะระบบกวนจากภาระกรรมที่ทำให้มอเตอร์บางตัวเสียการควบคุม แต่ระบบก็พยายามจะรักษาระดับการควบคุมมอเตอร์ตัวที่เหลือให้มีอัตราเร็วรอบใกล้เคียงค่าเป้าหมายได้ ค่าเป้าหมายในการทดสอบนี้คือระดับอัตราเร็วมอเตอร์ที่ 1200 รอบต่อนาที หากใช้วิธีควบคุมกระแสเพื่อรักษาค่าเป้าหมายดังกล่าว ต้องใช้อุปกรณ์และเทคนิควิธีการที่ยุ่ยากกว่านี้มาก ซึ่งอาจจะเหมาะสมกับงานที่ต้องการควบคุมแรงบิด แต่สำหรับการวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะควบคุมอัตราเร็วรอบมอเตอร์ของเครื่องสับพีชที่เป็นเครื่องมือวิจัยตั้งต้น และเพื่อศึกษาถึงผลตอบสนองของการคงค่าอัตราเร็วที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ จึงได้ทำการจำลองผลการใส่ภาระกรรมในกรณีต่าง ๆ เลียนแบบการทดสอบจริง ซึ่งผลจากการจำลองระบบและการทดสอบสอดคล้องกัน จึงอาจกล่าวได้ว่ามอเตอร์เฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัวที่จ่ายพลังงานจาก

อินเวอร์เตอร์เพียงตัวเดียวควบคุมด้วยตัวควบคุมพีซีแบบจัดการตัวเอง เป็นวิธีที่เหมาะสม และใช้ได้ดีเป็นอย่างดี ในการควบคุมการทำงานของเครื่องสับพีชผลทางการเกษตรของการวิจัยนี้

## บทที่ 8

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 8.1 บทสรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการศึกษาวิจัยและพัฒนาองค์ความรู้ และเทคโนโลยีการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่มีพิคกำลังต่ำ ๆ และต่อขนานกันหลายตัว ซึ่งการขับเคลื่อนดำเนินการผ่านอินเวอร์เตอร์เพียงตัวเดียวได้อย่างประสบความสำเร็จ ถึงแม้ว่าแนวคิดการขับมอเตอร์หลายตัวต่อขนานกันด้วยอินเวอร์เตอร์ตัวเดียวเป็นแนวคิดที่ได้มีการใช้ประโยชน์จริงมานานกว่า 20 ปีแล้วก็ตาม แต่ก็เป็นการใช้งานในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ระบบรางที่ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีพิคหลายร้อยแรงม้า แนวคิดดังกล่าวยังไม่เคยได้รับการนำมาใช้ประโยชน์กับมอเตอร์เฟสเดียวพิคกำลังต่ำมาก่อน การพัฒนาองค์ความรู้และเทคโนโลยีจึงต้องตั้งต้นใหม่ นับตั้งแต่การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับมอเตอร์เฟสเดียวที่ต่อขนานหลายตัว แบบจำลองที่ใช้กับงานวิจัยนี้อาศัยระบบอ้างอิง dq ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

เนื่องจากระบบขับเคลื่อนในองค์รวมเป็นระบบไม่เป็นเชิงเส้น การพัฒนาองค์ความรู้และเทคโนโลยีไม่สามารถพึ่งพาวิธีนัยทั่วไป (general methods) ของระบบเชิงเส้นได้ จึงต้องพึ่งพาการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ และได้ดำเนินการจำลองผลหลากหลายกรณี เพื่อศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลวัตของระบบขับเคลื่อน ดังที่ได้อธิบายรายละเอียดการดำเนินงาน การวิเคราะห์ผลและอภิปรายไว้ในบทที่ 3 ความรู้ที่เกิดขึ้นได้นำมาใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเอง (self-organizing fuzzy controller) การออกแบบระบบควบคุมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการในแนวศึกษานัย (heuristics) โดยอาศัยข้อมูลความรู้ที่เป็นผลของการจำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ วิเคราะห์พฤติกรรมของมอเตอร์โดยอาศัยผลการจำลองสถานการณ์ ซึ่งอัตราเร็วรอบของมอเตอร์ในงานวิจัยนี้จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ความถี่ดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงไปตามวัฏจักรการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่รับคำสั่งการควบคุมมาจากการประมวลผลของตัวควบคุม ตัวควบคุมฟัซซีแบบจัดการตัวเองมีโครงสร้างประกอบด้วย ชุดปฏิบัติการฟัซซีพีเคชัน ฐานความรู้ชั้นแรก ฐานความรู้ชั้นที่สอง ลอจิกเพื่อการตัดสินใจชั้นแรก ลอจิกเพื่อการตัดสินใจชั้นที่สอง ชุดปฏิบัติการดีฟัซซีพีเคชัน กฎการควบคุมมี 2 อินพุต และ 1 เอาต์พุต ตัวควบคุมแบบนี้แตกต่างจากตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบธรรมดา กล่าวคือ ระบบควบคุมจะทำการประมวลผลด้วยกระบวนการฟัซซีอีกชั้นหนึ่งที่มีความละเอียดมากกว่า และนำผลที่ได้ไปประมวลผลร่วมกับ

ดีพีซีฟายในชั้นแรก เพื่อปรับเปลี่ยนค่าการควบคุมให้มีความผิดพลาดลดลง ผลในการควบคุมที่ได้จึงแม่นยำยิ่งขึ้น

ในการจำลองผลระบบขับเคลื่อนที่มีการควบคุมป้อนกลับ ได้กำหนดโครงสร้างโพลดสำหรับการจำลองผลหลากหลายกรณี จนเป็นที่แน่ใจได้ว่า ระบบควบคุมป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมพีซีแบบจัดการตัวเอง จะสามารถทำงานได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังได้ข้อสรุปด้วยว่า มีความจำเป็นในทางปฏิบัติที่จะต้องติดตั้งอุปกรณ์นิรภัยตัดมอเตอร์ออกจากแหล่งจ่ายกำลังในกรณีฉุกเฉินที่โพลดมีขนาดมากเกินไป เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับตัวมอเตอร์ เครื่องจักรกล และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวไว้โดยละเอียดในบทที่ 5

องค์ความรู้และเทคโนโลยีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ได้กล่าวข้างต้น ได้รับการประยุกต์กับเครื่องสับพีชผลทางการเกษตร การวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ออกแบบและพัฒนาใบมีด พร้อมทั้งอุปกรณ์จับยึดใบมีดที่เป็นองค์ประกอบของเครื่องจักร ใช้ในการย่อยวัสดุพีชผลทางการเกษตร โดยได้แบ่งขั้นตอนการย่อยวัสดุพีชผลทางการเกษตรออกเป็น 3 ขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นตอนการกระแทกให้ชิ้นวัสดุแตกออกจากกัน ขั้นตอนการสับ ขั้นตอนการเนียน วัสดุที่นำมาทำใบมีดในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ผลิตมาจากเหล็กเชื่อมสภาพที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ซึ่งเหล็กชนิดนี้จะมีความแข็งแต่ไม่เหนียวแตกหักง่ายเมื่อได้รับแรงกระแทก การที่จะนำเหล็กดังกล่าวมาทำการขึ้นรูปเป็นใบมีดสำหรับเครื่องจักรกลของงานวิจัยนี้ จำเป็นจะต้องได้รับการปรับแปรให้มีความแข็งและเหนียวด้วยกระบวนการตามที่ได้จดสิทธิบัตรการประดิษฐ์ เลขที่คำขอ 0701000717 และทำการขึ้นรูปใบมีดตามสิทธิบัตรการประดิษฐ์ชุดใบมีดควางแบบเป็นพวง เลขที่คำขอ 0701000718 สิทธิบัตรการประดิษฐ์ใบมีดสับและกระบวนการขึ้นรูปใบมีดสับ เลขที่คำขอ 0701000717 สิทธิบัตรการประดิษฐ์ปลอกยึดใบมีดสับแบบปรับมุมได้และชุดใบมีดสับแบบปรับมุมได้ เลขที่คำขอ 0701000719 สิทธิบัตรการประดิษฐ์ใบรองสับ เลขที่คำขอ 0701000720 และสิทธิบัตรการประดิษฐ์ใบมีดเนียน เลขที่คำขอ 0701001328

การทดสอบระบบควบคุมเครื่องสับพีชผลทางการเกษตร ซึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นเครื่องสับพีช มอเตอร์เฟสเดียว 3 ตัวต่อขนานกัน อินเวอร์เตอร์ Frecon 3.7kW-17A และไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7024 การทดสอบเริ่มจากต่ออินเวอร์เตอร์เข้ามอเตอร์ตัวกลาง และตัวล่าง ต่อระบบไฟ 220 V 50 Hz จากภายนอกเข้ามอเตอร์ตัวบนเนื่องจากมีชุดใบมีดที่มีระยะห่างจากศูนย์กลางมวลมากกว่าใบมีดอีก 2 ชุด แรงที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เพื่อให้เกิดแรงกระแทกสูง การออกตัวของมอเตอร์จำเป็นต้องใช้แรงบิดสูงทำให้มอเตอร์ดึงกระแสสูงมากกว่าการเดินเครื่องในสภาวะปกติ หากใช้อินเวอร์เตอร์ในช่วงเริ่มออกตัวพร้อม ๆ กันเพื่อขับใบมีดทั้ง 3 ชุดในทันทีทันใด อินเวอร์เตอร์จะต้องมีขนาดกำลังพิกัดสูงกว่าที่ใช้เป็นอย่างมาก และจะทำให้ต้นทุนการผลิตแบบสูงชันมาก เมื่อมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว หมุนด้วยอัตราเร็วรอบเดียวกัน ได้ทำการ

ตัดแหล่งจ่ายของมอเตอร์ตัวบนออก และเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งจ่ายจากอินเวอร์เตอร์ สาเหตุที่ไม่ออกตัวพร้อมกันและใช้การชิ่งโครไนซ์มอเตอร์กับอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธีนี้ถึงแม้จะแยกแหล่งจ่ายเนื่องจากระบบไฟฟ้าที่ใช้มาจากจุดเดียวกันของห้องปฏิบัติการ ซึ่งขนาดของสายส่งไม่โตพอที่จะสามารถทนกระแสสูงได้ การเดินเครื่องมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวพร้อมกันอาจทำให้ระบบไฟฟ้าภายในห้องปฏิบัติการเสียหายได้ การทดสอบได้ดำเนินการสับมันสำปะหลัง กะลามะพร้าวปนด้วยโยมะพร้าว และกามมะพร้าว พร้อมทั้งได้กำหนดโครงรูปโหลดเลียนแบบโหลดจริงที่มอเตอร์จะได้รับ ปรากฏผลไว้ในบทที่ 7 การดำเนินงานของเครื่องจักรและการควบคุมระบบเป็นไปตามความคาดหมายอย่างน่าพึงพอใจมาก กล่าวคือ เครื่องจักรสามารถสับวัตถุดิบได้อย่างที่ต้องการ ระบบควบคุมแบบพีซีสามารถคุมค่าอัตราเร็วรอบมอเตอร์ได้ตามความคาดหวังที่ 1200 รอบต่อนาที โดยมีความผิดพลาดจำกัดในย่าน  $\pm 5\%$  เป็นไปตามข้อกำหนดสมรรถนะ ตลอดจนไม่เคยเกิดการขัดข้องใด ๆ เลย ตลอดการทดสอบทุกครั้ง

## 8.2 ข้อเสนอแนะ

8.2.1 องค์ความรู้ที่ได้สามารถนำไปประยุกต์กับงานในรูปลักษณะอื่น ๆ ให้เกิดประโยชน์ เช่น ระบบควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ในงานควบคุมการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าได้ และเครื่องมือวิจัยที่ได้ประดิษฐ์คิดค้นขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรกลการเกษตรได้หลากหลาย เช่น เครื่องบด เครื่องสับต่าง ๆ ก่อให้เกิดผลต่อการพัฒนากระบวนการผลิตในภาคเกษตรกรรมขนาดเล็กและขนาดกลางได้เป็นอย่างดี

8.2.2 ขณะเครื่องจักรทำงานมีการสั่นมาก และเสียงดังมาก จึงควรมีการวิจัยพัฒนาเพื่อลดการสั่นสะเทือนทางกล และลดความดังของเสียง

8.2.3 ควรมีการวิจัยพัฒนาเพื่อสร้างอินเวอร์เตอร์ที่ทนกระแสได้สูง จากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เพราะจะใช้งานได้สะดวกกว่าที่จะใช้อินเวอร์เตอร์สำเร็จรูป อีกทั้งการซ่อมบำรุงจะทำได้ง่ายกว่า

8.2.4 ในทางทฤษฎี ควรมีการศึกษาวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมป้อนกลับนี้ และเนื่องจากกฎพีซีซีที่ออกแบบไว้ในขั้นนี้มี 2 ชุด ชุดละ 121 ข้อ ซึ่งถือว่ามีย่านมาก จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อการมีนิมซ์จำนวนกฎ

## รายการอ้างอิง

- สิงหนาท พวงจันทร์แดง. (2535). การแปรรูปอาหาร 1. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. คณะวิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น.
- เกษมสันต์ แสงเงิน ขวัญ ทิพย์แสง และ อาทร มาตรา. (2549). เครื่องสับมันสำปะหลังเพื่อผลิตมันเส้นอาหารสัตว์. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. คณะวิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรวิทยาคาร วิทยาเขตขอนแก่น.
- Ando, I., Sazawa, M., and Ohishi, K. (2004). High efficient speed control of parallel-connected induction motors with unbalanced load condition using one inverter. **IEEE 30<sup>th</sup> Annual Conf. on Industrial Electronics Society**. 2: 1361-1366.
- Calcev, G. (1998). Some remarks on the stability of Mamdani fuzzy control system. **IEEE Trans on Fuzzy System**. 6(3): 436-442.
- Correa, M.B.R., Jacobina, C.B., Lima, A.M.N., and da Silva, E.R.C. (2004). Vector control strategies for single-phase induction motor drive systems. **IEEE Trans on Industry Applications**. 51(5): 1073-1080.
- Hwang, C.J. and Yen., T.T. (1996). A design of fuzzy self-organizing controller. **Proc. IEEE Conf. on Fuzzy Systems**. 3: 1567-1572.
- Jang, D.H. (1994). Voltage, frequency, and phase-difference angle control of PWM inverters-fed two-phase induction motors. **IEEE Trans on Power Electronics**. 9(4): 377-383.
- Krause, P.C., Wasynczuk, O., and Sudhoff, S.D. (1995). **Analysis of Electrical Machinery**. Piscataway, NJ: IEEE Press.
- Krishnan, R. (2001). **Electric Motor Drive Modeling Analysis and Control**. USA: Prentice Hall.
- Lai, M.F., Chang, C., and Chiou, W.Y. (1997). Design of fuzzy logic controller for an induction motor speed drive. **Proceedings of SICE**: 1071-1076.
- Mademlis, C., Kioskeridis, I., and Theodoulidis, T. (2005). Optimization of single-phase induction motors-Part I: Maximum energy efficiency control. **IEEE Transa on Energy Conversion**. 20(1): 187-195.



- Mamdani, E.H. (1977). Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. **IEEE Trans on Computers**. C-26(12): 1182-1191.
- Matsumoto, Y., Osawa, C., Mizukami, T., and Ozaki, S. (1998). A stator-flux-based vector control method for parallel-connected multiple induction motors fed by a single inverter. **Proceeding of APEC**. 2: 575-580.
- Matsumoto, Y., Ozaki, S., and Kawamura, A. (2001). A novel vector control of single-inverter multiple-induction-motors drives for Shinkansen traction system. **Proc. IEEE Conf. Applied Power Electronics**. 1: 608-614.
- Matsuse, K., Kouno, Y., Kawai, H., and Yokomizo, S. (2002). A speed-sensorless vector control method of parallel-connected dual induction motor fed by a single inverter. **IEEE Trans on Industry Applications**. 38(6): 1566-1571.
- Matsuse, K., Kouno, Y., Kawai, H., and Oikawa, J. (2004). Characteristics of speed sensorless vector controlled dual induction motor drive connected in parallel fed by a single inverter. **IEEE Trans on Industry Applications**. 40(1): 153-161.
- Ong, C.M. (1998). **Dynamic simulation of Electric machinery using MATLAB/SIMULINK**. USA: Prentice Hall.
- Rahim, N.A. (2002). Operating of single-phase induction motor as two-phase motor. **IEEE Trans on Industry Applications**. 38(6): 1566.
- Ruxi, W., Yue, W., Qiang, D., Yanhui, H., and Zhaoan, W. (2006). Study of control methodology for single inverter parallel connected dual induction motors based on the dynamic model. **Proc. IEEE Conf. Power Electronics Specialists Conference**: 1-7.
- Sujitjorn, S. (1995). Fuzzy logic and control system. **Suranaree J. Sci. Technol**. 2: 171-196.
- Wu, B., Dewan, S.B., and Sen, P.C. (1988). A modified current source inverter for a multiple induction motor drive system. **IEEE Trans on Power Electronics**. 3(1): 10-16.
- Wu, B., Dewan, B.S., and Sen, P.C. (1988). A modified current-source inverter (MCSI) for a multiple induction motor drive system. **IEEE Trans on Power Electronics**. 9(4): 377-383.
- Xu, C. and Yung, C.S. (2005). Design of multilevel fuzzy controller for nonlinear systems and stability analysis. **IEEE Trans on Fuzzy System**. 13(6): 761-778.

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบเหล็กจากห้องปฏิบัติการ

ที่ ศธ 5632/..... 2142

หน้าที่ 1/1



๑๓ มิถุนายน 2550

เรียน ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร. สราวุฒิ สุจิตจร

## รายงานผลการทดสอบ

ห้องปฏิบัติการ ทดสอบวัสดุ

โครงการ งานวิจัยการขับเคลื่อนมอเตอร์  
เฟสเดียวที่ต่อขนานกันหลายตัว

หมายเลขใบขอรับบริ ฝปอMT012-12/2550

หมายเลขใบนำส่งตัวอย่าง MT012-12/2550

วันที่รับตัวอย่าง 8 มิถุนายน 2550

วันที่ทดสอบตัวอย่าง 11 มิถุนายน 2550

ลำดับที่	ลักษณะหลัก	Yield Point (Kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (Kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	หมายเหตุ
1	เหล็กตะไบขนาด 6.5mm x 25mm	32.33	32.88	1.10	-
2	เหล็กตะไบขนาด 6.5mm x 25mm	35.95	46.88	-	ขาดนอก Gauge Length

(นายศรีทรา โปธิสว่าง)

วิศวกรผู้ควบคุมการทดสอบ

11 มิถุนายน 2550

(นายถาพิทย์ จุไรรัตน์พร)

ผู้รับรองผลการทดสอบ

11 มิถุนายน 2550

(รองศาสตราจารย์ เจริญไกร ไตรสาร)

รองผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

รับรองรายงานผลการทดสอบ

13 มิถุนายน 2550

(อ.เจริญ ดร. ชรงค์ อัครพัฒนากุล)

ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

รับรองรายงานผลการทดสอบ

13 มิถุนายน 2550

\*รายงานผลการทดสอบใช้ได้เฉพาะตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น

\*ห้ามแยกถ่ายสำเนาใบรายงานผลการทดสอบ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ (044) 223000 โทรสาร (044) 224070

**SURANAREE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

111 UNIVERSITY AVENUE, SUB DISTRICT SURANAREE, MUANG DISTRICT, NAKHON RATCHASIMA 30000, THAILAND Tel. (044) 223000 Fax. (044) 224070



รายงานผลการทดลอง

เรียน ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร. สราวุฒิ สุจิตจร

ห้องปฏิบัติการ ทดสอบวัสดุ

วันที่ 7 มิถุนายน 2550

โครงการ งานวิจัยการ  
ขับเคลื่อนมอเตอร์เฟสเดียวที่ต่อ  
ขนานกันหลายตัว

ชิ้นงานตะไบ ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึง ผ่านกระบวนการ ชุบแข็งและอบคืนไฟ  
และได้ทดสอบค่าความแข็ง ได้ค่าดังนี้

55 58 56 **HRC**

(นาย คัมภีร์ ศิริคะเนรัตน์)

นายช่างเทคนิค

13 มิถุนายน 2550

## ภาคผนวก ข

โปรแกรมพีซีแบบจัดการตัวเองสำหรับควบคุมการขับเคลื่อน  
มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ต่อขนานกัน 3 ตัวด้วยอินเวอร์เตอร์ชุดเดียว

**โปรแกรมพีซีแบบจัดการตัวเองสำหรับควบคุม  
การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ต่อขนานกัน 3 ตัว  
ด้วยอินเวอร์เตอร์ชุดเดียว**

โปรแกรมพีซีแบบจัดการตัวเองสำหรับควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ต่อขนานกัน 3 ตัว  
ด้วยอินเวอร์เตอร์ชุดเดียว ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นโดยโปรแกรมภาษาซีสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์  
ARM7 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

```
//=====
===
// โปรแกรมพีซีแบบจัดการตัวเองนี้พัฒนาด้วยโปรแกรมภาษาซีสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7
// โปรแกรมนี้สำหรับทำงานบนบอร์ดทดลองรุ่น "ET-BASE ARM ADUc7024"
// รายละเอียดของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ
// ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ : Analog Device ADUc7024
// ความถี่สัญญาณนาฬิกา : 32.768 KHz
// ความถี่ในการประมวลผล : 41.78 MHz (With PLL)
// การตั้งค่า CD (Clock Divider) : CPU Clock Divider = 0
//=====
===
#include <ADUc7024.h> // สำหรับเลือกใช้งาน ADUc7024 MPU รีจิสเตอร์
#include <stdio.h> // สำหรับเลือกใช้งานคำสั่ง printf
#include <math.h> // สำหรับเลือกใช้งานคำสั่งทางคณิตศาสตร์

#define EN_DECODE_TB_ROWS 16 // กำหนดค่าคงที่ Fuzzy Encoder Table จำนวน 16 แถว
#define EN_DECODE_TB_COLS 11 // กำหนดค่าคงที่ Fuzzy Encoder Table จำนวน 11 หลัก
#define FUZ_SET_TB_ROWS 12 // กำหนดค่าคงที่ Fuzzy Set Table จำนวน 12 แถว
#define FUZ_SET_TB_COLS 12 // กำหนดค่าคงที่ Fuzzy Set Table จำนวน 12 หลัก
#define Hold_Speed 4.0 // กำหนดค่าคงที่ Hold Speed สำหรับรักษาระดับแรงดัน 4.0 V
#define Fuzzy_Gain 0.5 // กำหนดค่าคงที่ Fuzzy Gain ระหว่าง [0.1 ถึง 10.0]
// สำหรับปรับอัตราขยายของค่าที่ได้จากฟัซซี่

#include "ADUc7042_Srl.c" // เพิ่มส่วนของโปรแกรมน้อย "การสื่อสารอนุกรม"
#include "ADUc7042_ADC.c" // เพิ่มส่วนของโปรแกรมน้อย "การแปลงแอนาล็อกเป็นดิจิตอล"
#include "ADUc7042_DAC.c" // เพิ่มส่วนของโปรแกรมน้อย "การแปลงดิจิตอลเป็นแอนาล็อก"
#include "CM_Fuzzy.c" // เพิ่มส่วนของโปรแกรมน้อย "กระบวนการทาง Fuzzy"
```

```

//=====
===
double Chopping_Machine_Fuzzy(double speed_motor0,double speed_motor1,double
speed_motor2);
    // ประกาศโปรแกรมย่อย "Chopping Machine Fuzzy"
    // Output: ผลการทำงานจะได้แรงดัน V_Out ซึ่งเป็น
        // แรงดันสำหรับสั่งการให้อินเวอร์เตอร์ทำงาน
        // Input: ค่าของตัวแปรที่ป้อนให้กับโปรแกรมย่อยนี้ คือ
        // ค่าความเร็วของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว
double sMotor0, sMotor1, sMotor2;    // ประกาศตัวแปรสำหรับเก็บค่าความเร็วของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว
คือ
        // Speed Motor_0, Speed Motor_1 และ Speed Motor_2
double V_Oper, DAC_Out;    // ประกาศตัวแปร Operation Voltage สำหรับเก็บค่าแรงดันที่
        // ต้องการให้อินเวอร์เตอร์ทำงาน (สำหรับการทดสอบให้
        // ทำงานที่ 4.0 โวลต์) และตัวแปร DAC Voltage Output
        // สำหรับเก็บค่าแรงดันเพื่อสั่งการให้อินเวอร์เตอร์ทำงาน
//=====
===
int main(void)
{
    Initial_Serial();    // เรียกโปรแกรมย่อยเพื่อตั้งค่าการสื่อสาร
                        // อนุกรมเป็น "9600,n,8,1" เพื่อแสดง
                        // การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

    Initial_ADC();    // ตั้งค่าเริ่มต้นเพื่อ การทำงานของส่วน ADC
    Initial_DAC();    // ตั้งค่าเริ่มต้นเพื่อ การทำงานของส่วน DAC
    printf(" CM Fuzzy Control \n\0");    // แสดงข้อความเมื่อเริ่มต้นการทำงาน
//-----
----
    New_Start:    // ขั้นตอนแรก: เมื่อเปิดระบบต้องให้มอเตอร์ทั้ง 3 ตัวทำงานที่เต็มกำลัง
        // ก่อนและกำหนดให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ 80% ไว้ก่อน
    V_Oper = 4.0;    // กำหนดค่า V_Oper เพื่อสั่งการให้อินเวอร์-
                        // เตอร์ทำงานที่ 4 โวลต์ หรือ 80%
    DAC_Out = (V_Oper / 2.0) * 4096 / 2.5;    // แปลงค่า V_Oper เป็นค่าเพื่อส่งให้
                        DAC
                        // หร 2 เนื่องจากค่า ADC สูงสุดที่
                        // ARM7 ส่งออกได้ คือ 2.5
                        // โวลต์ แต่การสั่งการจะ
                        // กำหนดค่าสูงสุดที่ส่งให้
                        // อินเวอร์เตอร์เป็น 5 โวลต์

```

```

//      จึงมีการหารค่าลง
//      คูณ 4096 คือ ค่าของ DAC 12 บิต
//      หาร 2.5 คือ ค่าแรงดันอ้างอิงสูงสุด
DAC0DAT = ((int)DAC_Out)<<16; // ส่งค่าไปยังหน่วย DAC ในรูปของตัวแปรแบบ
//      อินทิจอร์เฉพาะ 16 บิตล่าง

//-----
-----

Wait_Start:
sMotor0 = 2.0 * ADC_Read(2); // อ่านค่า DAC จากมอเตอร์ตัวที่ 2 และคูณสอง
//      เนื่องจากค่า DAC สูงสุดที่อ่านได้ 2.5 โวลต์
printf("Wait Start to 1200 rpm \n"); // แสดงข้อความเพื่อรอให้สตาร์ทมอเตอร์ทั้งสามตัว
//      และลดกำลังลงเป็น 4 โวลต์หรือ
//      80%
Delay(500000); // หน่วงเวลา
if (sMotor0>=4.0) goto Wait_Start; // ในกรณีที่ลดกำลังมอเตอร์ยังไม่ได้ให้กลับไป
//      ยังรูป "Wait_Start." ก่อน

while(1) // วนลูปไม่รู้จบ
{
sMotor0 = 2.0 * ADC_Read(2); // อ่านค่าความเร็วมอเตอร์ 0 จาก DAC ช่อง 2
sMotor1 = 2.0 * ADC_Read(4); // อ่านค่าความเร็วมอเตอร์ 1 จาก DAC ช่อง 4
sMotor2 = 2.0 * ADC_Read(6); // อ่านค่าความเร็วมอเตอร์ 2 จาก DAC ช่อง 6
V_Oper = Chopping_Machine_Fuzzy(sMotor0,sMotor1,sMotor2);
//      คำนวณค่าพีชี่จากความเร็วมอเตอร์ทั้ง
//      สาม
DAC_Out = (V_Oper / 2.0) * 4096 / 2.5;
//      แปลงค่า V_Oper เป็นค่าเพื่อส่งให้ DAC
DAC0DAT = ((int)DAC_Out)<<16; // ส่งค่าไปยังอินเวอร์เตอร์เพื่อสั่งการ
printf(" #Vi:%6.4f,%6.4f,%6.4f",sMotor0,sMotor1,sMotor2);
//      แสดงค่าพารามิเตอร์ความเร็วมอเตอร์ 0,
//      1, 2
printf(" #Vo:%6.4f(%4.2f)\n",V_Oper,V_Oper/2.0);
//      แสดงค่าพีชี่ที่คำนวณได้
Delay(500000); // หน่วงเวลา
}

//=====
===
// โปรแกรมพีชี่แบบจัดการตัวเองสำหรับควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ต่อขนานกัน 3 ตัว
// ด้วยอินเวอร์เตอร์ชุดเดียว

```



```

// อินพุต: ความเร็วมอเตอร์ 0, 1, และ 2
// เอาต์พุต: ค่าแรงดันสำหรับสั่งการอินเวอร์เตอร์ขนาด 0 to 5 โวลต์
//=====
===
double Chopping_Machine_Fuzzy( double speed_motor0,
                               double speed_motor1,
                               double speed_motor2 )
{
  double speed_error0 = 0.0; // กำหนดตัวแปร Speed_Error0 เป็น 0.0
  double error_first0 = 0.0; // กำหนดตัวแปร Error_First0 เป็น 0.0
  double V_Oper = 0.0; // กำหนดตัวแปร V_Oper เป็น 0.0
  double speed_motor_all, control_signal, Vcon;
  double a1, a2, speed_error1, error_first1;

  speed_motor_all = (speed_motor0 + speed_motor1 + speed_motor2) / 3.0;
  speed_error1 = (speed_motor_all - Hold_Speed) / Hold_Speed;
                // คำนวณค่าความเร็วเฉลี่ยของมอเตอร์ 3 ตัว
                // คำนวณค่าความเร็วมอเตอร์ที่เบี่ยงจากความเร็ว
                // มอเตอร์ที่ต้องการรักษาไว้ (Hold_Speed)

  a1 = fuzzy_error(speed_error1); // หาค่า a1 จากโปรแกรม fuzzy_error
  a2 = fuzzy_change_in_error((speed_error1 - speed_error0));
                // หาค่า a2 จากโปรแกรม fuzzy_change_in_error

  speed_error0 = speed_error1; // ปรับปรุงค่า speed_error0 สำหรับการทำงานรอบถัดไป
  error_first1 = f1_and_f2(a1, a2); // หาค่า error_first1 ด้วยกระบวนการทางฟัซซี่

  control_signal = f1_and_f2_self(error_first1, (error_first1-error_first0));
                // หาค่า control_signal ด้วยกระบวนการทางฟัซซี่แบบจัดการตัวเอง

  error_first0 = error_first1; // ปรับปรุงค่า error_first0 สำหรับการทำงานรอบถัดไป
  Vcon = defuzzy(control_signal); // หาค่าแรงดันสำหรับคุมอินเวอร์เตอร์ จากดีฟัซซี่แบบจัดการ
ตัวเอง
  printf("#DeFz:%7.4f",Vcon); // แสดงค่าผลการดีฟัซซี่

  V_Oper = Hold_Speed - ( Vcon * Fuzzy_Gain / 10.0 );
  return V_Oper; // แปลค่า Vcon ที่ได้ในรูปของแรงดันไฟฟ้า 0-5 โวลต์ที่
                // ต้องการให้อินเวอร์เตอร์ทำงาน
}

```

```

=====
===
// โปรแกรม "ADUc7042_Srl.c": ส่วนของโปรแกรมน้อยสำหรับการสื่อสารอนุกรมและหน่วยเวลา
//=====
===

#define CR 0x0D                // ค่าคงที่รหัส ASCII ของคำสั่ง Carry Return

//-----
---
// โปรแกรมย่อยหน่วงเพื่อการเวลา กำหนดค่าอินพุต 1-4294967296
//-----
---

void Delay(unsigned long int count1)
    {   while(count1 > 0) {count1--;} // วนรอบ ลดค่าตัวแปรเพื่อหน่วงเวลา
    }

//-----
---
// กำหนดอัตราบอด 9600, N, 8, 1 เมื่อใช้สัญญาณนาฬิกา 41.78 MHz
//-----
---

void Initial_Serial(void)
    {   GP1CON &= 0xFFFFFCC; // กำหนดหน้าที่ P1.1 และ P1.0 เป็นพอร์ตอนุกรม
        GP1CON |= 0x0000011;    // กำหนด P1.1 เป็นขา Tx และ P1.0 เป็นขา Rx
        COMCON0 = 0x80;        // ตั้งค่า DLAB เพื่อกำหนดอัตราบอด 9600
        COMDIV0 = 0x88;        // ตั้งค่า DIV0 และ DIV1
        COMDIV1 = 0x00;
        COMCON0 = 0x07;
    }

//-----
---
// ฟังก์ชันเขียนข้อมูลไปยังพอร์ตอนุกรม สำหรับใช้งานร่วมกับคำสั่ง printf
//-----
---

int putchar(int ch)            // ฟังก์ชันเขียนข้อมูลไปยังพอร์ตอนุกรม
    {   if (ch == '\n')
        {   while (!(0x40==(COMSTA0 & 0x40)))

```

```

        {} // รอจนกว่าการส่งข้อมูลสมบูรณ์
        COMTX = CR; // เขียนข้อมูลรหัส ASCII CR
    }
    while (!(0x40==(COMSTA0 & 0x40)))
        {} // รอจนกว่าการส่งข้อมูลสมบูรณ์
    return (COMTX = ch);
}

//-----
--
// ฟังก์ชันอ่านข้อมูลจากพอร์ตอนุกรม สำหรับใช้งานร่วมกับคำสั่ง scanf
//-----
--

int getchar (void) // อ่านข้อมูลจากพอร์ตอนุกรม
{
    while(!(0x01==(COMSTA0 & 0x01))) // รอจนกว่าจะมีการรับข้อมูลจากพอร์ตอนุกรม
        {}
    return (COMRX);
}

//=====
===
// โปรแกรม "ADUc7042_ADC.C": โปรแกรมย่อยการทำ ADC สำหรับบอร์ด ET-BASE ARM ADUc7024
//=====
===

void Initial_ADC(void) // โปรแกรมย่อยการตั้งค่าเริ่มต้นใช้งาน ADC
{
    ADCCON = 0x00000000; // รีเซ็ตค่า ADC เพื่อเริ่มต้นทำงานใหม่
    ADCCON |= 0x00000020; // กำหนดให้มีการใช้งานฟังก์ชัน ADC
    Delay(1000); // หน่วงเวลาเพื่อตั้งค่าการเรียกใช้ฟังก์ชัน ADC
    ADCCON |= 0x00001400; // กำหนด อัตราการสุ่มเรียกสัญญาณ = fADC/32
    ADCCON |= 0x00000300; // กำหนด Acquisition Time = 16 Cycle Clock
    ADCCON &= 0xFFFFFE7; // กำหนด โหมด ADC เป็นโหมด Single-End
    ADCCON |= 0x00000004; // กำหนด ให้การแปลง ACD แบบต่อเนื่องตลอดเวลา
    REFCON = 0x00000001; // กำหนด ใช้แรงดันอ้างอิงจากภายในขนาด 2.5 โวลต์
    ADCCON |= 0x00000080; // เริ่มการทำงาน ADC
}

//-----
--

```

```
// ฟังก์ชันสำหรับอ่านข้อมูลจาก ADC จากช่องสัญญาณที่ต้องการ
//-----
---
float ADC_Read(int channel)
{   float volt;           // ตัวแปรสำหรับเก็บค่าแรงดันที่อ่านได้ (โวลต์)
    unsigned int val;     // ตัวแปรสำหรับเก็บค่า ADC ที่อ่านได้ (HEX)
    ADCCP = channel;     // สั่งการให้หน่วย ADC แปลงค่าในช่องที่เลือก
    Delay(1000);         // หน่วงเวลาเพื่อให้เกิดการเลือกช่องการแปลงสมบูรณ์
    while (!ADCSTA);     // รอจนกว่าการแปลง ADC เสร็จสิ้น (Bit0="1")
    val = (ADCDAT>>16)&0x0FFF; // แปลงค่า ADC ที่อ่านได้เป็นอินทิจอร์ 12 บิต
    volt = val * (2.50 / 4096.0); // แรงดันที่อ่านได้ = ค่า ADC x [2.5V / 4095]
                                // ค่า ADC สูงสุด คือ 2.5 โวลต์ = 4095
    return (volt);       // ส่งค่าแรงดันที่อ่านกลับโปรแกรมหลัก
}
```

```
//=====
===
// โปรแกรม "ADUc7042_DAC.C": โปรแกรมย่อยการทำ DAC สำหรับบอร์ด ET-BASE ARM ADUc7024
// การเรียกใช้ DAC โดยการส่งค่าไปยังรีจิสเตอร์ DAC0DAT หรือ DAC1DAT
//=====
===
```

```
void Initial_DAC(void)
{   // โปรแกรมย่อยการตั้งค่าเริ่มต้นใช้งาน DAC0
    DAC0CON &= 0xDF; // กำหนด ส่วนวงจร DAC0 ใช้สัญญาณนาฬิกาหลัก
    DAC0CON |= 0x10; // กำหนด DAC0 ให้เริ่มการทำงาน
    DAC0CON |= 0x02; // กำหนด DAC0 ให้มีผลการแปลงจาก +Vref ถึง 0 โวลต์
    REFCON = 0x01; // กำหนด Vref จากภายในมีค่า 2.5 โวลต์

    // โปรแกรมย่อยการตั้งค่าเริ่มต้นใช้งาน DAC1
    DAC1CON &= 0xDF; // กำหนด ส่วนวงจร DAC1 ใช้สัญญาณนาฬิกาหลัก
    DAC1CON |= 0x10; // กำหนด DAC1 ให้เริ่มการทำงาน
    DAC1CON |= 0x02; // กำหนด DAC1 ให้มีผลการแปลงจาก +Vref ถึง 0 โวลต์
    REFCON = 0x01; // กำหนด Vref จากภายในมีค่า 2.5 โวลต์
}
```

```
//=====
===
// โปรแกรม "CM_Fuzzy.C": โปรแกรมย่อยกระบวนการการทำงานของฟuzzy
```

```
//=====
```

```
===
```

```
/*-----
```

```
---
```

Calculate Encoder Fuzzy Table. Using this Fuzzy Table for Encode

```

      H_1,   C_1,   H_2,   C_2,   H_3,   C_3,   H_4,   C_4,   H_5,   C_5
0 {  -1,    1,   -1,    0,    0,    0,    0,    0,    0,    0,    0    }, // case 1 LN
1 { -0.75,  1,   -1,    1,   error,  0,    0,    0,    0,    0    }, // case 2 LN
2 { -0.625, y3,  -1,   y3,  -0.75,  0.5, -0.625, x3, -0.5, x3, -0.375 }, // case 3 LN MN
3 { -0.5,   x4, -1,   x4,  -0.75,  0.5, -0.625, y4, -0.5, 0.5, -0.375 }, // case 4 LN MN
4 { -0.375, 0.5, -0.625, y5, -0.5, 0.5, -0.375, x5, -0.25, x5, -0.125 }, // case 5 MN SN
5 { -0.25,  x6, -0.625, x6, -0.5, 0.5, -0.375, y6, -0.25, 0.5, -0.125 }, // case 6 MN SN
6 { -0.125, 0.5, -0.375, y7, -0.25, 0.5, -0.125, x7, 0, x7, 0.125 }, // case 7 SN ZO
7 { 0,   x8, -0.375, x8, -0.25, 0.5, -0.125, y8, 0, 0.5, 0.125 }, // case 8 SN ZO
8 { 0.125, 0.5, -0.125, y9, 0, 0.5, 0.125, x9, 0.25, x9, 0.375 }, // case 9 ZO SP
9 { 0.25,  x10, -0.125, x10, 0, 0.5, 0.125, y10, 0.25, 0.5, 0.375 }, // case 10 ZO SP
10 { 0.375, 0.5, 0.125, y11, 0.25, 0.5, 0.375, x11, 0.5, x11, 0.625 }, // case 11 SP MP
11 { 0.5,   x12, 0.125, x12, 0.25, 0.5, 0.375, y12, 0.5, 0.5, 0.625 }, // case 12 SP MP
12 { 0.625, 0.5, 0.375, y13, 0.5, 0.5, 0.625, x13, 0.75, x13, 1 }, // case 13 MP LP
13 { 0.75,  x14, 0.375, x14, 0.5, 0.5, 0.625, y14, 0.75, y14, 1 }, // case 14 MP LP
14 { 1,   1,   error,  1,  1,  0,  0,  0,  0,  0,  0    }, // case 15 LP
15 { 1,   1,   1,   0,   0,   0,   0,   0,   0,   0    } // case 16 LP

```

```
// ตารางการทำ Encode Fuzzy
```

```
//-----
```

```
---
```

```
double enfuzzy(double error)
```

```

{   int i, j, Chk_Case;
    double num, den;

    double error_table[EN_DECODE_TB_ROWS][EN_DECODE_TB_COLS] = {
        // error = 99.99, xn= 98.0n yn=97.0n
        // H_1,  C_1,  H_2,  C_2,  H_3,  C_3,  H_4,  C_4,  H_5,  C_5
        { -1,  1,  -1,  0,  0,  0,  0,  0,  0,  0,  0,  0}, // case 1
LN
        { -0.75,  1,  -1,  1,  99.99,  0,  0,  0,  0,  0,  0,  0}, // case 2
LN
        { -0.625, 97.03,  -1,  97.03, -0.75,  0.5, -0.625, 98.03, -0.5, 98.03, -0.375}, //
case 3 LN MN
        { -0.5, 98.04,  -1, 98.04, -0.75,  0.5, -0.625, 97.04, -0.5, 0.5, -0.375}, //
case 4 LN MN
        { -0.375, 0.5, -0.625, 97.05, -0.5, 0.5, -0.375, 98.05, -0.25, 98.05, -0.125}, //
case 5 MN SN
        { -0.25, 98.06, -0.625, 98.06, -0.5, 0.5, -0.375, 97.06, -0.25, 0.5, -0.125}, //
case 6 MN SN
        { -0.125, 0.5, -0.375, 97.07, -0.25, 0.5, -0.125, 98.07, 0, 98.07, 0.125}, //
case 7 SN ZO

```

```

        { 0, 98.08, -0.375, 98.08, -0.25, 0.5, -0.125, 97.08, 0, 0.5, 0.125}, //
case 8 SN ZO
        { 0.125, 0.5, -0.125, 97.09, 0, 0.5, 0.125, 98.09, 0.25, 98.09, 0.375}, //
case 9 ZO SP
        { 0.25, 98.10, -0.125, 98.10, 0, 0.5, 0.125, 97.10, 0.25, 0.5, 0.375}, //
case 10 ZO SP
        { 0.375, 0.5, 0.125, 97.11, 0.25, 0.5, 0.375, 98.11, 0.5, 98.11, 0.625},
        // case 11 SP MP
        { 0.5, 98.12, 0.125, 98.12, 0.25, 0.5, 0.375, 97.12, 0.5, 0.5, 0.625}, //
case 12 SP MP
        { 0.625, 0.5, 0.375, 97.13, 0.5, 0.5, 0.625, 98.13, 0.75, 98.13, 1}, //
case 13 MP LP
        { 0.75, 98.14, 0.375, 98.14, 0.5, 0.5, 0.625, 97.14, 0.75, 97.14, 1}, //
case 14 MP LP
        { 1, 1, 99.99, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0}, //
case 15 LP
        { 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}; //
case 16 LP

for (i=0;i<=EN_DECODE_TB_ROWS-1;i++)
for (j=0;j<=EN_DECODE_TB_COLS-1;j++)
    { Chk_Case = (int)(100.0 * error_table[i][j]);
      switch(Chk_Case)
      { case 9999 : { error_table[i][j] = error; break;}
        case 9803 : { error_table[i][j] = 4.0 * (0.75 + error); break;}
        case 9804 : { error_table[i][j] = 4.0 * fabs(error + 0.5); break;}
        case 9805 : { error_table[i][j] = 4.0 * (error + 0.5); break;}
        case 9806 : { error_table[i][j] = 4.0 * fabs(0.25 + error); break;}
        case 9807 : { error_table[i][j] = 4.0 * (0.25 + error); break;}
        case 9808 : { error_table[i][j] = 4.0 * fabs(error); break;}
        case 9809 : { error_table[i][j] = 4.0 * (error); break;}
        case 9810 : { error_table[i][j] = 4.0 * (0.25 - error); break;}
        case 9811 : { error_table[i][j] = 4.0 * (error - 0.25); break;}
        case 9812 : { error_table[i][j] = 4.0 * (0.5 - error); break;}
        case 9813 : { error_table[i][j] = 4.0 * (error - 0.25); break;}
        case 9814 : { error_table[i][j] = 4.0 * (0.75 - error); break;}
        case 9703 : { error_table[i][j] = 4.0 * fabs(error + 0.5); break;}
        case 9704 : { error_table[i][j] = 4.0 * (0.75 + error); break;}

```

```

        case 9705 : { error_table[i][j] = 4.0 * fabs(0.25 + error); break;}
        case 9706 : { error_table[i][j] = 4.0 * (error + 0.5);      break;}
        case 9707 : { error_table[i][j] = 4.0 * fabs(error);      break;}
        case 9708 : { error_table[i][j] = 4.0 * (0.25 + error);   break;}
        case 9709 : { error_table[i][j] = 4.0 * (0.25 - error);   break;}
        case 9710 : { error_table[i][j] = 4.0 * (error);          break;}
        case 9711 : { error_table[i][j] = 4.0 * (0.5 - error);    break;}
        case 9712 : { error_table[i][j] = 4.0 * (error - 0.25);   break;}
        case 9713 : { error_table[i][j] = 4.0 * (0.75 - error);   break;}
        case 9714 : { error_table[i][j] = 4.0 * (error - 0.5);    break;}
    }
}

//=== Look Table For Print out Test Decode Fuzzzy Table ===
// printf("\n\n Look Table For Print out Test Decode fuzzzy Table ");
// for (i=0;i<=EN_DECODE_TB_ROWS-1;i++)
// { printf("\nRow %d >",i);
//     for (j=0;j<=EN_DECODE_TB_COLS-1;j++)
//         printf("%7.3f,",error_table[i][j]);
// }

if (error<error_table[0][0])
    { i = 0;
    }
else if (error >= error_table[EN_DECODE_TB_ROWS-1][0])
    { i = EN_DECODE_TB_ROWS-1;
    }
else
    { for (i=1; i<EN_DECODE_TB_ROWS-1; i++)
        { if ((error_table[i-1][0]<=error)&&(error<error_table[i][0]))
            break;
        }
    }

// Calculate F when F = Num/Den
// Num = (H_1 * C_1) + (H_2 * C_2) + (H_3 * C_3) + (H_4 * C_4) + (H_5 * C_5)
// Den = (H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5)
num = 0;
den = 0;

```

```

for (j=1; j<EN_DECODE_TB_COLS-1; j+=2)
    {
        num += (error_table[i][j] * error_table[i][j+1]);
        den += error_table[i][j];
    }

return (num / den);
}

//-----*/
double defuzzy(double cs)
{
    int i, j, Chk_Case;
    double num, den;
    double cs_table[EN_DECODE_TB_ROWS][EN_DECODE_TB_COLS] = {
        // cs = 99.99, xn= 98.0n yn=97.0n
        // Hcon_1, Ccon_1, Hcon_2, Ccon_2, Hcon_3, Ccon_3, Hcon_4, Ccon_4,
        Ccon_5, Ccon_5
        { -1, 1, -1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}, //
case 1 LN
        { -0.75, 1, -1, 1, 99.99, 0, 0, 0, 0, 0, 0}, //
case 2 LN
        { -0.625, 97.03, -1, 97.03, -0.75, 0.5, -0.625, 98.03, -0.5, 98.03, -0.375}, //
case 3 LN MN
        { -0.5, 98.04, -1, 98.04, -0.75, 0.5, -0.625, 97.04, -0.5, 0.5, -0.375}, //
case 4 LN MN
        { -0.375, 0.5, -0.625, 97.05, -0.5, 0.5, -0.375, 98.05, -0.25, 98.05, -0.125}, //
case 5 MN SN
        { -0.25, 98.06, -0.625, 98.06, -0.5, 0.5, -0.375, 97.06, -0.25, 0.5, -0.125}, //
case 6 MN SN
        { -0.125, 0.5, -0.375, 97.07, -0.25, 0.5, -0.125, 98.07, 0, 98.07, 0.125}, //
case 7 SN ZO
        { 0, 98.08, -0.375, 98.08, -0.25, 0.5, -0.125, 97.08, 0, 0.5, 0.125}, //
case 8 SN ZO
        { 0.125, 0.5, -0.125, 97.09, 0, 0.5, 0.125, 98.09, 0.25, 98.09, 0.375}, //
case 9 ZO SP
        { 0.25, 98.10, -0.125, 98.10, 0, 0.5, 0.125, 97.10, 0.25, 0.5, 0.375}, //
case 10 ZO SP
        { 0.375, 0.5, 0.125, 97.11, 0.25, 0.5, 0.375, 98.11, 0.5, 98.11, 0.625}, //
case 11 SP MP

```



```

        { 0.5, 98.12, 0.125, 98.12, 0.25, 0.5, 0.375, 97.12, 0.5, 0.5, 0.625}, //
case 12 SP MP
        { 0.625, 0.5, 0.375, 97.13, 0.5, 0.5, 0.625, 98.13, 0.75, 98.13, 1}, //
case 13 MP LP
        { 0.75, 98.14, 0.375, 98.14, 0.5, 0.5, 0.625, 97.14, 0.75, 97.14, 1}, //
case 14 MP LP
        { 1, 1, 99.99, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0}, //
case 15 LP
        { 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}; //
case 16 LP

```

```

for (i=0;i<=EN_DECODE_TB_ROWS-1;i++)
  for (j=0;j<=EN_DECODE_TB_COLS-1;j++)
    {Chk_Case = (int)(100*cs_table[i][j]);
     switch(Chk_Case)
       { case 9999 : { cs_table[i][j] = cs;          break; }
         case 9803 : { cs_table[i][j] = 4.0 * (0.75 + cs); break; }
         case 9703 : { cs_table[i][j] = 4.0 * fabs(cs + 0.5); break; }
         case 9804 : { cs_table[i][j] = 4.0 * fabs(cs + 0.5); break; }
         case 9704 : { cs_table[i][j] = 4.0 * (0.75 + cs); break; }
         case 9805 : { cs_table[i][j] = 4.0 * (cs + 0.5); break; }
         case 9705 : { cs_table[i][j] = 4.0 * fabs(0.25 + cs); break; }
         case 9806 : { cs_table[i][j] = 4.0 * fabs(0.25 + cs); break; }
         case 9706 : { cs_table[i][j] = 4.0 * (cs + 0.5); break; }
         case 9807 : { cs_table[i][j] = 4.0 * (0.25 + cs); break; }
         case 9707 : { cs_table[i][j] = 4.0 * fabs(cs); break; }
         case 9808 : { cs_table[i][j] = 4.0 * fabs(cs); break; }
         case 9708 : { cs_table[i][j] = 4.0 * (0.25 + cs); break; }
         case 9809 : { cs_table[i][j] = 4.0 * cs; break; }
         case 9709 : { cs_table[i][j] = 4.0 * (0.25 - cs); break; }
         case 9810 : { cs_table[i][j] = 4.0 * (0.25 - cs); break; }
         case 9710 : { cs_table[i][j] = 4.0 * cs; break; }
         case 9811 : { cs_table[i][j] = 4.0 * (cs - 0.25); break; }
         case 9711 : { cs_table[i][j] = 4.0 * (0.5 - cs); break; }
         case 9812 : { cs_table[i][j] = 4.0 * (0.5 - cs); break; }
         case 9712 : { cs_table[i][j] = 4.0 * (cs - 0.25); break; }
         case 9813 : { cs_table[i][j] = 4.0 * (cs - 0.5); break; }
         case 9713 : { cs_table[i][j] = 4.0 * (0.75 - cs); break; }

```

```

        case 9814 : { cs_table[i][j] = 4.0 * (0.75 - cs); break; }
        case 9714 : { cs_table[i][j] = 4.0 * (cs - 0.5); break; }
    }
}

//=== Look Table For Print out Test Encode Fuzzzy Table ===
// printf("\n\n Look Table For Print out Test Encode fuzzzy Table ");
// for (i=0;i<=EN_DECODE_TB_ROWS-1;i++)
// { printf("\nRow %d >",i);
//   for (j=0;j<=EN_DECODE_TB_COLS-1;j++)
//     printf("%7.3f",cs_table[i][j]);
// }

if (cs < cs_table[0][0])
    { i = 0;
    }
else if (cs >= cs_table[EN_DECODE_TB_ROWS-1][0])
    { i = EN_DECODE_TB_ROWS-1;
    }
else
    { for (i=1; i<EN_DECODE_TB_ROWS-1; i++)
        { if ((cs_table[i-1][0] <= cs) && (cs < cs_table[i][0]))
            break;
        }
    }

// Calculate Fcon when Fcon = Num/Den
// Num = (Hcon_1 * Ccon_1) + (Hcon_2 * Ccon_2) + (Hcon_3 * Ccon_3)
//       + (Hcon_4 * Ccon_4) + (Hcon_5 * Ccon_5)
// Den = (Hcon_1 + Hcon_2 + Hcon_3 + Hcon_4 + Hcon_5);
num = 0;
den = 0;
for (j=1; j < EN_DECODE_TB_COLS-1; j += 2)
    { num += (cs_table[i][j] * cs_table[i][j+1]);
      den += cs_table[i][j];
    }
return (num / den);
}

//-----*/

```

```

double fuzzy_error(double error)
{
    return enfuzzy(error) * 10.0;
}

//-----*/
double fuzzy_change_in_error(double error)
{
    return enfuzzy(error) * 100.0;
}

//-----*/
double fuzzy( const double fuzzy_table[FUZ_SET_TB_ROWS][FUZ_SET_TB_COLS],
              double f1, double f2)
{
    int i, j;
    double lower, upper;

    // printf("\n\n Print Test Data in Fuzzy Table ");
    // for (i=0;i<=FUZ_SET_TB_ROWS-1;i++)
    // {   printf("\nRow %d >",i);
    //     for (j=0;j<=FUZ_SET_TB_COLS-1;j++)
    //         printf("%7.3f,",fuzzy_table[i][j]);
    // }

    //==== check f2 =====
    if (f2 <= ((fuzzy_table[1][0] + fuzzy_table[2][0]) / 2.0))
    {
        i = 1;
    }

    else if (f2 > ((fuzzy_table[FUZ_SET_TB_ROWS-1][0] + fuzzy_table[FUZ_SET_TB_ROWS-
2][0]) / 2.0))
    {
        i = FUZ_SET_TB_ROWS-1;
    }
    else
    {
        for (i = 2; i < FUZ_SET_TB_ROWS-1; i++)
        {
            lower = (fuzzy_table[i][0] + fuzzy_table[i-1][0]) / 2.0;
            upper = (fuzzy_table[i][0] + fuzzy_table[i+1][0]) / 2.0;
            if ((lower < f2) && (f2 <= upper))
                break;
        }
    }
}

```

```

    }

    //===== check f1 =====
    if (f1 <= ((fuzzy_table[0][1] + fuzzy_table[0][2]) / 2.0))
        { j = 1;
        }
    else if (f1 > ((fuzzy_table[0][FUZ_SET_TB_COLS-1] + fuzzy_table[0][FUZ_SET_TB_COLS-2]) /
2.0))
        { j = FUZ_SET_TB_COLS-1;
        }
    else
        { for (j = 2; j < FUZ_SET_TB_COLS-1; j++)
            { lower = (fuzzy_table[0][j] + fuzzy_table[0][j-1]) / 2.0;
              upper = (fuzzy_table[0][j] + fuzzy_table[0][j+1]) / 2.0;
              if ((lower < f1) && (f1 <= upper))
                  break;
            }
        }

    return fuzzy_table[i][j];
}

//-----*/
double f1_and_f2(double f1, double f2)
{ const double fuzzy_table[FUZ_SET_TB_ROWS][FUZ_SET_TB_COLS] = {
// F2 \ F1
    {9999, -1, -0.8, -0.6, -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1},
    { -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0},
    {-0.8, 1, 1, 1, 1, 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0, -0.1},
    {-0.6, 1, 1, 1, 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0, -0.1, -0.3},
    {-0.4, 1, 1, 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0, -0.1, -0.3, -0.6},
    {-0.2, 1, 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8},
    { 0, 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8, -1},
    { 0.2, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8, -1, -1},
    { 0.4, 0.6, 0.3, 0.1, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8, -1, -1, -1},
    { 0.6, 0.3, 0.1, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8, -1, -1, -1, -1},
    { 0.8, 0.1, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8, -1, -1, -1, -1, -1},
    { 1, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8, -1, -1, -1, -1, -1, -1} };
}

```

```

return fuzzy(fuzzy_table, f1, f2);
}

//-----*/
double f1_and_f2_self(double f1, double f2)
{
  const double fuzzy_table[FUZ_SET_TB_ROWS][FUZ_SET_TB_COLS] = {
    // F2 \ F1
    {9999, -1, -0.8, -0.6, -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1},
    {-1, 1, 1, 1, 1, 1, 0.8, 0, 0, 0, 0, 0},
    {-0.8, 1, 1, 1, 1, 0.8, 0.6, 0, 0, 0, 0, 0},
    {-0.6, 1, 1, 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0, 0, 0, 0, 0},
    {-0.4, 1, 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0, 0, 0, 0, 0},
    {-0.2, 1, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0, 0, 0, 0, 0, 0},
    {0, 0.8, 0.6, 0.3, 0.1, 0, 0, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8},
    {0.2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8, -1},
    {0.4, 0, 0, 0, 0, 0, -0.1, -0.3, -0.6, -0.8, -1, -1},
    {0.6, 0, 0, 0, 0, 0, -0.3, -0.6, -0.8, -1, -1, -1},
    {0.8, 0, 0, 0, 0, 0, -0.6, -0.8, -1, -1, -1, -1},
    {1, 0, 0, 0, 0, 0, -0.8, -1, -1, -1, -1, -1}, };
return fuzzy(fuzzy_table, f1, f2);
}

```

ภาคผนวก ค

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่และผลงานการจดสิทธิบัตรการประดิษฐ์

## บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่และผลงานการจดสิทธิบัตร

1. **รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการนานาชาติ**
  1. S. Raweekul, T. Kulworawanichpong, and S. Sujitjorn. (2006). **Modelling and Simulation of Multiple Single - Phase Induction Motors in Parallel Operation.** Proc. The 8<sup>th</sup> WSEAS Int. Conf. on Automatic Control Modeling and Simulation: 195-200.
  2. S. Raweekul, T. Kulworawanichpong, and S. Sujitjorn. (2008). **Fuzzy Control of Parallel Induction Motors Drive.** Proc. The 10<sup>th</sup> WSEAS Int. Conference on Automatic Control Modeling and Simulation: 46-51.
2. **รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ**
  1. S. Raweekul, T. Kulworawanichpong, and S. Sujitjorn. (2006). **Parallel-Connected Single-Phase Induction Motor.** WSEAS Trans. on Circuits and Systems. 5(63): 377-384.
3. **รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ**
  1. ศักดิ์ระวี ระวีกุล, ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์, และสรารุณี สุจิตจร. (2549). **แบบจำลองและการจำลองผลมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่เชื่อมต่อหลายตัวแบบขนาน.** วารสารสงขลานครินทร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 28(6): 1335-1350.
4. **รายการจดสิทธิบัตรการประดิษฐ์**
  1. สรารุณี สุจิตจร และ ศักดิ์ระวี ระวีกุล, (2550). “โหมมิดสับและกระบวนการขึ้นรูปโหมมิดสับ”, เลขที่คำขอ 0701000717.
  2. สรารุณี สุจิตจร และ ศักดิ์ระวี ระวีกุล, (2550). “ชุดโหมมิดควงแบบเป็นพวง”, เลขที่คำขอ 0701000718.
  3. สรารุณี สุจิตจร และ ศักดิ์ระวี ระวีกุล, (2550). “ปลอกยึดโหมมิดสับแบบปรับมุมได้และชุดโหมมิดสับแบบปรับมุมได้”, เลขที่คำขอ 0701000719.

4. สรวุฒิ สุจิตจร และ ศักดิ์ระวี ระวีกุล, (2550). “ไปรองลับ”, เลขที่คำขอ 0701001320.
5. สรวุฒิ สุจิตจร และ ศักดิ์ระวี ระวีกุล, (2550). “ชุดไปมิดเนียน”, เลขที่คำขอ 0701001327.
6. สรวุฒิ สุจิตจร และ ศักดิ์ระวี ระวีกุล, (2550). “ไปมิดเนียน”, เลขที่คำขอ 0701001328.
7. สรวุฒิ สุจิตจร และ ศักดิ์ระวี ระวีกุล, (2550). “เครื่องลับวัสดุพิษผลทางการเกษตร”, เลขที่คำขอ 0701002473.



## Modelling and Simulation of Multiple Single - Phase Induction Motors in Parallel Operation

SAKRAWEE RAWEEKUL, THANATCHAI KULWORAWANICHPONG,  
and SARAWUT SUJITJORN

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering  
Suranaree University of Technology  
111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000  
THAILAND  
[http:// www.sut.ac.th](http://www.sut.ac.th)

*abstract*:- The development of state-space models for multiple single-phase induction motors in parallel connection is described in this paper. We present the models in general form based on the dq-frame principle. The set of motors is assumed to have a single inverter source. Also, simulation results on four drive conditions are discussed

Keywords: single-phase induction motor, parallel connection, modelling.

### 1. Introduction

Most industries in developing countries are based on agriculture. Unlike other heavy industries, agricultural industries require small size machines in production plants. In this fashion, three-phase induction motors are not suitable because they are usually over rating. Increasingly, many processes and office-used appliances are determined to employ simple and cheap single-phase motors. In some industries such as starch powder, textile, food processing, etc, a hundred of single-phase induction motors are installed to serve loads. In practice, use of one inverter to supply one motor is costly and also inefficient. To reduce cost, parallel connection of multiple single-phase induction motors fed by a single inverter is alternative due to its simplicity and cheapness. Therefore, improvement of efficient operation for a parallel-connected, multiple single-phase induction motor drive is vital to give loss minimization and minimum operating cost.

In this paper, we attempt to develop a mathematical model for multiple single-phase induction motors in parallel connection as described in state-space form. This modeling is based on the two-axis dq frame theory which plays an essential role for high-efficient induction motor drive technology. The analyses appeared in this paper consist of four main parts that are: i) single-phase induction motor model in stationary reference ii) modeling of multiple single-phase induction motors in parallel connection iii) simulation results conducted by four loading scenarios and iv) conclusion.

### 2. Single-Phase Induction Motor Model in Stationary Reference

A single-phase induction motor is considered to have stator, and rotor windings. As shown in figure 1, the

stator winding composes of the main, and the auxiliary windings [9]. To develop the motor models, the motor itself can be considered as a two-phase or two-axis device. In terms of two axes, the d – and the q – axes are perpendicular. The development of the motor state models utilizes the dq-frame principle, and the reference frame theory [7]. The later theory allows the transformation of rotor variables to the stator side.

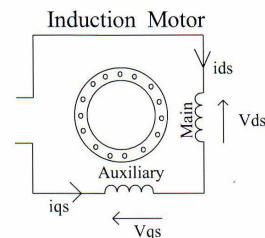


Fig.1 Winding composition of a single-phase induction motor.

The diagram in figure 2 reveals the orientation of the motor windings. In the figure, the subscript qs denotes any quantities belonging to the stator main winding (the stator q-axis winding), ds denotes those belonging to the stator auxiliary winding (the stator d-axis winding), qr and dr represent the same but for the rotor windings in the q- and the d-axes, respectively. In the same figure, the characters  $V$ ,  $I$  and  $N$  denote voltage, current and turns of the windings, respectively.

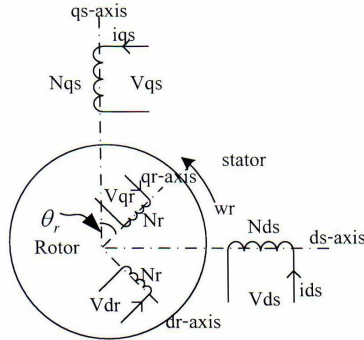


Fig. 2 Orientation of the stator and the rotor windings.

The qr and qs axes have the phase difference of  $\theta_r$ . Based on the winding orientation as described, one can write the equation (1) in which the superscripts s, and r denote the stator, and the rotor sides, respectively.

$$\begin{bmatrix} V_{qr}^s \\ V_{dr}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qr}^r \\ V_{dr}^r \end{bmatrix} \quad (1)$$

or in a compact form of

$$\begin{bmatrix} \mathfrak{S}_{xr}^s \\ \mathfrak{X}_{xr}^s \end{bmatrix} = [k] \begin{bmatrix} \mathfrak{S}_{xr}^r \\ \mathfrak{X}_{xr}^r \end{bmatrix} \quad (3)$$

Where  $\mathfrak{S}_{xr}^s$  denotes any quantities transformed from the rotor side to the stator side

$\mathfrak{S}_{xr}^r$  denotes any quantities on the rotor side

$[k]$  denotes the transformation matrix, i.e.

$$[k] = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix}.$$

The following subsections present the development of the motor state models for the stator and the rotor, respectively.

#### The Stator

The voltages on the stator part can be simply expressed by

$$\begin{aligned} V_{qs} &= r_{qs} i_{qs} + L_{qsqs} p i_{qs} + L_{qsds} p i_{ds} + \\ &\quad L_{qsqr} p i_{qr} + L_{qsdr} p i_{dr} \\ V_{ds} &= r_{ds} i_{ds} + L_{dsqs} p i_{qs} + L_{dsds} p i_{ds} + \\ &\quad L_{dsqr} p i_{qr} + L_{dsdr} p i_{dr} \end{aligned}$$

in which  $p$  denotes  $\frac{d}{dt}$ . The above expressions can be rearranged in the matrix form as in (4).

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} + pL_{qsqs} & pL_{qsds} \\ pL_{dsqs} & r_{ds} + pL_{dsds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} + p \left\{ \begin{bmatrix} L_{qsqr} & L_{qsdr} \\ L_{dsqr} & L_{dsdr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix} \right\} \quad (4)$$

#### The Rotor

Due to the rotor symmetry, the winding turns on the d- and the q-axes are equal. Their resistances are also equal, i.e.  $r_{qr} = r_{dr} = r_r$ . The voltages on the rotor part can be simply expressed by

$$\begin{aligned} V_{qr}^r &= r_{qr} i_{qr} + L_{qrqr} p i_{qr} + \\ &\quad L_{qsds} p i_{dr} + L_{qrqs} p i_{qs} + L_{qrds} p i_{ds} \\ V_{dr}^r &= r_{dr} i_{dr} + L_{drqr} p i_{qr} + \\ &\quad L_{dsds} p i_{dr} + L_{drqs} p i_{qs} + L_{drds} p i_{ds} \end{aligned}$$

or in the matrix form of

$$\begin{bmatrix} V_{qr}^r \\ V_{dr}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qr} + pL_{qrqr} & pL_{qrdr} \\ pL_{drqr} & r_{dr} + pL_{drdr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_{qrqs} & L_{qrds} \\ L_{drqs} & L_{drds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} \quad (5)$$

By transferring all quantities to the stator referent frame, the state-space matrix representing one single-phase induction motor can be summarized as shown in equation (6)

$$\frac{d}{dt} [i] = [A][i] + [B][v] \quad (6)$$

where

$$\begin{aligned} [i] &= [i_{qs} \ i_{ds} \ i_{qr} \ i_{dr}]^T \\ [v] &= [V_{qs} \ V_{ds} \ V_{qr} \ V_{dr}]^T \\ [A] &= [D]^{-1} [C] \\ [B] &= [D]^{-1} \end{aligned}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} r_{qs} & 0 \\ 0 & r'_{ds} \\ -\omega_r L_{mqqs} \sin \theta_r & -\omega_r L_{mqqs} \cos \theta_r \\ -\omega_r L_{mqqs} \cos \theta_r & -\omega_r L_{mqqs} \sin \theta_r \\ -\omega_r L_{mqqs} \sin \theta_r & -\omega_r L_{mqqs} \cos \theta_r \\ \omega_r L_{dsqr} \cos \theta_r & -\omega_r L_{mqqs} \cos \theta_r \\ r'_r & 0 \\ 0 & r'_r \end{bmatrix}$$

And

$$[D] = \begin{bmatrix} L'_{lqs} + L_{mqqs} & 0 & L_{mqqs} \cos \theta_r & -L_{mqqs} \sin \theta_r \\ 0 & (L'_{lqs} + L_{mqqs}) \omega_r L_{dsqr} \sin \theta_r & \omega_r L_{dsqr} \cos \theta_r & 0 \\ L_{mqqs} \cos \theta_r & L_{mqqs} \sin \theta_r & (L'_{lr} + L_{mqqs}) & 0 \\ -L_{mqqs} \sin \theta_r & \cos \theta_r & 0 & (L'_{lr} + L_{mqqs}) \end{bmatrix}$$

$N_{qs}$  = main winding turns,

$N_{ds}$  = auxiliary winding turns, and

$N_{qr} = N_{dr} = N_r$  = rotor winding turns.

$$V'_{ds} = \frac{N_{qs}}{N_{ds}} V_{ds}, \quad i'_{ds} = \frac{N_{qs}}{N_{ds}} i_{ds}$$

$$L_{mq} = N_{qs}^2 P_g, \quad L'_{ds} = \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}}\right)^2 N_{ds}^2 P_g = L_{mq}$$

$$L'_{lds} = \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}}\right)^2 L_{lds}, \quad r'_{ds} = \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}}\right)^2 r_{ds}$$

$$L'_{lr} = \left(\frac{N_{qs}}{N_r}\right)^2 L_{lr}, \quad r'_r = \left(\frac{N_{qs}}{N_r}\right)^2 r_r$$

$$V'_{qr} = \frac{N_{qs}}{N_r} V_{qr}, \quad V'_{dr} = \frac{N_{qs}}{N_r} V_{dr}$$

$$i'_{qr} = \frac{N_r}{N_{qs}} i_{qr}, \quad i'_{dr} = \frac{N_r}{N_{qs}} i_{dr}$$

(remarks: “'” indicates the transformed quantities to the reference q-axis of the stator.) Furthermore, the cross inductances can be replaced by the magnetic inductances using the following relations [9]

$$L_{qqs} = L_{lqs} + N_{qs}^2 P_g, \quad L_{dsds} = L_{lds} + N_{ds}^2 P_g$$

$$L_{qqr} = N_{qs} N_{qr} P_g, \quad L_{qdr} = N_{qs} N_{dr} P_g$$

$$L_{dsqr} = N_{ds} N_{qr} P_g, \quad L_{dsdr} = N_{ds} N_{dr} P_g$$

$$L_{qrr} = L_{lqr} + N_{qr}^2 P_g, \quad L_{drdr} = L_{ldr} + N_{dr}^2 P_g$$

Considering the rotor motion, its mechanical model is expressed by [8]

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P}{2J_m} T_e(t) - \frac{P}{2J_m} T_L(t) - \frac{B_m \omega_r(t)}{J_m}$$

where  $T_e$  denotes electromagnetic torque, i.e.

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) L_{mqqs} i_{qs} (-i_{qs} \sin \theta_r - i_{ds} \cos \theta_r) + L_{mqqs} i_{ds} (-i_{qr} \cos \theta_r - i_{dr} \sin \theta_r)$$

and  $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$ . This model can be rewritten in a state form as

$$\begin{bmatrix} \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B_m}{J_m} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{P}{2J_m} \\ 0 \end{bmatrix} [T_e - T_L] \quad (7)$$

Combining the electrical and the mechanical state models results in the equation (7) representing a single-phase induction motor.

$$\begin{bmatrix} \frac{d[i]_{4 \times 1}}{dt} \\ \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathfrak{R}]_{4 \times 4} & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & \ddots & & \\ 0 & -\frac{B}{J_m} & 0 & \\ \vdots & 1 & 0 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i]_{4 \times 1} \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathfrak{N}]_{4 \times 4} & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & \ddots & & \\ 0 & \frac{P}{2J_m} & 0 & \\ \vdots & 1 & 0 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V]_{4 \times 1} \\ T_e - T_L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

in which

$$[i]_{4 \times 1} = [i_{qs} \quad i'_{ds} \quad i_{qr} \quad i'_{dr}]^T$$

$$[\mathfrak{R}]_{4 \times 4} = [A][D]^{-1}[C]$$

$$[\mathfrak{N}]_{4 \times 4} = [B][D]^{-1}$$

### 3. Modelling of Multiple (n) Parallel Connected Motors

Fig. 3 represents a group of n-parallel connected motors. The model for the k<sup>th</sup> motor can be expressed explicitly as equation (8) with sub-script k. Let  $[\Lambda_k]$  and  $[\Theta_k]$  be state and input vectors of the k<sup>th</sup> motor, accordingly. The collective matrix equation representing the group of n-parallel connected motors can be written as equation (9).

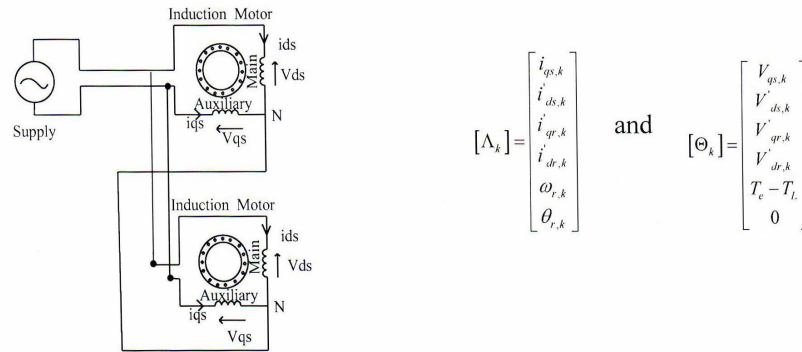


Fig. 3 Schematic diagram of two-motor group.  
Equation (11)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [\Lambda_1] \\ [\Lambda_2] \\ [\Lambda_3] \\ \vdots \\ [\Lambda_n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathfrak{R}1]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & \cdots & [0]_{4 \times 4} \\ [0]_{4 \times 4} & [\mathfrak{R}2]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & \cdots & [0]_{4 \times 4} \\ [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & [\mathfrak{R}3]_{4 \times 4} & \vdots & [0]_{4 \times 4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & \cdots & [\mathfrak{R}n]_{4 \times 4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Lambda_1] \\ [\Lambda_2] \\ [\Lambda_3] \\ \vdots \\ [\Lambda_n] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathfrak{S}1]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & \cdots & [0]_{4 \times 4} \\ [0]_{4 \times 4} & [\mathfrak{S}2]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & \cdots & [0]_{4 \times 4} \\ [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & [\mathfrak{S}3]_{4 \times 4} & \vdots & [0]_{4 \times 4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & \cdots & [\mathfrak{S}n]_{4 \times 4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Theta_1] \\ [\Theta_2] \\ [\Theta_3] \\ \vdots \\ [\Theta_n] \end{bmatrix}$$

Table 1 steady-state performances of each test case

	Case 1			Case 2			Case 3			Case 4		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Supply Current (A)	25.44			17.48			32.42			22.07		
Motor Current (A)	8.48	8.48	8.48	8.48	4.85	4.15	8.48	10.09	13.85	8.48	5.91	7.68
Motor Speed (rpm)	1402	1402	1402	1402	1450	1461	1402	1408	1370	1402	1452	1455
Load Torque (N.m)	14.27	14.27	14.27	14.27	7.78	6.14	14.27	14.46	17.74	14.27	9.33	8.62

**4. Simulation Results**

To verify effectiveness, correction and accuracy of the developed model, four test-case scenarios were assigned in which three motors connected in parallel form the test bed. The four test cases are detailed as follows.

**Case 1:** all test motors are technically the same in both motor parameters and motor loads.

- Motor 1: Parameter set 1, Load 1
- Motor 2: Parameter set 1, Load 1
- Motor 3: Parameter set 1, Load 1

**Case 2:** parameters of each test motor are equal, but each motor shares a different portion of load.

- Motor 1: Parameter set 1, Load 1
- Motor 2: Parameter set 1, Load 2
- Motor 3: Parameter set 1, Load 3

**Case 3:** load of each test motor is equal, while their parameters are different.

- Motor 1: Parameter set 1, Load 1
- Motor 2: Parameter set 2, Load 1
- Motor 3: Parameter set 3, Load 1

**Case 4:** neither parameters nor load of the motors are equal.

- Motor 1: Parameter set 1, Load 1
- Motor 2: Parameter set 2, Load 2
- Motor 3: Parameter set 3, Load 3

Motor parameter and loads are listed below [11-13].

**Parameter set 1:**

$Poles = 4, r_{qs} = 4.3\Omega, r_{ds} = 2.6\Omega, r_r = 2.01\Omega,$

$L_{mqs} = 105\Omega, L_{lr} = 1.8\Omega, L_{lqs} = 1.01\Omega,$

$L_{lds} = 1.8\Omega, j = 0.0546Kg\text{m}^2, B_m = 0.0002$

Parameter set 2:

$Poles = 4, r_{qs} = 1.3\Omega, r_{ds} = 2.6\Omega, r_r = 2.01\Omega,$

$L_{mqs} = 105\Omega, L_{lr} = 2.8\Omega, L_{lqs} = 2.01\Omega,$

$L_{lds} = 2.8\Omega, j = 0.0546 Kg m^2, B_m = 0.0002$

Parameter set 3:

$Poles = 4, r_{qs} = 3.2\Omega, r_{ds} = 7.2\Omega, r_r = 2\Omega,$

$L_{mqs} = 54.97\Omega, L_{lr} = 3.2\Omega, L_{lqs} = 3.61\Omega,$

$L_{lds} = 2.09\Omega, j = 0.0546 Kg m^2, B_m = 0.0002$

Load torque 1:  $1.8 \times 10^{-4} \omega_r^2$  N.m

Load torque 2:  $9.5 \times 10^{-5} \omega_r^2$  N.m

Load torque 3:  $7.5 \times 10^{-5} \omega_r^2$  N.m

The simulation for each test case was conducted by applying a 220-V, 50-Hz sinusoidal voltage source to energize the motor group.

To briefly present the test results, steady-state value of some key characteristics for each motor and for the entire group is summarized in table 1. In addition, relevant responses in time domain of the fourth case are selected and shown in fig.4-9.

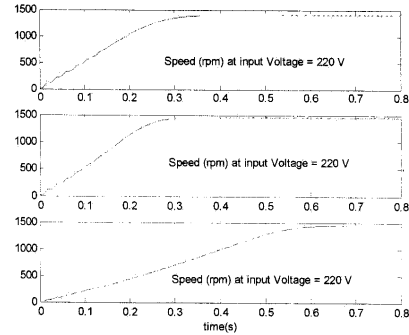


Figure 6 motor speeds of case 4

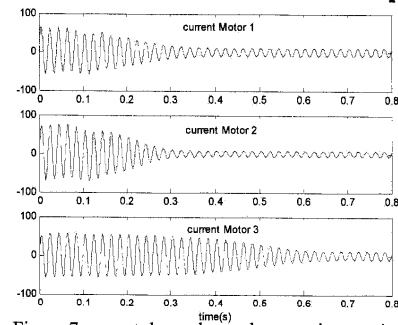


Figure 7 current drawn by each motor in case 4

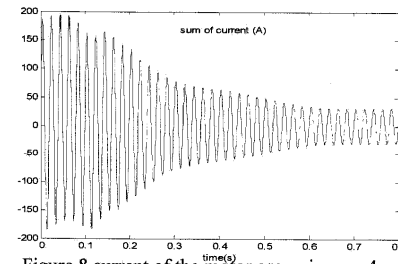


Figure 8 current of the motor group in case 4

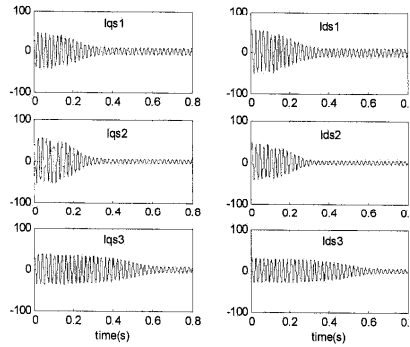


Figure 4 Stator current of the case 4 motor

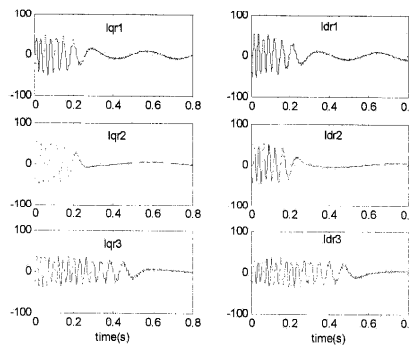


Figure 5 rotor currents of case 4

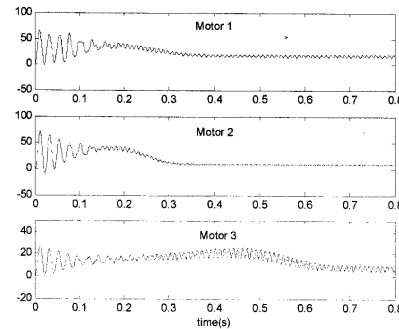


Figure 9 motor torques of case 4

As can be seen, the simulations resulting from the four test cases reveal electromechanical characteristics for all motors of the group. By the method proposed in this paper, several motors connected in parallel can be analyzed, numerically. This model is simple but efficient to be included into a simulation algorithm of a high-performance drive, particularly in a parallel operation of multiple single-phase induction motors. Obviously, in order to reduce model complexity, some can benefit significantly from this model.

### 5. Conclusion

The development of the state models for multiple single-phase induction motors in parallel connection has been explained with simulation results presented. The model in general form is useful for practical consideration under various load and drive conditions. Our further research is to develop sensorless drive technology on the basis of the results presented herein.

A mathematical model in this paper is direct and simple. Although the system matrix resulting from this model is sizable, it is remarkably sparse. With the help from MATLAB latest version, solutions of the time series state equations representing the motor group are easily obtained.

### References:

- [1] Y.Matsumoto, S.Ozaki, and A.Kawamura, A novel vector control of single-inverter multiple-induction-motors drives for Shinkansen traction system, *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition ( APEC '2001.*), Vol. 1, 2001, pp.608 – 614.
- [2] M.B.R.Correa, C.B. Jacobina, A.M.N. Lima, and E.R.C. da Silva, Single-phase induction motor drives systems, *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC '99.)*, Vol. 1, 1999 pp. 403 – 409.
- [3] M.B.R.Correa, C.B. Jacobina, A.M.N. Lima, and E.R.C. da Silva, Vector control strategies for single-phase induction motor drive systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 51, No5, 2004, pp.1073 – 1080.
- [4] D.H.Jang, Voltage, frequency, and phase-difference angle control of PWM inverters-fed two-phase induction motors, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 9, No. 4, 1994, pp.377 – 383.
- [5] K.Matsuse, Y.Kouno, H.Kawai, and S.Yokomizo, A speed-sensorless vector control method of parallel-connected dual induction motor fed by a single inverter, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.38, No.6, 2002, pp.1566 – 1571.
- [6] K.Matsuse, Y.Kouno, H.Kawai, and J.Oikawa, Characteristics of speed sensorless vector controlled dual induction motor drive connected in parallel fed by a single inverter, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 40, No.1, 2004, pp.153 – 161.
- [7] R. Krishnan, *Electric Motor Drives Modeling, Analysis, and Control*, Prentice Hall, 2001.
- [8] P.C. Krause, O.Wasynczuk, and S.D. Sudhoff, *Analysis of Electrical Machinery*, Piscataway, NJ ;IEEE Press, 1995.
- [9] Chee-Mun ong, *Dynamic Simulation of Electric machinery using MATLAB/SIMULINK*, Prentice Hall, 1998
- [10] B.Wu, S.B. Dewan, and P.C.Sen, A Modified Current source inverter ( MCS ) for a multiple induction motor drive system, *IEEE Trans. On Power Electronics*, Vol.3, No.1, 1988, pp.10–16.
- [11] C.Mademlis, I.Kioskeridis, and T.Theodoulidis, Optimization of single-phase induction motors- Part I: maximum energy efficiency control, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.20, No.1, 2005, pp.187 – 195.
- [12] K.Matsuse, S.Taniguchi, T.Yoshizumi, and K.Namiki, A speed-sensorless vector control of induction motor operating at high efficiency taking core loss into account, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.37, No.2, 2001, pp.548 – 558.
- [13] M.B.R.Correa, C.B. Jacobina, A.M.N. Lima, and E.R.C. da Silva, Rotor-flux-oriented control of a single-phase induction motor drive, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol.47, No.4, 2000, pp. 832 – 841.
- [14] V.Joseph, *Power Electronics Principles and Applications*, McGraw-Hill, 1995.
- [15] Y.Kono, T.Fushimi, and K.Matsuse, Speed Senseless Vector Control of Parallel Connected Induction Motors, *Proc.PIEMC'2000*, 2000, pp.278-283.

### Fuzzy Control of Parallel Induction Motors Drive

SAKRAWEE RAWEEKUL, THANATCHAI KULWORAWANICHONG,  
and SARAWUT SUJITJORN<sup>+</sup>

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering  
Suranaree University of Technology  
111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000  
THAILAND

<sup>+</sup>corresponding author [sarawut@sut.ac.th](mailto:sarawut@sut.ac.th) [http:// www.sut.ac.th](http://www.sut.ac.th)

**Abstract:** - This article presents the design of a fuzzy controller for a drive system. The drive consists of three single-phase induction motors (fractional hp) in parallel connection, and fed by a single PWM inverter. The fuzzy controller is self-organizing and capable of dealing with high torque disturbances. Simulation results are presented.

**Key-Words:** - single-phase, induction motor, parallel connection, fuzzy control, self-organizing.

#### 1 Introduction

Parallel induction motor drive has been known for many years in heavy industries such as railways [1], etc. The drive technology for those applications is complicated and costly. Small-and-medium enterprises (SMEs), such as agricultural and food industries, etc., can benefit from the idea but with less complicated and inexpensive technology. Single-phase (1Ø) fractional hp induction motors are still champion among other types of motors for SMEs in developing countries. Researchers studied dynamic of multiple 1Ø induction motors in parallel connection[2]. They also presented the detailed mathematical models. The present article explains a further work in which a control design has been formulated. Section 2 of this article briefly reviews the models of parallelly connected 1Ø induction motors. Section 3 presents our fuzzy control design for a small power parallel drive scheme. Simulation results and conclusions can be found in Sections 4 and 5, respectively.

#### 2 Models of Single-Phase Induction Motors in Parallel Connection

Fig. 1 depicts the diagram of parallelly connected induction motors driven by one inverter. Formulation of the motor models is based on the dq-frame principle [3,4]. Equation(1) describes the motion of a motor [5]. Combining the equation (1) and the state-variable model

$$\begin{bmatrix} \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B_m}{J_m} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P \\ 0 \end{bmatrix} [T_e - T_L] \quad (1)$$

of an induction motor results in equation (2) that describes the electrical and mechanical dynamics of an

$$\begin{bmatrix} \frac{d[i]_{4x1}}{dt} \\ \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R]_{4x4} & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & -\frac{B_m}{J_m} & 0 & \\ \vdots & \vdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i]_{4x1} \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [N]_{4x4} & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \frac{P}{2J_m} & 0 & \\ \vdots & \vdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V]_{4x1} \\ T_e - T_L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

induction motor. The model can be expressed for n parallelly connected motors as in equation (3). For full detailed development of the models and notation list, readers should refer to the reference [2].

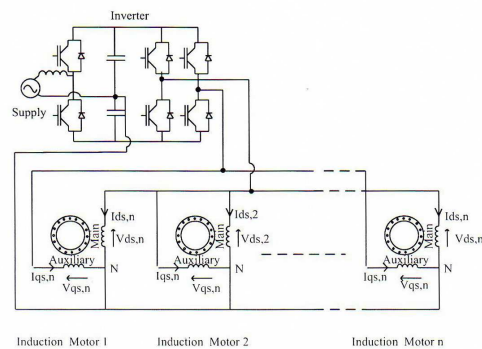


Fig. 1 Schematic diagram of 1Ø induction motors parallelly connected and driven by a single inverter.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [\Lambda_1] \\ [\Lambda_2] \\ [\Lambda_3] \\ \vdots \\ [\Lambda_n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [9\eta 1]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & \dots & [0]_{4 \times 4} \\ [0]_{4 \times 4} & [9\eta 2]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & \dots & [0]_{4 \times 4} \\ [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & [9\eta 3]_{4 \times 4} & \dots & [0]_{4 \times 4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & \dots & [9\eta n]_{4 \times 4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Lambda_1] \\ [\Lambda_2] \\ [\Lambda_3] \\ \vdots \\ [\Lambda_n] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [S1]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & \dots & [0]_{4 \times 4} \\ [0]_{4 \times 4} & [S2]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & \dots & [0]_{4 \times 4} \\ [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & [S3]_{4 \times 4} & \dots & [0]_{4 \times 4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & \dots & [S n]_{4 \times 4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Theta_1] \\ [\Theta_2] \\ [\Theta_3] \\ \vdots \\ [\Theta_n] \end{bmatrix} \quad (3)$$

where

$$[\Lambda_n] = \begin{bmatrix} i_{gn} \\ i_{dm} \\ i_{gn} \\ i_{dm} \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad [\Theta_n] = \begin{bmatrix} V_{gn} \\ V'_{dm} \\ V'_{gn} \\ V'_{dm} \\ T_e - T_L \\ 0 \end{bmatrix}$$

### 3 Fuzzy Control Design

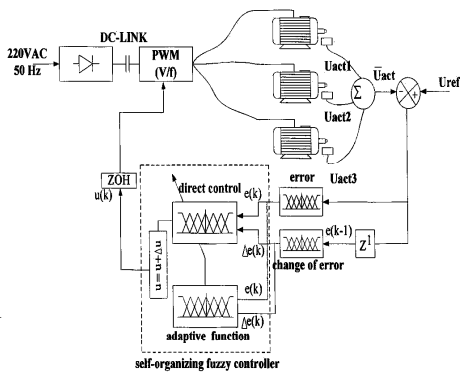


Fig. 2 Parallel 10 induction motors drive with a self-organizing fuzzy controller.

Referring to Fig. 2, we are now considering a drive system consisting of three 10 induction motors in parallel connection fed by one PWM inverter under a constant v/f scheme[8,9,10]. The average speed ( $U_{act}$ ) is fed back to compare with the reference command ( $U_{ref}$ ). The feedback controller is a fuzzy logic one which issues a command to control the switching pattern of the inverter. The physical controller is based on a

DSP with 10 bit A/D converters at 500k samples/sec. Our fuzzy controller contains several simple fuzzy rules of the form "if  $x_1$  and  $x_2$  then  $y$ ". Inference of the rules applies the well-known center of gravity method of defuzzification[11,12]. We apply the triangular membership grades for all fuzzy variables which are speed errors ( $e$ ), change in speed errors ( $\Delta e$ ), change in control ( $\Delta u$ ), and change in the center of membership grade for output ( $\Delta c$ ). The membership grades are shown in Fig. 3 in which XN = extremely large negative, VN = very large negative, LN = large negative, MN = medium negative, SN = small negative, ZO = about zero, SP = small positive, MP = medium positive, LP = large positive, VP = very large positive, and XP = extremely large positive. Our fuzzy controller is a self-organizing one [6, 7]. It has two components namely direct control, and adaptive function as shown by the diagram in Fig. 2. Later in this article, it is illustrated that without the adaptive function the control system cannot properly deal with a large torque disturbance.

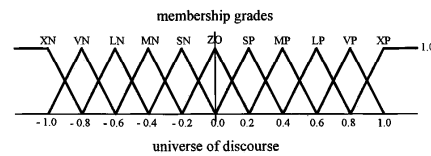


Fig. 3 Membership grades for fuzzy variables.

Since the controller possesses two components, the direct control employs fuzzy rules of the form

$$\text{if } [e(k) \text{ is } E_i] \text{ and } [\Delta e(k) \text{ is } E_j] \text{ then } [\Delta u(k) \text{ is } U_{n(i,j)}],$$

and the adaptive function contains rules of the form

$$\text{if } [e(k) \text{ is } E_i] \text{ and } [\Delta e(k) \text{ is } E_j] \text{ then } [\Delta c(k) \text{ is } C_{m(i,j)}].$$

Referring to the rules, the symbols  $E_i$ ,  $E_j$ ,  $U_n$ , and  $C_m$  stand for the fuzzy descriptions of speed errors, change in speed errors, change in control, and change in center of membership grades, respectively. Rule firing of the direct control results in

$$\Delta u = \frac{\sum_{i,j} [(\mu E_i \cap \mu E_j) \Delta U_{n(i,j)}]}{\sum_{i,j} (\mu E_i \cap \mu E_j)}$$



Since the adaptive function provides an adjustment to the operation of the direct control, firing an adaptive rule can be viewed as updating the change in control  $\Delta u$  as follows

$$U_{n(i,j)} = U_{n(i,j)} + \frac{\sum_{i,j}[(\mu E_i \cap \mu E_j) \Delta C_{m(i,j)}]}{\sum_{i,j} (\mu E_i \cap \mu E_j)}$$

Both components of the fuzzy controller contains rules as summarized by the Tables 1 and 2, respectively.

Table 1 Fuzzy rules: Direct control.

		change in errors										
		XN	VN	LN	MN	SN	ZO	SP	MP	LP	VP	XP
errors	XN	XP	XP	XP	XP	XP	XP	VP	LP	MP	SP	ZO
	VN	XP	XP	XP	XP	XP	VP	LP	MP	SP	ZO	SN
	LN	XP	XP	XP	XP	VP	LP	MP	SP	ZO	SN	MN
	MN	XP	XP	XP	VP	LP	MP	SP	ZO	SN	MN	LN
	SN	XP	XP	VP	LP	MP	SP	ZO	SN	MN	LN	VN
	ZO	XP	VP	LP	MP	SP	ZO	SN	MN	LN	VN	XN
	SP	VP	LP	MP	SP	ZO	SN	MN	LN	VN	XN	XN
	MP	LP	MP	SP	ZO	SN	MN	LN	VN	XN	XN	XN
	LP	MP	SP	ZO	SN	MN	LN	VN	XN	XN	XN	XN
	VP	SP	ZO	SN	MN	LN	VN	XN	XN	XN	XN	XN
	XP	ZO	SN	MN	LN	VN	XN	XN	XN	XN	XN	XN

Table 2 Fuzzy rules: Adaptive function.

		change in errors										
		XN	VN	LN	MN	SN	ZO	SP	MP	LP	VP	XP
errors	XN	XP	XP	XP	XP	XP	VP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	VN	XP	XP	XP	XP	VP	LP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	LN	XP	XP	XP	VP	LP	MP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	MN	XP	XP	VP	LP	MP	SP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	SN	XP	VP	LP	MP	SP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	ZO	VP	LP	MP	SP	ZO	ZO	ZO	SN	MN	LN	VN
	SP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	SN	MN	LN	VN	XN
	MP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	SN	MN	LN	VN	XN	XN
	LP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	MN	LN	VN	XN	XN	XN
	VP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	LN	VN	XN	XN	XN	XN
	XP	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	VN	XN	XN	XN	XN	XN

**4 Simulation Results**

Firstly, simulation results of one motor at no-load are

illustrated in Fig. 4. Without any controller, the motor runs upto the rated speed of 1,450 rpm. The motor follows the speed commands nicely (800, 1000, 1200 and 1300 rpm) with our self-organizing fuzzy controller. The results are shown for only one motor because the others behave similarly. Secondly, we show the results when the motors are disturbed intervably by an external load-torque of 20 Nm as seen from Fig. 5. It can be noticed that the self-organizing controller performs much better than the direct control does in terms of fast

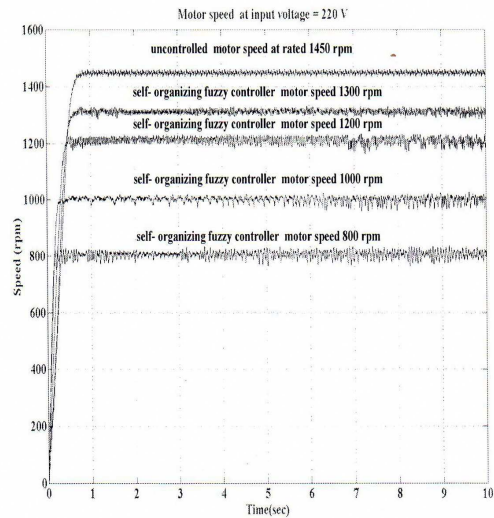


Fig. 4 Speed responses of one motor at no-load (self-organizing fuzzy controller).

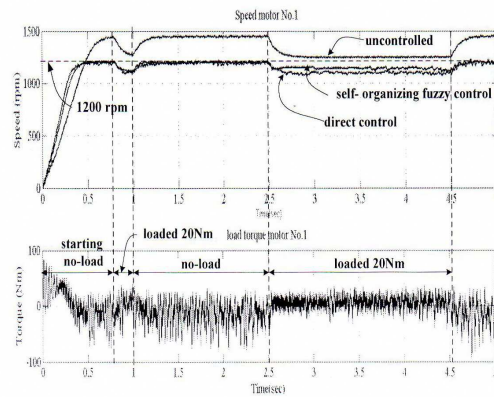


Fig. 5 Speed responses of one motor at intervally loaded (20 Nm).

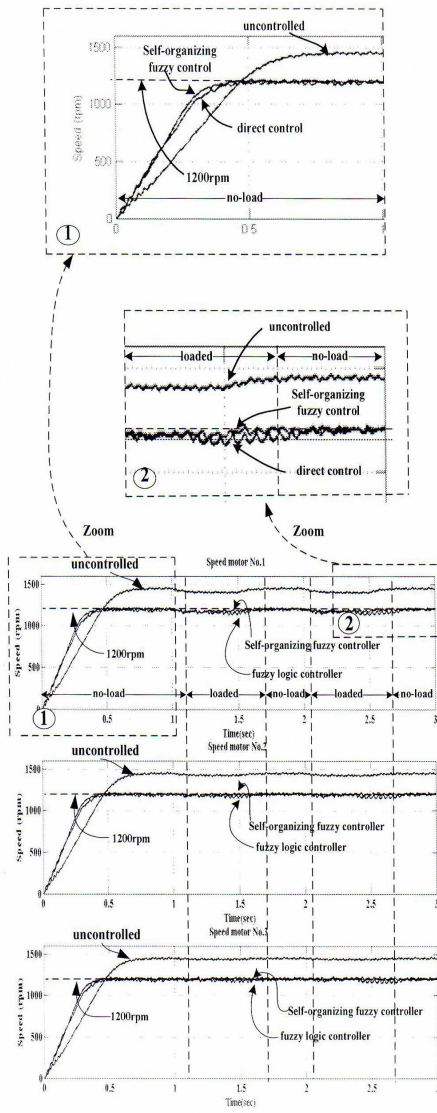


Fig. 6a Speed responses when the motors are intervally disturbed by the external load torque summarized by Table 3.

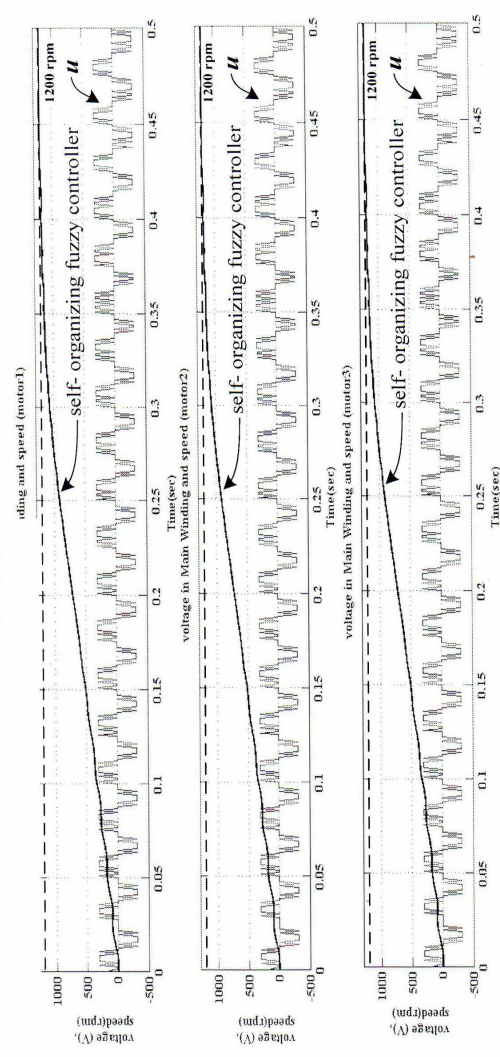


Fig. 6b Motors' speeds with the control signal  $u$

response, steady-state speed, speed regulation, and recovery from disturbances. Thirdly, we consider a more realistic case of having a crop chopping machine (see Fig. 7) to be installed with the motors and the controllers. In this case, realistic load-torque disturbances to each motor are summarized by Table 3. Fig. 6 illustrates the results of motors' speed responses. It can be observed that the self-organizing controller produces better responses than the direct control does for all cases. Fig. 8 illustrates the motor currents. Table 4 summarizes the results, and particularly indicates the benefit of our self-organizing fuzzy controller which can confine the speed errors within  $\pm 3\%$  better than the required specifications.

Table 3. External torque intervally disturbs each motor.

Time(sec)	Motor No1	Motor No2	Motor No3
1.0-1.7	6 Nm	3 Nm	1.5 Nm
2.0-2.7	6 Nm	3 Nm	1.5 Nm

Table 4. Summary of steady-state speeds and % speed-errors of each motor(required speed: 1,200 rpm, $\pm 5\%$ ).

motor	Direct fuzzy controller		Self-organizing fuzzy controller	
	Average speed(rpm)	%error	Average speed(rpm)	%error
No.1	1151	-4.08	1170	-2.50
No.2	1170	-2.50	1187	-1.08
No.3	1194	-0.50	1201	+0.08

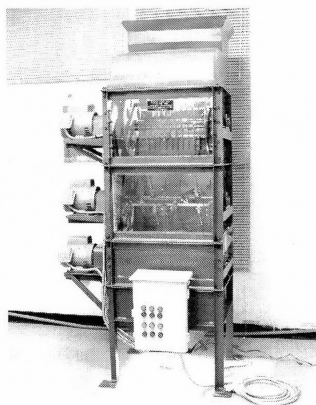


Fig. 7 Crop chopping machine.

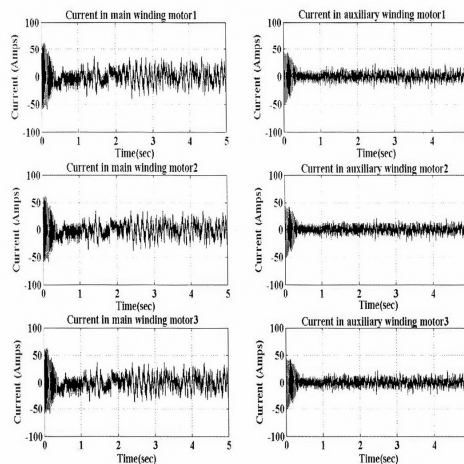


Fig. 8 Waveforms of motor currents.

### 5 Conclusion

We have reported the development of a self-organizing fuzzy controller for a drive system having three 1Ø induction motors connected parallelly. These motors are driven by a single PWM-VSI of which switching patterns are controlled by our self-organizing fuzzy controller. This development is aimed for a crop chopping machine illustrated in Fig. 7. At present, the idea is verified by simulation. The results show that large load-torque disturbances can be dealt with satisfactorily. The motor speed variation due to the torque disturbance can be properly regulated within  $\pm 3\%$  errors better than the required specification of  $\pm 5\%$ . With our controller, the motors response faster with no overshoots. Our future works are to implement this control technology, and further develop the controller to achieve a slightly underdamped response.

### 6 Acknowledgements

This work is supported by the National Research Council of Thailand. Expenses for conference participation are supported by SUT, and RMUT E-SAN. The authors are greatly thankful to these organizations.

### References:

[1] Y. Matsumoto, S. Ozaki, and A. Kawamura, A novel vector control of single-inverter multiple-induction-motors drives for Shinkansen traction system, *Proc. IEEE Conf. on Applied Power Electronics (APEC '2001.)*, Vol. 1, 2001, pp. 608 – 614.

- [2] S. Raweekul, T. Kulworawanichpong, and S. Sujitjorn, Parallel-connected single-phase induction motor: modelling and simulation. *WSEAS Trans. on Circuits and Systems*, Vol. 5, No. 63, 2006, pp. 377– 384.
- [3] C-M. Ong, *Dynamic Simulation of Electric machinery using MATLAB/SIMULINK*, Prentice Hall, 1998.
- [4] P.C. Krause, O. Wasynczuk, and S.D. Sundhoff, *Analysis of Electrical Machinery*, Piscataway, NJ :IEEE Press, 1995. 51, No. 5, 2004, pp. 1073 – 1080.
- [5] R. Krishnan, *Electric Motor Drives Modeling, Analysis, and Control*, Prentice Hall, 2001.
- [6] C.J. Hwang, and T.T. Yen, A design of fuzzy self-organizing controller, *Proc. IEEE Conf. on Fuzzy Systems*, Vol. 3, 1996, pp. 1567–1572.
- [7] X. Chengying, and C.S. Yung, Design of multilevel fuzzy controller for nonlinear systems and stability analysis, *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Vol. 13, No. 6, 2005, pp.761– 778.
- [8] B. Wu, S.B. Dewan, and P.C. Sen, A modified current source inverter for a multiple induction motor drive system, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 3, No. 1, 1988, pp.10–16.
- [9] M.B.R. Correa, C.B. Jacobina, A.M.N. Lima, and E.R.C. da Silva, Single-phase induction motor drives systems, *Proc. IEEE Conf. on Applied Power Electronics and Exposition(APEC '99)*, Vol. 1, 1999, pp. 403 – 409.
- [10] D.H. Jang, Voltage, frequency, and phase - difference angle control of PWM inverters-fed two-phase induction motors, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 9, No. 4, 1994, pp. 377 – 383.
- [11] G. Calcev, Some remarks on the stability of Mamdani fuzzy control system, *IEEE Trans. on Fuzzy System*, Vol. 6, No. 3, 1998, pp.436 – 442.
- [12] E.H. Mamdani, Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis, *IEEE Trans. on Computers*, Vol. C-26, No. 12, 1977, pp. 1182 – 1191.
- [13] P. vas, A.F. Stronach, M. Neuroth, Full fuzzy control of a DSP-based high performance induction motor drive, *Proc. IEE Conf. on Control Theory Appl.*, Vol. 144, No. 5,1997, pp. 361– 368.

Uref reference command (rpm)  
 Uact1 actual speed of motor No.1 (rpm)  
 Uact2 actual speed of motor No.2 (rpm)  
 Uact3 actual speed of motor No.3 (rpm)  
 Uact average speed (rpm)  
 $V_{qs}, V_{ds}, V_{qr}, V_{dr}$  the q-exes and d-exes voltage components on stator and rotor (V)  
 e speed errors  
 $\Delta c$  change in the center of membership grade for output  
 $\Delta e$  change in speed errors  
 $\Delta u$  change in control  
 $\omega_r$  speed (rad/s)  
 $\theta_r$  phase difference between the  $q_r$  and  $q_s$  axes (rad)  
 superscript  $S$  denotes stator-side quantities  
 superscript  $r$  denotes rotor-side quantities  
 superscript ' denotes transformed quantities to the reference q- axis of the stator  
 $\cap$  fuzzy min operator  
 $[i]_{4 \times 1}$  matrix of main and auxiliary windings currents  
 $[S_n]_{4 \times 4}$  matrix of motor parameters  
 $[R_n]_{4 \times 4}$  matrix of motor parameters  
 $[V]_{4 \times 1}$  matrix of main and auxiliary windings voltages

#### Notation list:

$B_m$  viscous friction coefficient (Nm/rad/sec)  
 $C_m$  fuzzy description of change in center of membership grades  
 $E_i$  fuzzy description of speed errors  
 $E_j$  fuzzy description of change in speed errors  
 $i_{qs}, i_{ds}, i_{qr}, i_{dr}$  the q- axis and the d- axis current components of stator and rotor (A)  
 $J_m$  moment of inertia (Kg -m<sup>2</sup>)  
 $P$  number of poles (pole)  
 $T_e$  electromagnetic torque (Nm)  
 $T_l$  load torque (Nm)  
 $U_n$  fuzzy description of change in control

## Parallel - Connected Single - Phase Induction Motors: Modelling and Simulation

SAKRAWEE RAWEEKUL, THANATCHAI KULWORAWANICHPONG,  
and SARAWUT SUJITJORN<sup>+</sup>

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering  
Suranaree University of Technology  
111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000  
THAILAND

<sup>+</sup>corresponding author [sarawut@sut.ac.th](mailto:sarawut@sut.ac.th) [http:// eng.sut.ac.th/ee](http://eng.sut.ac.th/ee)

**abstract:-** The development of a state-space model representing multiple single-phase induction motors in parallel connection is described in this paper. The proposed model is in a general expression based on the dq-frame principle. The model of a multi-motor system becomes a large sparse matrix. A set of parallel motors is assumed to be fed by a single inverter source. Practical cases of having almost the same motors, the same loads, different motors with near ratings, and different loads have been considered. Simulation results on four drive conditions are discussed in details.

**Keywords:** single-phase induction motor, parallel connection, modelling.

### 1. Introduction

Most industries in developing countries are based on agriculture. Unlike other heavy industries, agricultural industries require small size machines in production plants. In this fashion, three-phase induction motors are not suitable because they are usually over rated. Although, any large-size three-phase induction motors can be operated at a fraction of their ratings, it is not a good reason to do so due to inefficiency and uneconomy. Increasingly, many processes and office-used appliances are designed to employ simple and low-cost single-phase motors. In some industries such as starch, textile, food processing, etc, a few hundreds of single-phase induction motors are installed to serve loads. In practice, use of one inverter to supply one motor is costly and also inefficient. To reduce cost, parallel connection of multiple single-phase induction motors fed by a single inverter [1], [2] is an alternative due to its simplicity and low cost. Therefore, improvement of efficient operation for a parallel-connected, multiple single-phase induction motor drive [3] is vital to attain loss minimization and minimum operating cost.

In this paper, we attempt to develop a mathematical model for multiple single-phase induction motors in parallel connection as described in state-space form. This modelling is based on the two-axis dq frame theory which plays an essential role for high-efficient induction motor drive technology. The analyses appeared in this paper consist of four main parts that are: i) single-phase induction motor model in stationary reference frame, ii) modelling of multiple single-phase induction motors in parallel connection, iii) simulation results conducted for four loading scenarios, and iv) conclusion.

### 2. Motor Model in Stationary Reference Frame

A single-phase induction motor is considered to have stator, and rotor windings. As shown in figure 1, the stator winding composes of the main, and the auxiliary windings [4]. To develop the motor models, the motor itself can be considered as a two-phase or two-axis device. In terms of two axes, the d – and the q – axes are perpendicular. The development of the motor state models utilizes the dq-frame principle, and the reference frame theory [5]. The later theory allows the transformation of rotor variables to the stator side.

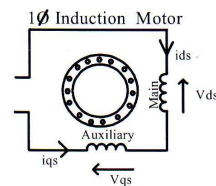


Fig.1 Winding composition

The diagram in fig. 2 [6] reveals the orientation of the motor windings. In the figure, the subscript qs denotes any quantities belonging to the stator main winding (the stator q-axis winding), ds denotes those belonging to the stator auxiliary winding (the stator d-axis winding), qr and dr represent the same but for the rotor windings in the q- and the d-axes, respectively. In the same figure, the

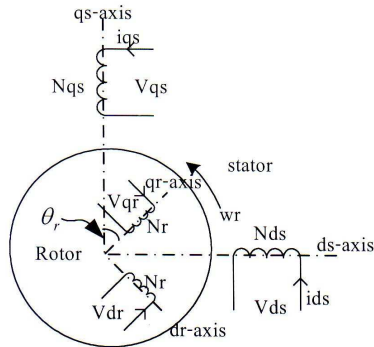


Fig. 2 Orientation of the stator and the rotor windings.

The qr and qs axes have the phase difference of  $\theta_r$ . Based on the winding orientation as described, one can write the equation (1) in which the superscripts s, and r denote the stator, and the rotor sides, respectively.

$$\begin{bmatrix} V_{qr}^s \\ V_{dr}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qr}^r \\ V_{dr}^r \end{bmatrix} \quad (1)$$

or in a compact form of

$$\begin{bmatrix} \mathfrak{S}_{xr}^s \end{bmatrix} = [k] \begin{bmatrix} \mathfrak{S}_{xr}^r \end{bmatrix} \quad (2)$$

where  $\mathfrak{S}_{xr}^s$  denotes any quantities transformed from the rotor side to the stator side,

$\mathfrak{S}_{xr}^r$  denotes any quantities on the rotor side, and

$[k]$  denotes the transformation matrix, i.e.

$$[k] = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix}$$

The following subsections present the summary of the motor state models for the stator and the rotor, respectively.

### The Stator

The voltages on the stator part can be simply expressed by

$$\begin{aligned} V_{qs} &= r_{qs} i_{qs} + L_{qsqs} p i_{qs} + L_{qsds} p i_{ds} + \\ &\quad L_{qsqr} p i_{qr} + L_{qsdr} p i_{dr} \\ V_{ds} &= r_{ds} i_{ds} + L_{dsqs} p i_{qs} + L_{dsds} p i_{ds} + \\ &\quad L_{dsqr} p i_{qr} + L_{dsdr} p i_{dr} \end{aligned}$$

in which  $p$  denotes  $d/dt$ . The above expressions can be rearranged in the matrix form as in (3).

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} + pL_{qsqs} & pL_{qsds} \\ pL_{dsqs} & r_{ds} + pL_{dsds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} + p \left\{ \begin{bmatrix} L_{qsqr} & L_{qsdr} \\ L_{dsqr} & L_{dsdr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix} \right\} \quad (3)$$

### The Rotor

Due to the rotor symmetry, the winding turns on the d- and the q-axes are equal. Their resistances are also equal, i.e.  $r_{qr} = r_{dr} = r_r$ . The voltages on the rotor part can be simply expressed by

$$\begin{aligned} V_{qr}^r &= r_{qr} i_{qr} + L_{qqr} p i_{qr} + \\ &\quad L_{qsds} p i_{ds} + L_{qqs} p i_{qs} + L_{qdr} p i_{ds} \\ V_{dr}^r &= r_{dr} i_{dr} + L_{drq} p i_{qr} + \\ &\quad L_{dsds} p i_{ds} + L_{drqs} p i_{qs} + L_{drds} p i_{ds} \end{aligned}$$

or in the matrix form of

$$\begin{bmatrix} V_{qr}^r \\ V_{dr}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qr} + pL_{qqr} & pL_{qdr} \\ pL_{drq} & r_{dr} + pL_{drdr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_{qqs} & L_{qds} \\ L_{drqs} & L_{drds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} \quad (4)$$

By transferring all quantities to the stator reference frame, the state-space matrix representing one single-phase induction motor can be summarized as shown in equation (5).

$$\frac{d}{dt} [i] = [A][i] + [B][v] \quad (5)$$

where

$$\begin{aligned} [i] &= [i_{qs} \ i_{ds} \ i_{qr} \ i_{dr}]^T \\ [v] &= [V_{qs} \ V_{ds} \ V_{qr} \ V_{dr}]^T \\ [A] &= [D]^{-1} [C] \\ [B] &= [D]^{-1} \end{aligned}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} r_{qs} & 0 \\ 0 & r'_{ds} \\ -\omega_r L_{mq} \sin \theta_r & -\omega_r L_{mq} \cos \theta_r \\ -\omega_r L_{mq} \cos \theta_r & -\omega_r L_{mq} \sin \theta_r \\ & & -\omega_r L_{mq} \sin \theta_r & -\omega_r L_{mq} \cos \theta_r \\ & & \omega_r L_{dq} \cos \theta_r & -\omega_r L_{mq} \cos \theta_r \\ & & r_r & 0 \\ & & 0 & r_r \end{bmatrix}$$

, and

$$[D] = \begin{bmatrix} L_{lqs} + L_{mq} & 0 & L_{mq} \cos \theta_r & -L_{mq} \sin \theta_r \\ 0 & (L_{lqs} + L_{mq}) & L_{mq} \sin \theta_r & L_{mq} \cos \theta_r \\ L_{mq} \cos \theta_r & L_{mq} \sin \theta_r & (L_r + L_{mq}) & 0 \\ -L_{mq} \sin \theta_r & L_{mq} \cos \theta_r & 0 & (L_r + L_{mq}) \end{bmatrix}$$

 $N_{qs}$  = main winding turns, $N_{ds}$  = auxiliary winding turns, and $N_{qr} = N_{dr} = N_r$  = rotor winding turns.

$$\begin{aligned} V'_{ds} &= \frac{N_{qs}}{N_{ds}} V_{ds}, & i'_{ds} &= \frac{N_{qs}}{N_{ds}} i_{ds} \\ L_{mq} &= N_{qs}^2 P_g, & L'_{ds} &= \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}}\right)^2 N_{ds}^2 P_g = L_{mq} \\ L'_{lds} &= \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}}\right)^2 L_{lds}, & r'_{ds} &= \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}}\right)^2 r_{ds} \\ L'_{lr} &= \left(\frac{N_{qs}}{N_r}\right)^2 L_{lr}, & r'_{r} &= \left(\frac{N_{qs}}{N_r}\right)^2 r_r \\ V'_{qr} &= \frac{N_{qs}}{N_r} V_{qr}, & V'_{dr} &= \frac{N_{qs}}{N_r} V_{dr} \\ i'_{qr} &= \frac{N_r}{N_{qs}} i_{qr}, & i'_{dr} &= \frac{N_r}{N_{qs}} i_{dr} \end{aligned}$$

(remarks: “'” indicates the transformed quantities to the reference q-axis of the stator.) Furthermore, the cross inductances can be replaced by the magnetic inductances using the following relations [4].

$$\begin{aligned} L_{qqs} &= L_{lqs} + N_{qs}^2 P_g, & L_{dsds} &= L_{lds} + N_{ds}^2 P_g \\ L_{qsqr} &= N_{qs} N_{qr} P_g, & L_{qdr} &= N_{qs} N_{dr} P_g \\ L_{dsqr} &= N_{ds} N_{qr} P_g, & L_{dsdr} &= N_{ds} N_{dr} P_g \\ L_{qqr} &= L_{lqr} + N_{qr}^2 P_g, & L_{drdr} &= L_{lqr} + N_{dr}^2 P_g \end{aligned}$$

Considering the rotor motion, its mechanical model is expressed by [6]

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P}{2J_m} T_e(t) - \frac{P}{2J_m} T_L(t) - \frac{B_m \omega_r(t)}{J_m}$$

where  $T_e$  denotes electromagnetic torque, i.e.

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) L_{mq} i_{qs} (-i_{qs} \sin \theta_r - i_{dr} \cos \theta_r) + L_{mq} i_{ds} (-i_{qr} \cos \theta_r - i_{dr} \sin \theta_r)$$

and  $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$ . This model can be rewritten in a state-space form as

$$\begin{bmatrix} \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B_m}{J_m} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{P}{2J_m} \\ 0 \end{bmatrix} [T_e - T_L] \quad (6)$$

Combining the electrical and the mechanical state models results in the equation (7) representing a single-phase induction motor.

$$\begin{bmatrix} \frac{d[i]_{4 \times 1}}{dt} \\ \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathfrak{R}]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 2} \\ [0]_{2 \times 4} & \begin{bmatrix} -\frac{B}{J_m} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i]_{4 \times 1} \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathfrak{S}]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 2} \\ [0]_{2 \times 4} & \begin{bmatrix} \frac{P}{2J_m} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V]_{4 \times 1} \\ T_e - T_L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

in which

$$[i]_{4 \times 1} = [i_{qs} \quad i_{ds} \quad i_{qr} \quad i_{dr}]^T$$

$$[\mathfrak{R}]_{4 \times 4} = [A] - [D]^{-1} [C]$$

$$[\mathfrak{S}]_{4 \times 4} = [B] - [D]^{-1}$$

### 3. Modelling of Multiple Parallel - Connected Motors

Consider a two-motor set. Equation (7) in concatenated form for the set is equation (8). One can obtain a state model representing n motors in parallel connection through concatenation of n single-motor models as shown in equation (9).

$$\begin{bmatrix} \frac{d[i_{i_{1x1}}]}{dt} \\ \frac{d\omega_{r1}}{dt} \\ \frac{d\theta_{r1}}{dt} \\ \frac{d[i_{i_{2x1}}]}{dt} \\ \frac{d\omega_{r2}}{dt} \\ \frac{d\theta_{r2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathfrak{R}1]_{4x4} & [0]_{1x2} & [0]_{6x6} \\ [0]_{1x2} & \begin{bmatrix} -\frac{B_1}{J_{m1}} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} & [0]_{6x6} \\ [0]_{6x6} & [\mathfrak{R}2]_{4x4} & [0]_{1x2} \\ [0]_{6x6} & [0]_{1x2} & \begin{bmatrix} -\frac{B_2}{J_{m2}} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i]_{4x1} \\ \omega_{r1} \\ \theta_{r1} \\ [i]_{4x1} \\ \omega_{r2} \\ \theta_{r2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathfrak{S}1]_{4x4} & [0]_{1x2} & [0]_{6x6} \\ [0]_{1x2} & \begin{bmatrix} \frac{p_1}{2J_{m1}} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} & [0]_{6x6} \\ [0]_{6x6} & [\mathfrak{S}2]_{4x4} & [0]_{1x2} \\ [0]_{6x6} & [0]_{1x2} & \begin{bmatrix} \frac{p_2}{2J_{m2}} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V]_{4x1} \\ T_{e1} + T_{l1} \\ 0 \\ [V]_{4x1} \\ T_{e2} + T_{l2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [\Lambda_1] \\ [\Lambda_2] \\ [\Lambda_3] \\ \vdots \\ [\Lambda_n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathfrak{R}1]_{4x4} & [0]_{4x4} & [0]_{4x4} & \cdots & [0]_{4x4} \\ [0]_{4x4} & [\mathfrak{R}2]_{4x4} & [0]_{4x4} & \cdots & [0]_{4x4} \\ [0]_{4x4} & [0]_{4x4} & [\mathfrak{R}3]_{4x4} & \vdots & [0]_{4x4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [0]_{4x4} & [0]_{4x4} & [0]_{4x4} & \cdots & [\mathfrak{R}n]_{4x4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Lambda_1] \\ [\Lambda_2] \\ [\Lambda_3] \\ \vdots \\ [\Lambda_n] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathfrak{S}1]_{4x4} & [0]_{4x4} & [0]_{4x4} & \cdots & [0]_{4x4} \\ [0]_{4x4} & [\mathfrak{S}2]_{4x4} & [0]_{4x4} & \cdots & [0]_{4x4} \\ [0]_{4x4} & [0]_{4x4} & [\mathfrak{S}3]_{4x4} & \vdots & [0]_{4x4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [0]_{4x4} & [0]_{4x4} & [0]_{4x4} & \cdots & [\mathfrak{S}n]_{4x4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Theta_1] \\ [\Theta_2] \\ [\Theta_3] \\ \vdots \\ [\Theta_n] \end{bmatrix} \quad (9)$$

where

$$[\Lambda_k] = \begin{bmatrix} i_{qs,k} \\ i_{ds,k} \\ i_{qr,k} \\ i_{dr,k} \\ \omega_{r,k} \\ \theta_{r,k} \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad [\Theta_k] = \begin{bmatrix} V_{qs,k} \\ V'_{ds,k} \\ V'_{qr,k} \\ V'_{dr,k} \\ T_e - T_L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

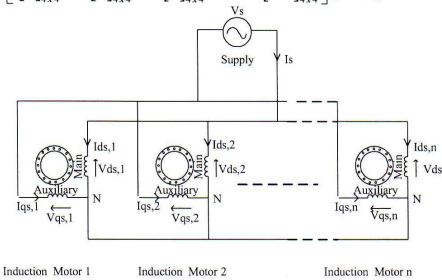


Fig. 3 Schematic diagram for a group of n parallel motors.

To analyze electromechanical characteristics of n parallel single-phase motors, a combination of an individual model for each motor needs to be defined in a single and large-sparse matrix to represent the entire system. Fig. 3 depicts a group of n parallel - connected motors. Let  $[\Lambda_k]$  and  $[\Theta_k]$  be state and input vectors of the  $k^{th}$  motor, respectively. The model for the  $k^{th}$  motor can be expressed explicitly as equation (10) with subscript k.

#### 4. Simulation Results

To verify effectiveness, correction and accuracy of the developed model, four test-case scenarios were assigned, in which three motors driving three separate centrifugal pumps connected in parallel, form the test bed. The four test cases are detailed as follows [7]-[10].

**Case 1:** all motors are technically the same in both parameters and loads.

- Motor 1: Parameter set 1, Load 1
- Motor 2: Parameter set 1, Load 1
- Motor 3: Parameter set 1, Load 1

**Case 2:** parameters of each motor are equal, but motors have different portions of loads.

- Motor 1: Parameter set 1, Load 1
- Motor 2: Parameter set 1, Load 2
- Motor 3: Parameter set 1, Load 3

**Case 3:** load of each motor is equal, while motor parameters are different.

- Motor 1: Parameter set 1, Load 1
- Motor 2: Parameter set 2, Load 1
- Motor 3: Parameter set 3, Load 1

**Case 4:** neither parameters nor loads of the motors are equal.

- Motor 1: Parameter set 1, Load 1
- Motor 2: Parameter set 2, Load 2
- Motor 3: Parameter set 3, Load 3

and loads are listed below

- Load torque 1:  $1.8 \times 10^{-4} \omega_r^2$  N.m
- Load torque 2:  $9.5 \times 10^{-5} \omega_r^2$  N.m
- Load torque 3:  $7.5 \times 10^{-5} \omega_r^2$  N.



Table 1 Motor parameters [11]-[13].

Parameter set	poles	$r_{qs}$ ( $\Omega$ )	$r_{ds}$ ( $\Omega$ )	$r_r$ ( $\Omega$ )	$L_{mqs}$ (H)	$L_{lr}$ (H)	$L_{lqs}$ (H)	$L_{lds}$ (H)	J ( $kg.m^2$ )	$B_m$ ( $N.m/rad/sec$ )
1	4	4.3	2.6	2.01	105	1.8	1.01	1.8	0.0546	0.0002
2	4	1.3	2.6	2.01	105	2.8	2.01	2.8	0.0546	0.0002
3	4	3.2	7.2	2.00	54.97	3.2	3.61	2.09	0.0546	0.0002

Table 2 Steady-state performances of each test case

	Case 1			Case 2			Case 3			Case 4		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Supply Current ( $A_{rms}$ )	25.44			17.48			32.42			22.07		
Motor Current ( $A_{rms}$ )	8.48	8.48	8.48	8.48	4.85	4.15	8.48	10.09	13.85	8.48	5.91	7.68
Motor Speed (rpm)	1402	1402	1402	1402	1450	1461	1402	1408	1370	1402	1452	1455
Load Torque (N.m)	14.27	14.27	14.27	14.27	7.78	6.14	14.27	14.46	17.74	14.27	9.33	8.62
Motor Slip	0.065	0.065	0.065	0.065	0.033	0.026	0.065	0.061	0.086	0.065	0.032	0.030

Simulations for each test case were conducted by applying a 220-V, 50-Hz sinusoidal voltage source to energize the motor group.

noticed from the fig. 8-9 that the current responses depend mostly on the motor parameters. Fig. 10-11 also confirm that the load characteristics affect the current responses. Case 4 (different motor parameters and different loads) has very rich dynamic. So, speed, torque, and current responses of case 4 are illustrated in more details in fig. 12-15. In this case, each motor has its own responses different from the others. The case is difficult to control, and the drive must be rated carefully.

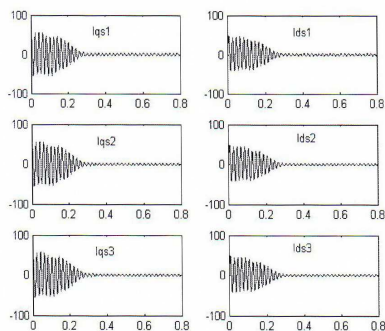


Fig. 4 Stator currents (A) of case 1

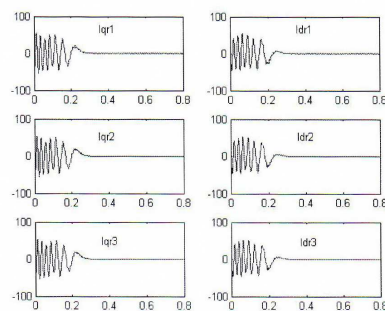


Fig. 5 Rotor currents (A) of case 1

To briefly present the results, steady-state values of some key characteristics for each motor and for the entire group are summarized in table 1. The stator and the rotor currents are depicted in fig. 4-11. It can be

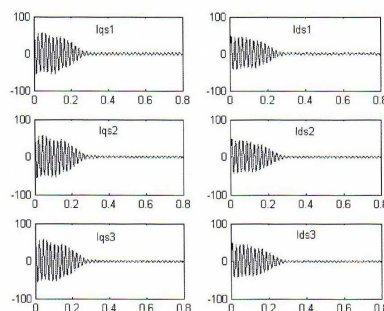


Fig. 6 Stator currents (A) of case 2

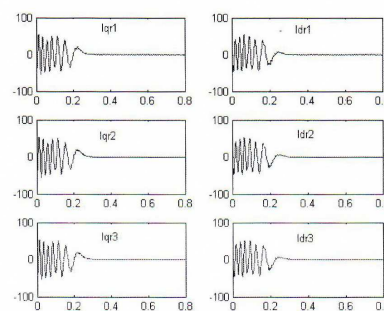


Fig. 7 Rotor currents (A) of case 2

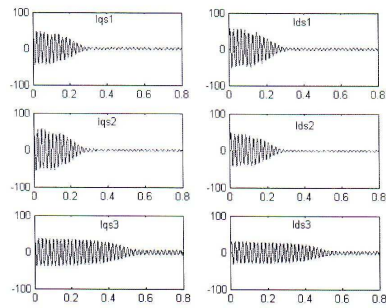


Fig. 8 Stator currents (A) of case 3

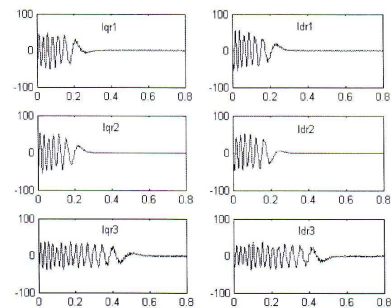


Fig. 9 Rotor currents (A) of case 3

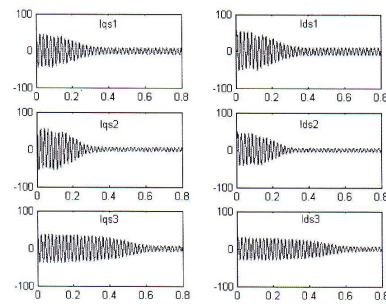


Fig. 10 Stator currents (A) of case 4

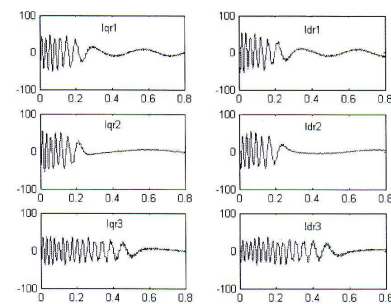


Fig. 11 Rotor currents (A) of case 4

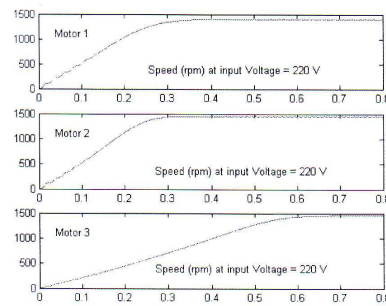


Fig. 12 Motor speeds (rpm) of case 4

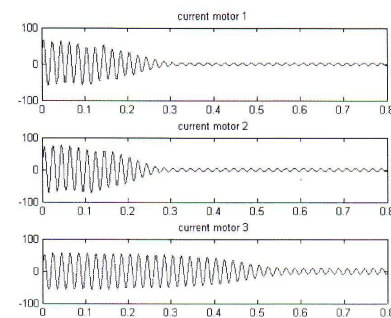


Fig. 13 Currents (A) drawn by each motor of case 4

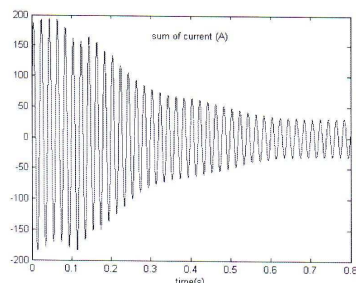


Fig. 14 Currents (A) of the motor group of case 4

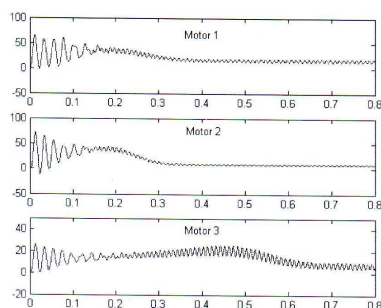


Fig. 15 Motor torques (N.m) of case 4

As can be seen, the simulation results reveal electromechanical characteristics for all motors of the group. By the method proposed in this paper, several motors connected in parallel can be analyzed, numerically. The proposed model is simple, yet efficient to be included into a simulation algorithm of a high-performance drive. In order to reduce model complexity, one can benefit significantly from this proposed model.

## 5. Conclusion

The development of the state models for multiple single-phase induction motors in parallel connection has been explained with simulation results presented. The model in general form is useful for practical consideration under various load and drive conditions. The model is direct and simple. Although the system matrix resulting from this model is sizeable, it is remarkably sparse. With the help from MATLAB, solutions of the time series state equations representing the motor group are easily obtained. Our further research is to develop sensorless drive technology on the basis of the results presented herein. Speed and torque observers will be developed correspondingly with minimum loss in a motor group taken into account. One simple question still left open is that how many motors in parallel connection can be stably driven by a single inverter.

## References:

- [1] Y. Matsumoto, S. Ozaki, and A. Kawamura, A novel vector control of single-inverter multiple-induction-motors drives for Shinkansen traction system, *IEEE Applied Power Electronics conference and Exposition (APEC '2001.)*, Vol. 1, 2001, pp. 608 – 614.
- [2] B. Wu, S.B. Dewan, and P.C. Sen, A modified current source inverter for a multiple induction motor drive system, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 3, No. 1, 1988, pp. 10–16.
- [3] M.B.R. Correa, C.B. Jacobina, A.M.N. Lima, and E.R.C. da Silva, Single-phase induction motor drives systems, *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC '99.)*, Vol. 1, 1999, pp. 403 – 409.
- [4] C-M. ong, *Dynamic Simulation of Electric machinery using MATLAB/SIMULINK*, Prentice Hall, 1998
- [5] R. Krishnan, *Electric Motor Drives Modeling, Analysis, and Control*, Prentice Hall, 2001.
- [6] P.C. Krause, O. Wasynczuk, and S.D. Sudhoff, *Analysis of Electrical Machinery*, IEEE Press, 1995.
- [7] M.B.R. Correa, C.B. Jacobina, A.M.N. Lima, and E.R.C. da Silva, Vector control strategies for single-phase induction motor drive systems, *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 51, No. 5, 2004, pp. 1073 – 1080.
- [8] D.H. Jang, Voltage, frequency, and phase-difference angle control of PWM inverters-fed two-phase induction motors, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 9, No. 4, 1994, pp. 377 – 383.
- [9] K. Matsuse, Y. Kouno, H. Kawai, and S. Yokomizo, A speed-sensorless vector control method of parallel-connected dual induction motor fed by a single inverter, *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 38, No. 6, 2002, pp. 1566– 1571.
- [10] K. Matsuse, Y. Kouno, H. Kawai, and J. Oikawa, Characteristics of speed sensorless vector controlled dual induction motor drive connected in parallel fed by a single inverter, *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 40, No. 1, 2004, pp. 153 – 161.
- [11] C. Mademlis, I. Kioskeridis, and T. Theodoulidis, Optimization of single-phase induction motors-Part I: Maximum energy efficiency control, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 20, No. 1, 2005, pp. 187 – 195.
- [12] K. Matsuse, S. Taniguchi, T. Yoshizumi, and K. Namiki, A speed-sensorless vector control of induction motor operating at high efficiency taking core loss into account, *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 37, No. 2, 2001, pp. 548 – 558.
- [13] M.B.R. Correa, C.B. Jacobina, A.M.N. Lima, and E.R.C. da Silva, Rotor-flux-oriented control of a single-phase induction motor drive,

*IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 47, No. 4, 2000, pp. 832 – 841.

### Notation List

- $B_m$  viscous friction coefficient (N•m/rad/sec)
- $i_{qs}, i_{ds}, i_{qr}, i_{dr}$  the q- axis and the d- axis current components of stator and rotor (A)
- $J_m$  moment of inertia (Kg -m<sup>2</sup>)
- $N_{qs}, N_{ds}, N_{qr}, N_{dr}$  winding turns on the q-axis and the d-axis of stator and rotor
- $L_{lqs}$  leakage inductance of the stator main winding (H)
- $L_{lds}$  leakage inductance of the stator auxiliary winding (H)
- $L_{lr}$  leakage inductance on the rotor winding (H)
- $L_{mq}, L_{md}$  mutual inductances on the d- and the q-axes (H)
- $L_{qqs}$  self inductance on the stator q-axis (H)
- $L_{qds}$  cross inductance between the stator q- and d- axes (H)
- $L_{qsqr}$  cross inductance between the stator q-axis and the rotor q-axis (H)
- $L_{qdr}$  cross inductance between the stator q-axis and the rotor d-axis (H)
- $L_{dsds}$  self inductance on the stator d-axis (H)
- $L_{dsqr}$  cross inductance between the stator d-axis and the rotor q-axis (H)
- $L_{dsdr}$  cross inductance between the stator d-axis and the rotor d-axis (H)
- $p$   $d / dt$
- $P$  number of poles (pole)
- $P_g$  permeance of airgap
- $r_{qs}, r_{ds}, r_{qr}, r_{dr}$  the q-axis and the d-axis resistance components of stator and rotor ( $\Omega$ )
- $T_e$  electromagnetic torque (Nm)
- $T_L$  load torque (Nm)
- $V_{qs}, V_{ds}, V_{qr}, V_{dr}$  the q-axes and d-axes voltage components on stator and rotor(V)
- $\omega_r$  speed (rad/s)
- $\theta_r$  phase difference between the  $q_r$  and  $q_s$  axes (rad)
- superscript  $S$  denotes stator-side quantities
- superscript  $r$  denotes rotor-side quantities
- superscript ' denotes transformed quantities to the reference q- axis of the stator

---



---

**นิพนธ์ต้นฉบับ**


---



---

## แบบจำลองและการจำลองผลมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ที่เชื่อมต่อหลายตัวแบบขนาน

ศักดิ์ระวี ระวีกุล<sup>1</sup> ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์<sup>2</sup> และ สรวุฒิ สัจจิตจร<sup>3</sup>

### Abstract

Raweekul, S., Kulworawanichpong, T., and Sujitjorn, S.

### Modelling and simulation of multiple single - phase induction motor in parallel connection

Songklanakarin J. Sci. Technol., 2006, 28(6) : 1335-1350

A mathematical model for parallel connected n-multiple single-phase induction motors in generalized state-space form is proposed in this paper. The motor group draws electric power from one inverter. The model is developed by the dq-frame theory and was tested against four loading scenarios in which satisfactory results were obtained.

**Key words :** single-phase induction motor, multiple, parallel connection, modelling

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand.

<sup>1</sup>นักศึกษาริญาเอก สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ <sup>2</sup>Ph.D.(Electrical Engineering), ผู้ช่วยศาสตราจารย์ <sup>3</sup>Ph.D.(Electrical Engineering), ศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Corresponding e-mail: mr\_sakrawee@yahoo.com

รับต้นฉบับ 5 มกราคม 2549      รับลงพิมพ์ 8 พฤษภาคม 2549

## บทคัดย่อ

ศักดิ์ระวี ระวีกุล ธนัชชัย กุลวรรณพงษ์ และ สรวุฒิ สุจิตจร  
แบบจำลองและการจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่เชื่อมค่อหลายตัวแบบขนาน  
ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2549 28(6) : 1335-1350

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสซึ่งต่อขนานกัน  $n$  ตัว ในรูปของสมการปริภูมิสแตตที่นำเสนอในบทความนี้ได้พัฒนาให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นลักษณะทั่วไปเพื่อให้ง่ายในการนำมาใช้ประโยชน์ในงานที่มีมอเตอร์หลายตัวต่อขนาน รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายผ่านอินเวอร์เตอร์ชุดเดียว แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นอาศัยหลักการ dq-frame พร้อมกันนี้ได้ทำการทดสอบแบบจำลองการขนานมอเตอร์  $n$  ตัวที่ได้พัฒนาขึ้น โดยจำลองการขับโหลดในสภาวะต่าง ๆ 4 สภาวะ ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน

ในโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง อุตสาหกรรมเส้นใยและถักทอ และอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร มีการใช้เครื่องจักรกลที่ประกอบด้วย มอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำหน้าที่ขับเคลื่อนกระบวนการต่างๆ เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำมีโครงสร้างแข็งแรงและใช้งานง่าย การควบคุมมอเตอร์ให้ทำงานต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพ ความคุ้มค่าทางด้านพลังงานและการลงทุน ในบางกิจกรรมของโรงงานอุตสาหกรรมจะต้องใช้มอเตอร์ที่มีพิกัดเท่ากัน ทำงานขับโหลดที่มีสมบัติคล้ายกันหลายๆ ตัว สิ่งที่ต้องการตามมาคืออุปกรณ์ควบคุมที่ต้องใช้ควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์แต่ละตัว อุปกรณ์ดังกล่าวมักจะมีราคาแพง หากสามารถใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อนเพียงชุดเดียวกับมอเตอร์หลายตัวที่ต่อขนานกันก็จะเป็นการช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ระดับหนึ่ง ดังเช่น ที่มีการใช้ในระบบลากจูงรถไฟ (Matsuse et al., 2001) การใช้เทคโนโลยีในแวนนี้มีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภทที่มีอัตราพิกัดและธรรมชาติของโหลดแตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาพัฒนาระบบอุตสาหกรรมที่มีขนาดเล็ก กำลังการผลิตต่ำ และต้องการระบบที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก เช่น อุตสาหกรรมขนาดย่อม ในการพัฒนาเทคโนโลยีการขับเคลื่อนมอเตอร์ต่อขนานกันหลายตัวนั้น จะต้องอาศัยองค์ความรู้เกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์แบบจำลองในบทความนี้ได้มุ่งเน้นพัฒนาแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดหนึ่งเฟสที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมขนาดย่อม เพื่อให้เกิดความเหมาะสมในระบบ

การผลิตที่ใช้อุปกรณ์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสต่อขนานกันหลายตัว ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์เพียงตัวเดียว ซึ่งในการวิเคราะห์หาแบบจำลองนี้ จะพิจารณาแหล่งจ่ายออกเป็นสองเฟส (Jang et al., 1994) แหล่งจ่ายสองเฟสนี้ได้มาจากอินเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟสตามธรรมดาที่มีใช้กันโดยทั่วไป ระบบขับเคลื่อนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสลักษณะเช่นนี้ มีประโยชน์มากต่ออุตสาหกรรมขนาดเล็กและกลาง การพัฒนาแบบจำลองนั้นพิจารณาตามการวางตัวของชุดขดลวดโรเตอร์และชุดขดลวดสเตเตอร์ ทำให้สนามแม่เหล็กของชุดขดลวดทั้งสองตั้งฉากกัน ดังนั้นหลักการ dq-frame (Mutsuse et al., 2004), (Krishnan, 2001) จึงเป็นพื้นฐานของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอ

ในการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้แบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ 1. ส่วนของการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสโดยใช้ทฤษฎีกรอบอ้างอิง 2. การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการขนานมอเตอร์  $n$  ตัวในรูปของสมการปริภูมิสแตต 3. การจำลองผลโดยทดสอบแบบจำลองในสภาวะต่างๆ 4 สภาวะ และในส่วนสุดท้ายเป็นการสรุป

## 1. แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

ในการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว จะพิจารณาจากโครงสร้างของมอเตอร์ (Krishnan, 2001) ซึ่งประกอบด้วย ขดลวด 2 ชุด

ว. สงขลานครินทร์ วิทยาเขต  
ปีที่ 28 ฉบับที่ 6 พ.ย. - ธ.ค. 2549

1337

การจำลองผลมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว  
ศักดิ์ระวี ธีระวิกุล และคณะ

คือชุดที่อยู่บนสเตเตอร์ ประกอบด้วย ขดลวดหลัก (main winding) และขดลวดช่วย (auxiliary winding) ส่วนชุดที่สองนั้นอยู่ที่โรเตอร์ดังแสดงใน Figure 1 ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้แบบสองเฟส หรืออาจเรียกว่าสองแกน ซึ่งประกอบด้วย แกน d และแกน q ตั้งฉากกัน วิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อาศัยหลักการ dq-frame การพัฒนาแบบจำลองมีการย้ายตัวแปรบนโรเตอร์ไปอยู่บนสเตเตอร์ตามทฤษฎีกรอบอ้างอิง (reference frame theory) (Krause *et al.*, 1995) Figure 2 แสดงการวางตัวของชุดขดลวดที่อยู่บนสเตเตอร์ โดยแกน q คือแกนของขดลวดหลักที่มีค่าแรงดันเป็น  $V_{qs}$  มีกระแสไหลในขดลวดเป็น  $i_{qs}$  และมีจำนวนรอบขดลวดเป็น  $N_{qs}$  แกน d คือแกนของขดลวดช่วยที่มีค่าแรงดันเป็น  $V_{ds}$  มีกระแสไหลในขดลวดเป็น  $i_{ds}$  และมีจำนวนรอบขดลวดเป็น  $N_{ds}$  ในส่วนของโรเตอร์จะประกอบด้วยแกน q มีค่าแรงดันเป็น  $V_{qr}$  มีกระแสไหลในขดลวดเป็น  $i_{qr}$  และมีจำนวนรอบขดลวดเป็น  $N_{qr}$  แกน d มีค่าแรงดันเป็น  $V_{dr}$  มีกระแสไหลในขดลวดเป็น  $i_{dr}$  และมีจำนวนรอบขดลวด

เป็น  $N_{dr}$  เมื่อแกน  $q_r$  ทำมุมกับแกน  $q_s$  อยู่  $\theta$  สามารถแยกเวกเตอร์เข้าสู่แกนหลักของขดลวดสเตเตอร์โดยใช้ทฤษฎีกรอบอ้างอิง จากแผนภาพขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำพิจารณาในแบบสองแกนดังที่แสดงใน Figure 2 สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของแรงดันในรูปเมตริกซ์ โดยกำหนดให้ค่าที่มีตัวยก  $s$  แสดงถึงค่าที่อยู่บนสเตเตอร์ ในทำนองเดียวกันค่าที่มีตัวยก  $r$  แสดงถึงค่าที่อยู่บนโรเตอร์

$$\begin{bmatrix} V_{qr}^s \\ V_{dr}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(90-\theta_r) \\ \cos(90+\theta_r) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qr}^r \\ V_{dr}^r \end{bmatrix} \quad (1)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} V_{qr}^r \\ V_{dr}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r \\ -\sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qr}^s \\ V_{dr}^s \end{bmatrix} \quad (2)$$

สมการที่ 2 สามารถเขียนให้กระชับได้ว่า

$$[S_{sr}^r] = [k][S_{sr}^s] \quad (3)$$

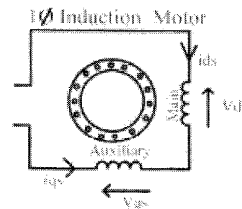


Figure 1. Winding composition

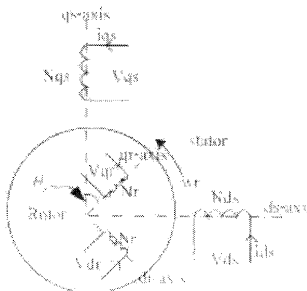


Figure 2. Orientation of the stator and the rotor windings.

เมื่อ  $\Sigma_{vr}^s$  คือ ค่าใดๆ ที่แปลงแกนจากโรเตอร์มายังสเตเตอร์  
 $\Sigma_{vr}^r$  คือ ค่าใดๆ ที่อยู่บนโรเตอร์  
 $k$  คือ เมตริกซ์การแปลงระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์

$$[k] \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r \\ -\sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix}$$

ในการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสนี้ จะแยกพิจารณาออกเป็นสองส่วน คือ พิจารณาสถาส่วนของสเตเตอร์ และส่วนของโรเตอร์ ดังนี้

1) พิจารณาสถาส่วนของสเตเตอร์

จากสมการแรงดันที่เกิดขึ้นบนสเตเตอร์ จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดัน กระแส ความต้านทาน และความเหนี่ยวนำ ดังนี้

$$V_{qs} = r_{qs}i_{qs} + L_{qsqs}p i_{qs} + L_{qsds}p i_{ds} + L_{qsqr}p i_{qr} + L_{qsdr}p i_{dr}$$

$$V_{ds} = r_{ds}i_{ds} + L_{dsqs}p i_{qs} + L_{dsds}p i_{ds} + L_{dsqr}p i_{qr} + L_{dsdr}p i_{dr}$$

เมื่อ  $p$  คือ อนุพันธ์อันดับหนึ่งเทียบกับเวลา และสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ได้ว่า

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} + pL_{qsqs} & pL_{qsds} \\ pL_{dsqs} & r_{ds} + pL_{dsds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} + p \left\{ \begin{bmatrix} L_{qsqr} & L_{qsdr} \\ L_{dsqr} & L_{dsdr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix} \right\} \quad (4)$$

ในสมการที่ 4 จะเห็นว่ามีส่วนของกระแสโรเตอร์อยู่ทางขวามือสุดของสมการ ทำการย้ายกระแสโรเตอร์ไปยังสเตเตอร์ ด้วยเมตริกซ์การแปลงแกนดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} = [k] \begin{bmatrix} i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix} \quad \text{หรือ} \quad \begin{bmatrix} i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix} = [k]^{-1} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix}$$

จึงสามารถเขียนแสดงสมการ (4) ได้ในรูป

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} + pL_{qsqs} & pL_{qsds} \\ pL_{dsqs} & r_{ds} + pL_{dsds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} + p \left\{ \begin{bmatrix} L_{qsqr} & L_{qsdr} \\ L_{dsqr} & L_{dsdr} \end{bmatrix} [k]^{-1} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} \right\}$$

นั่นก็คือ

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} + pL_{qsqs} & pL_{qsds} \\ pL_{dsqs} & r_{ds} + pL_{dsds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} + p \left\{ \begin{bmatrix} L_{qsqr} & L_{qsdr} \\ L_{dsqr} & L_{dsdr} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \cos\theta_r & -\sin\theta_r \\ \sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \right\} \quad (5)$$

เมื่อค่าเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กระหว่างแกน d-q ในฝั่งขวาของสมการ (5) ตั้งฉากกันทำให้มีค่าความเหนี่ยวนำเป็นศูนย์ จัดรูปสมการ (5) ใหม่จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} & 0 \\ 0 & r_{ds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qsqr} & 0 \\ 0 & L_{dsqr} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} + p \left\{ \begin{bmatrix} L_{qsqr} \cos\theta_r & -L_{qsqr} \sin\theta_r \\ L_{dsqr} \sin\theta_r & L_{dsqr} \cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \right\} \quad (6)$$

นั่นก็คือ



ว. สงขลานครินทร์ วิทยา.

ปีที่ 28 ฉบับที่ 6 พ.ย. - ธ.ค. 2549

1339

การจำลองผลมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

ศักดิ์ระวี ระวังกุล และคณะ

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} & 0 \\ 0 & r_{ds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qsq} & 0 \\ 0 & L_{dsq} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_r L_{qsq} \sin \theta_r & -\omega_r L_{qsd} \cos \theta_r \\ \omega_r L_{dsd} \cos \theta_r & -\omega_r L_{dsq} \sin \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qsq} \cos \theta_r & -L_{qsd} \sin \theta_r \\ L_{dsd} \sin \theta_r & L_{dsd} \cos \theta_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \quad (7)$$

## 2) พิจารณาที่โรเตอร์

พิจารณาในกรณีที่โรเตอร์สมมาตร กล่าวคือ จำนวนรอบของขดลวดในแนวแกน d และ q มีค่าเท่ากันและความต้านทานของขดลวดที่โรเตอร์ในแนวแกน d และ q จะมีค่าเท่ากัน ( $r_{qr} = r_{dr} = r_r$ ) และสมการแรงดันที่โรเตอร์เป็นดังนี้

$$V_{qr}^r = r_{qr} i_{qr} + L_{qqr} p i_{qr} + L_{qsd} p i_{dr} + L_{qrs} p i_{qs} + L_{qrd} p i_{ds}$$

$$V_{dr}^r = r_{dr} i_{dr} + L_{drq} p i_{qr} + L_{dsd} p i_{dr} + L_{drs} p i_{qs} + L_{drd} p i_{ds}$$

และอาจจัดให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_{qr}^r \\ V_{dr}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qr} + pL_{qqr} & pL_{qdr} \\ pL_{drq} & r_{dr} + pL_{drd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_{qqs} & L_{qds} \\ L_{drq} & L_{drs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} \quad (8)$$

ทำการย้ายตัวแปรแรงดันและกระแสที่อยู่บนโรเตอร์ไปยังสเตเตอร์ ด้วยหลักการแปลงแกนดังนี้แปลงกระแส

$$[i_r^r] = [k]^{-1} [i_r^s] \quad (9)$$

แปลงแรงดัน

$$[V_r^r] = [k]^{-1} [V_r^s] \quad (10)$$

สมการ (8) จึงอาจเขียนแสดงได้ดังรูปสมการ (11) และ (12) ตามลำดับ

$$[k]^{-1} \begin{bmatrix} V_{qr}^r \\ V_{dr}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qr} + pL_{qqr} & pL_{qdr} \\ pL_{drq} & r_{dr} + pL_{drd} \end{bmatrix} \bullet [k]^{-1} \begin{bmatrix} i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_{qqs} & L_{qds} \\ L_{drq} & L_{drs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} V_{qr}^s \\ V_{dr}^s \end{bmatrix} = [k] \begin{bmatrix} r_{qr} & 0 \\ 0 & r_{dr} \end{bmatrix} [k]^{-1} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + [k] \begin{bmatrix} L_{qqr} & L_{qdr} \\ L_{drq} & L_{drs} \end{bmatrix} [k]^{-1} p \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + p \left\{ [k] \begin{bmatrix} L_{qqs} & L_{qds} \\ L_{drq} & L_{drs} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} \quad (12)$$

พิจารณาฝั่งขวาของสมการ (12) จะเห็นว่ามีส่วนพจน์รวมกันทางพีชคณิต เมื่อพิจารณาพจน์ที่ 1 คือพจน์ที่อยู่ชุดแรกทางฝั่งขวาของสมการ นั่นคือ

$$[k] \begin{bmatrix} r_{qr} & 0 \\ 0 & r_{dr} \end{bmatrix} [k]^{-1} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix}$$

ทำการแทนค่าเมตริกซ์  $[k]$  และเมตริกซ์  $[k]^{-1}$  จะได้

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r \\ -\sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{qr} & 0 \\ 0 & r_{dr} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \cos\theta_r & -\sin\theta_r \\ \sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix}$$

จัดรูปให้ง่ายขึ้นจะได้

$$\begin{bmatrix} r_{qr} \cos^2\theta_r + r_{dr} \sin^2\theta_r & -r_{qr} \cos\theta_r \sin\theta_r + r_{dr} \sin\theta_r \cos\theta_r \\ -r_{qr} \cos\theta_r \sin\theta_r + r_{dr} \sin\theta_r \cos\theta_r & r_{dr} \cos^2\theta_r + r_{qr} \sin^2\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix}$$

ในกรณีที่  $r_{qr} = r_{dr} = r_r$  ตลอดจน  $\cos^2\theta_r + \sin^2\theta_r = 1$

พจน์ดังกล่าวจึงลดรูปเป็น

$$\begin{bmatrix} r_r & 0 \\ 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \quad (13)$$

พิจารณาส่วนที่ 2 ที่อยู่ทางฝั่งขวาของสมการ (12) ในกรณีที่ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างแกน d-q ของโรเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากแกนทั้งสองอยู่ในตำแหน่งทำมุมตั้งฉากซึ่งกันและกัน พร้อมทั้งแทนค่าเมตริกซ์  $[k]$  และ  $[k]^{-1}$  พจน์ที่ได้เป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r \\ -\sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{qqr} & 0 \\ 0 & L_{ddr} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \cos\theta_r & -\sin\theta_r \\ \sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \quad (14)$$

จัดรูปให้ง่ายขึ้นจะได้

$$\begin{bmatrix} L_{qqr} \cos^2\theta_r + L_{ddr} \sin^2\theta_r & -L_{qqr} \sin\theta_r \cos\theta_r + L_{ddr} \sin\theta_r \cos\theta_r \\ -L_{qqr} \sin\theta_r \cos\theta_r + L_{ddr} \sin\theta_r \cos\theta_r & L_{qqr} \cos^2\theta_r + L_{ddr} \sin^2\theta_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \quad (15)$$

เมื่อความเหนี่ยวนำตัวเอง (self inductance) ของโรเตอร์บริเวณแกน q และ d มีค่าเท่ากัน  $L_{qqr} = L_{ddr}$  เนื่องจากมีจำนวนรอบของขดลวดเท่ากัน พจน์ (15) สามารถลดรูปได้เป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} L_{qqr} & 0 \\ 0 & L_{qqr} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \quad (16)$$

เมื่อพิจารณาพจน์ที่ 3 คือพจน์ที่อยู่ชุดสุดท้ายทางฝั่งขวาของสมการ (12) ซึ่งก็คือ

$$p \left\{ \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r \\ -\sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{qqs} & L_{qds} \\ L_{dqs} & L_{dds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} \right\} \quad (17)$$

เมื่อคืออนุพันธ์อันดับหนึ่งเทียบกับเวลาเราสามารถจัดรูปพจน์ (17) ได้ใหม่ดังนี้

$$\begin{bmatrix} -\omega_r L_{qqs} \sin\theta_r + \omega_r L_{dqs} \cos\theta_r & -\omega_r L_{qds} \sin\theta_r + \omega_r L_{dds} \cos\theta_r \\ -\omega_r L_{dqs} \cos\theta_r - \omega_r L_{qqs} \sin\theta_r & -\omega_r L_{dds} \cos\theta_r - \omega_r L_{qds} \sin\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qqs} \sin\theta_r + L_{dqs} \sin\theta_r & L_{qds} \cos\theta_r + L_{dds} \sin\theta_r \\ -L_{dqs} \sin\theta_r + L_{qqs} \cos\theta_r & -L_{qds} \sin\theta_r + L_{dds} \cos\theta_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \quad (18)$$

ว. สงขลานครินทร์ วิทยาเขต.

ปีที่ 28 ฉบับที่ 6 พ.ย. - ธ.ค. 2549

1341

การจำลองผลมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

ศักดิ์ระวี ระบุวิกุล และคณะ

เมื่อนำพจน์ (13), (16) และ (17) แทนกลับลงในสมการ (12) จะได้สมการ (19) จากการที่ย้ายค่ากระแสมาอยู่บนแกน dq ของสเตเตอร์จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำระหว่างแกน d และแกน q หายไป เนื่องจากขดลวดทั้งสองทำมุมกัน 90 องศา

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} V_{qr}^s \\ V_{dr}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_r & 0 \\ 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qqr} & 0 \\ 0 & L_{qqr} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} -\omega_r L_{qqs} \sin \theta_r + \omega_r L_{drqs} \cos \theta_r & -\omega_r L_{qds} \sin \theta_r + \omega_r L_{drds} \cos \theta_r \\ -\omega_r L_{qqs} \cos \theta_r - \omega_r L_{drqs} \sin \theta_r & -\omega_r L_{qds} \cos \theta_r - \omega_r L_{drds} \sin \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} L_{qqs} \cos \theta_r + L_{drqs} \sin \theta_r & L_{qds} \cos \theta_r + L_{drds} \sin \theta_r \\ -L_{qqs} \sin \theta_r + L_{drqs} \cos \theta_r & -L_{qds} \sin \theta_r + L_{drds} \cos \theta_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

กระแสจากโรเตอร์ที่ย้ายมาอยู่บนแกน q ของสเตเตอร์ไม่สามารถสร้างความเหนี่ยวนำไปยังแกน d ของสเตเตอร์ได้ ค่าความเหนี่ยวนำของแกน dq ในสมการ (19) จึงมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} V_{qr}^s \\ V_{dr}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_r & 0 \\ 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qqr} & 0 \\ 0 & L_{qqr} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_r L_{qqs} \sin \theta_r & \omega_r L_{drds} \cos \theta_r \\ -\omega_r L_{qqs} \cos \theta_r & \omega_r L_{drds} \sin \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} L_{qqs} \cos \theta_r & L_{drds} \sin \theta_r \\ -L_{qqs} \sin \theta_r & L_{drds} \cos \theta_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

เมื่อทำการแปลงแกนตามหลักการรอบอ้างอิงอยู่กับที่ ดังที่ได้แสดงมาแล้วข้างต้น สามารถนำส่วนที่เป็นสมการแรงดันของสเตเตอร์และโรเตอร์มาเขียนให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ได้ดังสมการ (21)

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ V_{qr}^s \\ V_{dr}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} & 0 & -\omega_r L_{qsqr} \sin \theta_r & -\omega_r L_{qsdr} \cos \theta_r \\ 0 & r_{ds} & \omega_r L_{dsqr} \cos \theta_r & -\omega_r L_{dsdr} \cos \theta_r \\ -\omega_r L_{qqs} \sin \theta_r & -\omega_r L_{drdr} \cos \theta_r & r_r & 0 \\ -\omega_r L_{qqs} \cos \theta_r & -\omega_r L_{drdr} \cos \theta_r & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \\ i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} L_{qsqs} & 0 & L_{qsqr} \cos \theta_r & -L_{qsqr} \sin \theta_r \\ 0 & L_{dsds} & L_{dsdr} \sin \theta_r & L_{dsdr} \cos \theta_r \\ L_{qqs} \cos \theta_r & L_{drdr} \sin \theta_r & L_{qsqr} & 0 \\ -L_{drqs} \sin \theta_r & L_{drds} \cos \theta_r & 0 & L_{drdr} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \\ i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

สมการ (21) สามารถหาค่าความสัมพันธ์ของค่าแรงดัน กระแส ความต้านทาน และจำนวนรอบของขดลวดแต่ละขดเมื่อย้ายตัวแปรบนแกน dq ของโรเตอร์ไปอยู่บนแกน dq ของสเตเตอร์

กำหนดให้

$N_{qs}$  คือ จำนวนรอบของขดลวดหลัก (Main winding)

$N_{ds}$  คือ จำนวนรอบของขดลวดช่วย (Auxiliary winding)

$N_{qr} = N_{dr} = N_r$  คือ จำนวนรอบของขดลวดโรเตอร์

และค่าที่มีตัวยก " ' " หมายถึงค่าที่ย้ายมาอยู่บนแกนอ้างอิง q ของสเตเตอร์

$$\begin{aligned}
 V'_{ds} &= \frac{N_{qs}}{N_{ds}} V_{ds} & , & \quad i'_{ds} = \frac{N_{qs}}{N_{ds}} i_{ds} \\
 L_{mq} &= N_{qs}^2 P_g & , & \quad L'_{ds} = \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}}\right)^2 N_{ds}^2 P_g = L_{mq} \\
 L'_{lds} &= \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}}\right)^2 L_{lds} & , & \quad r'_{ds} = \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}}\right)^2 r_{ds} \\
 L'_{lr} &= \left(\frac{N_{qs}}{N_r}\right)^2 L_{lr} & , & \quad r'_r = \left(\frac{N_{qs}}{N_r}\right)^2 r_r \\
 V'_{qr} &= \frac{N_{qs}}{N_r} V_{qr}^s & , & \quad V'_{dr} = \frac{N_{qs}}{N_r} V_{dr}^s \\
 i'_{qr} &= \frac{N_r}{N_{qs}} i_{qr}^s & , & \quad i'_{dr} = \frac{N_r}{N_{qs}} i_{dr}^s
 \end{aligned}$$

สามารถเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดแต่ละชุดเป็นค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (magnetic inductance) ด้วยความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้ (Ong, 1998)

$$\begin{aligned}
 L_{qqs} &= L_{lqs} + N_{qs}^2 P_g & , & \quad L_{dss} = L_{lds} + N_{ds}^2 P_g \\
 L_{qsr} &= N_{qs} N_{qr} P_g & , & \quad L_{qdr} = N_{qs} N_{dr} P_g \\
 L_{dsqr} &= N_{ds} N_{qr} P_g & , & \quad L_{dsdr} = N_{ds} N_{dr} P_g \\
 L_{qqr} &= L_{lqr} + N_{qr}^2 P_g & , & \quad L_{drdr} = L_{lqr} + N_{dr}^2 P_g
 \end{aligned}$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการ (21) โดยพิจารณาให้จำนวนรอบของขดลวดเท่ากัน จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ V_{qr}^s \\ V_{dr}^s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_{qs} & 0 & -\omega_r L_{mq} \sin \theta_r & -\omega_r L_{mq} \cos \theta_r \\ 0 & r'_{ds} & \omega_r L_{mq} \cos \theta_r & -\omega_r L_{mq} \cos \theta_r \\ -\omega_r L_{mq} \sin \theta_r & \omega_r L_{mq} \cos \theta_r & r'_r & 0 \\ -\omega_r L_{mq} \cos \theta_r & -\omega_r L_{mq} \cos \theta_r & 0 & r'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} + \\
 & \begin{bmatrix} L'_{lqs} + L_{mq} & 0 & L_{mq} \cos \theta_r & -L_{mq} \sin \theta_r \\ 0 & (L'_{lds} + L_{mq}) & L_{mq} \sin \theta_r & L_{mq} \cos \theta_r \\ L_{mq} \cos \theta_r & L_{mq} \sin \theta_r & (L'_r + L_{mq}) & 0 \\ -L_{mq} \sin \theta_r & L_{mq} \cos \theta_r & 0 & (L'_r + L_{mq}) \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (22)
 \end{aligned}$$

และสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการสเตตได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt} [i] = [A][i] + [B][v] \quad (23)$$

ว. สขขณครนทร วทท.

ปทท 28 ลบบที่ 6 พ.ย. - ธ.ค. 2549

1343

การจำลองผลมอดอร์เหนยวนำเฟสเดยว

ศกครระว ระวฤล และคณะ

$$[i] = [i_{qs} \ i'_{ds} \ i'_{qr} \ i'_{dr}]^T$$

$$[v] = [V_{qs} \ V'_{ds} \ V'_{qr} \ V'_{dr}]^T$$

$$[A] = [D]^{-1}[C]$$

$$[B] = [D]^{-1}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} -r_{qs} & 0 & \omega_r L_{mqs} \sin \theta_r & \omega_r L_{mqs} \cos \theta_r \\ 0 & -r'_{ds} & -\omega_r L_{mqs} \cos \theta_r & \omega_r L_{mqs} \sin \theta_r \\ \omega_r L_{mqs} \sin \theta_r & -\omega_r L_{mqs} \cos \theta_r & -r'_r & 0 \\ \omega_r L_{mqs} \cos \theta_r & \omega_r L_{mqs} \sin \theta_r & 0 & -r'_r \end{bmatrix}$$

และ

$$[D] = \begin{bmatrix} L'_{qs} + L_{mqs} & 0 & L_{mqs} \cos \theta_r & -L_{mqs} \sin \theta_r \\ 0 & (L'_{ds} + L_{mqs}) & L_{mqs} \sin \theta_r & L_{mqs} \cos \theta_r \\ L_{mqs} \cos \theta_r & L_{mqs} \sin \theta_r & (L'_{r} + L_{mqs}) & 0 \\ -L_{mqs} \sin \theta_r & L_{mqs} \cos \theta_r & 0 & (L'_{r} + L_{mqs}) \end{bmatrix}$$

เมอพจรณการเคลอนทของโรเตอร์ โดยชกฏการเคลอนทของนวดน (Krishnan, 2001) สมการเชงกลอาจเขียนแสดงดัดงน

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P}{2J_m} T_e(t) - \frac{P}{2J_m} T_L(t) - \frac{B_m \omega_r(t)}{J_m}$$

เมอ  $T_e$  คอแรงบดทงแม่เหลกไฟฟา (Electromagnetic Torque)

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) L_{mqs} i_{qs} (-i_{ds} \sin \theta_r - i'_{dr} \cos \theta_r) + L_{mqs} i'_{ds} (i'_{qr} \cos \theta_r - i'_{dr} \sin \theta_r)$$

และ  $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$

จตุใหอญนรูปสมการสเดด

$$\begin{bmatrix} \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B_m}{J_m} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{P}{2J_m} \\ 0 \end{bmatrix} [T_e - T_L] \tag{24}$$

เมอรวมแบบจำลองปรกฤษเดดสถานะของทงทงไฟฟาและทงกลชวดวกันจะดแบบจำลองปรกฤษเดดสถานะของมอดอร์ไฟฟากระแสลบขณเดเหนยวนำแบบหน่งเฟสดงน

$$\begin{bmatrix} \frac{d[i]_{4 \times 1}}{dt} \\ \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A]_{4 \times 4} & \dots & \dots \\ \vdots & \ddots & \\ 0 & -\frac{B}{J_m} & 0 \\ \vdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{25}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 [i]_{4 \times 1} &= [i_{qs}, i'_{ds}, i'_{qr}, i'_{dr}]^T \\
 [R]_{4 \times 4} &= [A] = [D]^{-1} [C] \\
 [K]_{4 \times 4} &= [B] = [D]^{-1}
 \end{aligned}$$

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการต่อขนานมอเตอร์ n ตัว

ตามที่ได้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสโดยใช้วิธีการแปลงแกน ในการวิจัยนี้ได้นำมาพัฒนาเพื่อให้ได้แบบจำลองสำหรับการขนานมอเตอร์หลายๆ ตัวที่ใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อนเพียงชุดเดียว การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการต่อขนานมอเตอร์หลายๆ ตัวนี้ จะอาศัยหลักการถ่ายโอนแกนเหมือนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับมอเตอร์ตัวเดียว โดยจะพิจารณาระบบที่ประกอบไปด้วย มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีขดลวด 3 ชุด คือ ขดลวดหลัก ขดลวดช่วย และขดลวดที่โรเตอร์ นำมาต่อขนานกันหลายๆ ตัวรับพลังงานจากแหล่งจ่ายเพียงชุดเดียวดังแสดงใน Figure 3 จากสมการ (26) จะได้สมการที่เป็นแบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์และพัฒนาให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการขนานมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสหลายๆ ตัว สมการที่ได้จะอยู่ในรูปสมการปริภูมิสถานะ ดังสมการ (27) ซึ่งแสดงตัวอย่างการขนานมอเตอร์ 2 ตัว ในสมการจะเห็นได้ว่าเมตริกซ์ [V] มีขนาด 4 แถว 1 หลัก ที่อยู่ทางด้านขวาสุดของสมการปริภูมิสถานะในมอเตอร์ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 นั้นจะเป็นชุดเมตริกซ์ชุดเดียวกัน จากวิธีนี้สามารถนำมาพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการขนานมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายๆ ตัวหรือ n ตัวที่มีแหล่งจ่ายแรงดันแหล่งเดียวกันได้ดังแสดงในสมการ (28) โดยที่

$$[A_n] = \begin{bmatrix} i_{qsn} \\ i'_{dsn} \\ i'_{qrn} \\ i'_{drn} \\ \omega_{rn} \\ \theta_{rn} \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad [\Theta_n] = \begin{bmatrix} V_{qsn} \\ V'_{dsn} \\ V'_{qrn} \\ V'_{drn} \\ T_e - T_L \\ 0 \end{bmatrix}$$

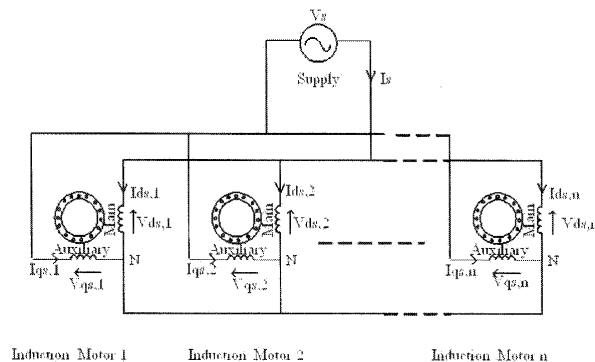


Figure 3. Schematic diagram for a group of n parallel motors

ว. สงขลานครินทร์ วิทยา.  
ปีที่ 28 ฉบับที่ 6 พ.ย. - ธ.ค. 2549

1345

การจำลองผลมอดอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว  
ศักดิ์ระวี ระวังกุล และคณะ

สมการที่ 26

$$\begin{bmatrix} \frac{d[i]_{4 \times 1}}{dt} \\ \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathfrak{R}_{11} & \mathfrak{R}_{12} & \mathfrak{R}_{13} & \mathfrak{R}_{14} & 0 & 0 \\ \mathfrak{R}_{21} & \mathfrak{R}_{22} & \mathfrak{R}_{23} & \mathfrak{R}_{24} & 0 & 0 \\ \mathfrak{R}_{31} & \mathfrak{R}_{32} & \mathfrak{R}_{33} & \mathfrak{R}_{34} & 0 & 0 \\ \mathfrak{R}_{41} & \mathfrak{R}_{42} & \mathfrak{R}_{43} & \mathfrak{R}_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{B_m}{J_m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i]_{4 \times 1} \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathfrak{N}_{11} & \mathfrak{N}_{12} & \mathfrak{N}_{13} & \mathfrak{N}_{14} & 0 & 0 \\ \mathfrak{N}_{21} & \mathfrak{N}_{22} & \mathfrak{N}_{23} & \mathfrak{N}_{24} & 0 & 0 \\ \mathfrak{N}_{31} & \mathfrak{N}_{32} & \mathfrak{N}_{33} & \mathfrak{N}_{34} & 0 & 0 \\ \mathfrak{N}_{41} & \mathfrak{N}_{42} & \mathfrak{N}_{43} & \mathfrak{N}_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{p}{2J_m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V]_{4 \times 1} \\ T_e - T_L \\ 0 \end{bmatrix}$$

สมการที่ 27

$$\begin{bmatrix} \frac{d[i_1]_{4 \times 1}}{dt} \\ \frac{d\omega_{r1}}{dt} \\ \frac{d\theta_{r1}}{dt} \\ \frac{d[i_2]_{4 \times 1}}{dt} \\ \frac{d\omega_{r2}}{dt} \\ \frac{d\theta_{r2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathfrak{R}1_{11} & \mathfrak{R}1_{12} & \mathfrak{R}1_{13} & \mathfrak{R}1_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathfrak{R}1_{21} & \mathfrak{R}1_{22} & \mathfrak{R}1_{23} & \mathfrak{R}1_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathfrak{R}1_{31} & \mathfrak{R}1_{32} & \mathfrak{R}1_{33} & \mathfrak{R}1_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathfrak{R}1_{41} & \mathfrak{R}1_{42} & \mathfrak{R}1_{43} & \mathfrak{R}1_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-B_{m1}}{J_{m1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathfrak{R}2_{11} & \mathfrak{R}2_{12} & \mathfrak{R}2_{13} & \mathfrak{R}2_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathfrak{R}2_{21} & \mathfrak{R}2_{22} & \mathfrak{R}2_{23} & \mathfrak{R}2_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathfrak{R}2_{31} & \mathfrak{R}2_{32} & \mathfrak{R}2_{33} & \mathfrak{R}2_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathfrak{R}2_{41} & \mathfrak{R}2_{42} & \mathfrak{R}2_{43} & \mathfrak{R}2_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-B_{m2}}{J_{m2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_1]_{4 \times 1} \\ \omega_{r1} \\ \theta_{r1} \\ [i_2]_{4 \times 1} \\ \omega_{r2} \\ \theta_{r2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathfrak{N}1_{11} & \mathfrak{N}1_{12} & \mathfrak{N}1_{13} & \mathfrak{N}1_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathfrak{N}1_{21} & \mathfrak{N}1_{22} & \mathfrak{N}1_{23} & \mathfrak{N}1_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathfrak{N}1_{31} & \mathfrak{N}1_{32} & \mathfrak{N}1_{33} & \mathfrak{N}1_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathfrak{N}1_{41} & \mathfrak{N}1_{42} & \mathfrak{N}1_{43} & \mathfrak{N}1_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{P_1}{2J_{m1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathfrak{N}2_{11} & \mathfrak{N}2_{12} & \mathfrak{N}2_{13} & \mathfrak{N}2_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathfrak{N}2_{21} & \mathfrak{N}2_{22} & \mathfrak{N}2_{23} & \mathfrak{N}2_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathfrak{N}2_{31} & \mathfrak{N}2_{32} & \mathfrak{N}2_{33} & \mathfrak{N}2_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathfrak{N}2_{41} & \mathfrak{N}2_{42} & \mathfrak{N}2_{43} & \mathfrak{N}2_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{P_2}{2J_{m2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V]_{4 \times 1} \\ T_e + T_{L1} \\ 0 \\ [V]_{4 \times 1} \\ T_e + T_{L2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

สมการที่ 28

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [\Lambda_1] \\ [\Lambda_2] \\ [\Lambda_3] \\ \vdots \\ [\Lambda_n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R1]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & \cdots & [0]_{4 \times 4} \\ [0]_{4 \times 4} & [R2]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & \cdots & [0]_{4 \times 4} \\ [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & [R3]_{4 \times 4} & \vdots & [0]_{4 \times 4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & \cdots & [Rn]_{4 \times 4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Lambda_1] \\ [\Lambda_2] \\ [\Lambda_3] \\ \vdots \\ [\Lambda_n] \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} [N1]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & \cdots & [0]_{4 \times 4} \\ [0]_{4 \times 4} & [N2]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & \cdots & [0]_{4 \times 4} \\ [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & [N3]_{4 \times 4} & \vdots & [0]_{4 \times 4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 4} & \cdots & [Nn]_{4 \times 4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Theta_1] \\ [\Theta_2] \\ [\Theta_3] \\ \vdots \\ [\Theta_n] \end{bmatrix}$$

## การจำลองผล

การจำลองผลดำเนินการด้วยโปรแกรมพัฒนาขึ้นด้วย MATLAB โดยเริ่มจากการรับค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์แต่ละตัว และกำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆ ของมอเตอร์ หลังจากนั้นก็เป็นกระบวนการคำนวณเชิงตัวเลข เพื่อหาค่าตัวแปรต่างๆ ของสมการ จากนั้นนำมาหาค่าแรงบิดและความเข้มสนามแม่เหล็กเชื่อมโยงตามลำดับ ในการทดสอบจำลองผลการทำงานของมอเตอร์ 3 ตัว แบ่งการจำลองผลออกเป็น 4 สภาวะด้วยกัน ได้แก่

**สภาวะ 1** กำหนดให้พารามิเตอร์และภาวะของมอเตอร์แต่ละตัวเท่ากัน โดยมอเตอร์ทุกตัวมีพารามิเตอร์เท่ากับตัวที่ 1

มอเตอร์ 1: พารามิเตอร์ชุดที่ 1, แรงบิดของโหลดตัวที่ 1

มอเตอร์ 2: พารามิเตอร์ชุดที่ 1, แรงบิดของโหลดตัวที่ 1

มอเตอร์ 3: พารามิเตอร์ชุดที่ 1, แรงบิดของโหลดตัวที่ 1

**สภาวะ 2** กำหนดให้พารามิเตอร์ของมอเตอร์เท่ากันทุกตัวแต่ภาวะแตกต่างกัน โดยมอเตอร์ทุกตัวมีพารามิเตอร์เท่ากับตัวที่ 1

มอเตอร์ 1: พารามิเตอร์ชุดที่ 1, แรงบิดของโหลดตัวที่ 1

มอเตอร์ 2: พารามิเตอร์ชุดที่ 1, แรงบิดของโหลดตัวที่ 2

มอเตอร์ 3: พารามิเตอร์ชุดที่ 1, แรงบิดของโหลดตัวที่ 3

**สภาวะ 3** กำหนดให้พารามิเตอร์แตกต่างกันและภาวะของมอเตอร์แต่ละตัวเท่ากัน

มอเตอร์ 1: พารามิเตอร์ชุดที่ 1, แรงบิดของโหลดตัวที่ 1

มอเตอร์ 2: พารามิเตอร์ชุดที่ 2, แรงบิดของโหลดตัวที่ 1

มอเตอร์ 3: พารามิเตอร์ชุดที่ 3, แรงบิดของโหลดตัวที่ 1

**สภาวะ 4** กำหนดให้พารามิเตอร์และภาวะของมอเตอร์แต่ละตัวแตกต่างกัน

มอเตอร์ 1: พารามิเตอร์ชุดที่ 1, แรงบิดของโหลดตัวที่ 1

มอเตอร์ 2: พารามิเตอร์ชุดที่ 2, แรงบิดของโหลดตัวที่ 2

มอเตอร์ 3: พารามิเตอร์ชุดที่ 3, แรงบิดของโหลดตัวที่ 3



ว. สงขลานครินทร์ วิทยา.  
ปีที่ 28 ฉบับที่ 6 พ.ย. - ธ.ค. 2549

1347

การจำลองผลมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว  
ศักดิ์ระวี ระวังกุล และคณะ

ขนาดแรงบิดของโหลดที่เป็นปั๊มหอยโข่ง 3 ตัว ซึ่งมีสมการของความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วเป็นดังนี้  $T = kw^2$

แรงบิดของโหลดตัวที่ 1:  $1.8 \times 10^{-4} \omega_r^2$  N.m

แรงบิดของโหลดตัวที่ 2:  $9.5 \times 10^{-5} \omega_r^2$  N.m

แรงบิดของโหลดตัวที่ 3:  $7.5 \times 10^{-5} \omega_r^2$  N.m

การจำลองผลจะใช้ค่าพารามิเตอร์สำหรับมอเตอร์แต่ละตัวดังแสดงใน Table 1 นี้ (Mademlis, 2005; Rahim, 2002) โดยแหล่งจ่ายพลังงานที่ให้แก่มอเตอร์จะควบคุมแรงดันให้มีขนาด 220V และความถี่ 50Hz คงที่อยู่ตลอดเวลาด้วยอินเวอร์เตอร์เพียงชุดเดียว (Kono *et al.*, 2000) ในการจำลองผลสภาวะต่างๆ 4 สภาวะนั้น ภาวะที่ใช้เป็นปั๊มหอยโข่ง 8 ตัวที่มีขนาดเท่ากันและแตกต่างกันตามสภาวะการทดลอง ผลที่ได้แสดงตัวอย่างสภาวะที่ 4 เป็นดังใน Figure 4-9 นี้

#### อภิปรายผล

จากการจำลองผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับการขนานมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดหนึ่งเฟสหลาย ๆ ตัว โดยรับพลังงานจากแหล่งจ่ายที่ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์เพียงชุดเดียว ผลที่ได้แสดงใน Figure 4-9

เป็นตัวอย่างผลการทดสอบในสภาวะที่ 4 จะเห็นได้ว่าเมื่อมอเตอร์เริ่มขับโหลดจะมีการดึงกระแสในช่วงแรกๆ ก่อน จะเข้าสู่สภาวะคงตัว สอดคล้องกับความเร็วของมอเตอร์ โดยสังเกตได้จากเวลาที่กระแสและความเร็วของมอเตอร์เข้าสู่สภาวะคงตัวมีค่าเท่ากัน ไม่ว่าจะการทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดที่แตกต่างกันทั้ง 4 สภาวะ (Correa *et al.*, 1999) ผลที่ได้ยังคงมีความสอดคล้องกัน จากการทดสอบแบบจำลองในสภาวะต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดหนึ่งเฟสต่อขนานกัน  $n$  ตัวที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม

#### สรุปและข้อเสนอแนะ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดหนึ่งเฟสต่อขนานกัน  $n$  ตัวที่ได้นำเสนอในบทความนี้เป็นแบบจำลองที่อยู่ในรูปของสมการปริภูมิสถานะที่ง่ายแก่การนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดหนึ่งเฟสทั้งแบบตัวเดียว และ  $n$  ตัว ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในสภาวะต่างๆ มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

Table 1. Motor parameters (11)-(13)

Parameter set	poles	$r_{qs}$ ( $\Omega$ )	$r'_{ds}$ ( $\Omega$ )	$r'_r$ ( $\Omega$ )	$L_{mqs}$ ( $\Omega$ )	$L_{lr}$ ( $\Omega$ )	$L_{lqs}$ ( $\Omega$ )	$L_{lds}$ ( $\Omega$ )	J (kg.m <sup>2</sup> )	$B_m$ (N.m/rad/sec)
1	4	4.3	2.6	2.01	105	1.8	1.01	1.8	0.0546	0.0002
2	4	1.3	2.6	2.01	105	2.8	2.01	2.8	0.0546	0.0002
3	4	3.2	7.2	2.00	54.97	3.2	3.61	2.09	0.0546	0.0002

Table 2. Steady-state performance of each test case

	Case 1			Case 2			Case 3			Case 4		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Supply Current (A <sub>rms</sub> )	25.44			17.48			32.42			22.07		
Motor Current (A <sub>rms</sub> )	8.48	8.48	8.48	8.48	4.85	4.15	8.48	10.09	13.85	8.48	5.91	7.68
Motor Speed (rpm)	1402	1402	1402	1402	1450	1461	1402	1408	1370	1402	1452	1455
Load Torque (N.m)	14.27	14.27	14.27	14.27	7.78	6.14	14.27	14.46	17.74	14.27	9.33	8.62
Motor Slip	0.065	0.065	0.065	0.065	0.033	0.026	0.065	0.061	0.086	0.065	0.032	0.030

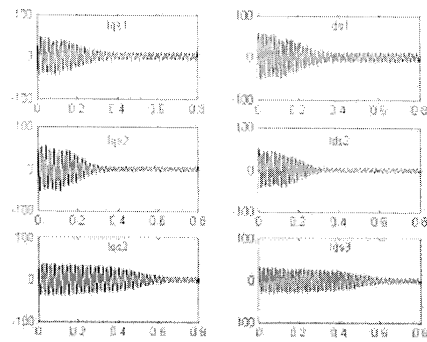


Figure 4. Stator currents (A) of case 4

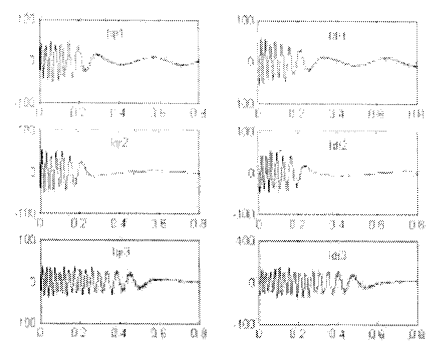


Figure 5. Rotor currents (A) of case 3

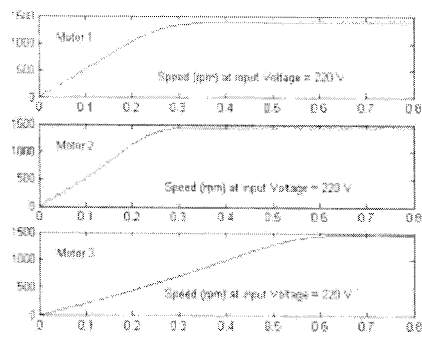


Figure 6. Motor speeds (rpm) of case 4

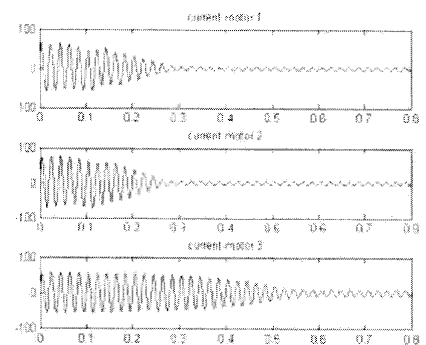


Figure 7. Rotor currents (A) of case 4

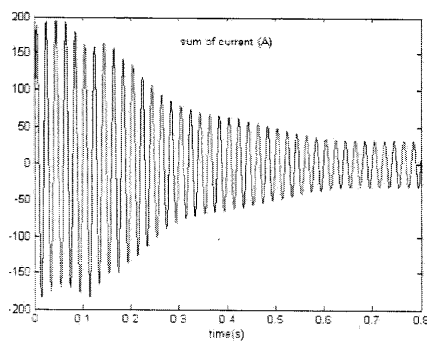


Figure 8. Currents (A) of the motor group of case 4

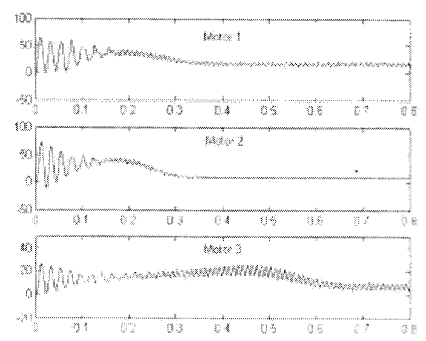


Figure 9. Motor torques (N.m) of case 4

ว. สงขลานครินทร์ วิทยา.  
ปีที่ 28 ฉบับที่ 6 พ.ย. - ธ.ค. 2549

1349

การจำลองผลมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว  
ศึกษาระดับ วิศวกรรม และคณะ

เอกสารอ้างอิง

- Chee-Mun ong. 1998. Dynamic Simulation of Electric machinery using MATLAB/SIMULINK, Prentice Hall.
- Correa, M.B.R., Jacobina, C.B., Lima, A.M.N. and da Silva, E.R.C. 1999. Single-phase induction motor Drives systems, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'99), Vol. 1: 403-409.
- Correa, M.B.R., Jacobina, C.B., Lima, A.M.N. and da Silva, E.R.C. 2004. Vector control strategies for single-phase induction motor drive systems, IEEE Trans. IA, 51(5): 1073-1080.
- Jang, D.H. Voltage. 1994. frequency, and phase-difference angle control of PWM inverters-fed two-phase induction motors, IEEE Trans. PE, 9(4): 377-383.
- Kono, Y., Fushimi, T., and Matsuse K. 2000. Speed Senseless Vector Control of Parallel Connected Induction Motors, Proc. PIEMC' 2000, 2000: 278-283.
- Krause, P.C., Wasynczuk, O. and Sudhoff, S.D. 1995. Analysis of Electrical Machinery, Piscataway, Nj; IEEE Press.
- Krishnan, R. 2001. Electric Motor Drives Modeling, Analysis and Control, Prentice Hall.
- Mademlis, C., Kioskeridis, I., and Theodoulidis, T. 2005. Optimization of single-phase induction motors-Part I: maximum energy efficiency control, IEEE Trans. EC, 20(1): 187-195.
- Matsuse, K., Kouno, Y., Kawai, H. and Oikawa, J. 2004. Characteristics of speed sensorless vector controlled dual induction motor drive connected in parallel fed by a single inverter, IEEE Trans. IA, 40(1): 153-161.
- Matsumoto, Y. Ozaki, S. and Kawamura, A. 2001. A novel vector control of single-inverter multiple-induction-motors drives for Shinkansen traction system, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'2001.), 1: 608-614.
- Rahim, N.A. 2002. Operating of Single-Phase Induction Motor as Two-Phase Motor, IEEE Trans. IA, 38(6): 1566-1571.

## Notation List

$B_m$	viscous friction coefficient (Nm/rad/sec)
$i_{qs}, i_{ds}, i_{qr}, i_{dr}$	the q- axis and the d- axis current components of stator and rotor (A)
$J_m$	moment of inertia (Kg -m <sup>2</sup> )
$N_{qs}, N_{ds}, N_{qr}, N_{dr}$	winding turns on the q-axis and the d-axis of stator and rotor
$L_{lqs}$	leakage inductance of the stator main winding (H)
$L_{lds}$	leakage inductance of the stator auxiliary winding (H)
$L_{lr}$	leakage inductance on the rotor winding (H)
$L_{mq}, L_{md}$	mutual inductances on the d- and the q-axes (H)
$L_{qqs}$	self inductance on the stator q-axis (H)
$L_{qds}$	cross inductance between the stator q- and d-axes (H)
$L_{qqr}$	cross inductance between the stator q-axis and the rotor q-axis (H)
$L_{qdr}$	cross inductance between the stator q-axis and the rotor d-axis (H)
$L_{dds}$	self inductance on the stator d-axis (H)
$L_{dsr}$	cross inductance between the stator d-axis and the rotor q-axis (H)
$L_{ddr}$	cross inductance between the stator d-axis and the rotor d-axis (H)
$p$	$\frac{d}{dt}$
P	number of poles (pole)
$P_g$	permeance of airgap
$r_{qs}, r_{ds}, r_{qr}, r_{dr}$	the q-axis and the d-axis resistance components of stator and rotor (Ω)
$T_e$	electromagnetic torque (Nm)
$T_L$	load torque (Nm)
$V_{qs}, V_{ds}, V_{qr}, V_{dr}$	the q-exes and d-exes voltage components on stator and rotor(V)
$\omega_r$	speed (rad/s)
$\theta_r$	phase difference between the and axes (rad)
superscript <i>S</i>	denotes stator-side quantities
superscript <i>r</i>	denotes rotor-side quantities
superscript '	denotes transformed quantities to the reference q- axis of the stator

## ประวัติผู้เขียน

นายศักดิ์ระวี ระวีกุล เกิดเมื่อวันที่ 17 มิถุนายน พ.ศ. 2515 ที่อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล เมื่อปี พ.ศ. 2538 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2544 ได้รับทุนพัฒนาอาจารย์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล เมื่อ พ.ศ. 2547 เป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน และในปี พ.ศ. 2548 ได้รับทุนพัฒนาอาจารย์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนอุดหนุน การทำวิจัยบางส่วนจากงบประมาณแผ่นดิน ผ่านการพิจารณาโดยคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ