

การศึกษากระแสขณะเริ่มต้นหมุนสำหรับกลุ่มของ
มอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้แบบจำลองการรวมกลุ่ม

STUDIES OF STARTING CURRENT FOR
A GROUP OF INDUCTION MOTORS
USING AGGREGATION MODELS

ไพสิฐ ภิรมย์ธรรม
PAISIT PROMTHUM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-645-2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษากระแสขณะเริ่มต้นหมุนสำหรับกลุ่มของ
มอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้แบบจำลองการรวมกลุ่ม

STUDIES OF STARTING CURRENT FOR
A GROUP OF INDUCTION MOTORS
USING AGGREGATION MODELS



ไพสิฐ ภิรมย์ธรรม

PAISIT PIROMTHUM

เลขหม.....
เลขทะเบียน 47538
วัน, เดือน, ปี 19 ส.ค. 2546

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2546

ISBN 974-324-645-2

**STUDIES OF STARTING CURRENT FOR
A GROUP OF INDUCTION MOTORS
USING AGGREGATION MODELS**

PAISIT PIROMTHUM

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2003

ISBN 974-324-645-2

COPYRIGHT 2003






SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษากระแสขณะเริ่มต้นหมุนสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้
แบบจำลองการรวมกลุ่ม
STUDIES OF STARTING CURRENT FOR A GROUP OF INDUCTION
MOTORS USING AGGREGATION MODELS

ชื่อนักศึกษา นายไพสิฐ ภิรมย์ธรรม
รหัสประจำตัว 44061023
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.พิชิต	ถ้ายอง	
ผศ.ดร.วิจิตร	กิมเรศ	
ผศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	
ผศ.ดร.ชรินทร์	บุญลักษณ์านุสรณ์	
ผศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 19 พฤษภาคม 2546 เวลา 10.30-12.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อิตชู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....23.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ. 2546.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษากระแสขณะเริ่มต้นหมุนสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้แบบจำลองการรวมกลุ่ม
นักศึกษา	นาย ไพสิฐ ภิรมย์ธรรม
รหัสประจำตัว	44061023
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.อนันต์วัฒน์ คุณากร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อใช้สำหรับการหาค่ากระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ การจำลองจะใช้แบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในวิทยานิพนธ์จะแสดงรายละเอียดของสมการต่างๆที่ใช้ในแบบจำลอง และแบบจำลองจะถูกสร้างขึ้นบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK การทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้ทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในหลายขนาดด้วยกัน ซึ่งจะทำการทดสอบในสภาวะไม่มีภาระทางกลและมีภาระทางกล โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองจะมีความผิดพลาดประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้มาจากการวัดและเงื่อนไขในการใช้งานของแบบจำลองคือมอเตอร์ทุกตัวจะต้องมีค่าความเร็วเชิงโรตัสเดียวกัน

Thesis Title	Studies of Starting Current for a Group of Induction Motors using Aggregation Models
Student	Mr. Paisit Piromthum
Student ID.	44061023
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Assist.Prof.Dr. Anantawat Kunakorn

ABSTRACT

This thesis presents computer models for determining starting current due to a group of induction motors. An aggregation model of induction motors is employed in simulations. In the thesis, equations used in the simulations are detailed. MATLAB/SIMULINK is used for implementing the computer models. Various sizes of the induction motors are tested with load and without load. Results obtained from the simulations have an error of about 10 % compared with those from measurements. The condition for the computer models proposed in the thesis is that all induction motors under investigation must have an equal synchronous speed.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงไปด้วยดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาของ ผศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ที่ท่านได้กรุณาให้ความรู้ ความคิดริเริ่ม คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ อย่างทุ่มเท พร้อมทั้งฝึกฝน ให้ผู้วิจัยมีความสามารถในการทำงานวิจัย และพัฒนางานวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพมาโดยตลอด ระยะเวลาของการศึกษาวิจัย

ขอขอบพระคุณ ท่านอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาท วิชาทั้งหมดให้แก่ผู้วิจัย ซึ่งส่งผลให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณวรชาติ แซ่ก๊ก ผู้ให้ความช่วยเหลือ และความรู้ในด้านการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์แก่ผู้วิจัย ซึ่งหากไม่ได้รับความช่วยเหลือจากคุณวรชาติ แซ่ก๊ก แล้ววิทยานิพนธ์นี้คงไม่สำเร็จลงได้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยห่วงใย เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนการศึกษา รวมทั้งญาติพี่น้องทุกๆคนที่ทำให้กำลังใจและความช่วยเหลือในด้านต่างๆอย่างจริงใจเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ต่างๆอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ไพสิฐ ภิรมย์ธรรม

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.3.3 พิจารณาองค์ประกอบของแรงดัน V_{ds}^s และ V_{qs}^s บนแกน ζs	12
2.2.4 วงจรสมมูลย์ของแบบจำลองพลศาสตร์บนแกนที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโร นัส.....	16
2.2.5 วงจรสมมูลย์ของแบบจำลองพลศาสตร์บนแกนที่อยู่กับที่.....	20
2.2.6 การแปลงแบบคล้าก.....	22
2.2.7 การแปลงแบบพาร์ค.....	24
บทที่ 3 แบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	27
3.1 บทนำ.....	27
3.2 วิธีการวิเคราะห์ห้กลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	27
3.2.1 วงจรสมมูลย์ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	27
3.2.2 สมการที่ใช้หาค่าตัวแปรต่างๆในวงจรสมมูลย์ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ย วนำ.....	28
3.2.2.1 สมการ Stator Resistance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	28
3.2.2.2 สมการ Rotor Resistance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	28
3.2.2.3 สมการ Stator Leakage Inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ย วนำ.....	29
3.2.2.4 สมการ Rotor Leakage Inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ย วนำ.....	30
3.2.2.5 สมการ Magnetizing Inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	30
3.2.2.6 สมการหาค่าตัวแปรของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดกัน 2 ตัว	31
3.2.2.7 สมการหาค่าตัวแปรของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดกัน 3 ตัว	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2.8 สมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดกัน 5 ตัว.....	34
3.2.3 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	37
3.2.4 ค่าสลิปของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	38
3.2.5 ค่าแรงบิดของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	39
3.3 แบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	39
3.3.1 แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส.....	40
3.3.2 การแปลงแรงดันสามเฟสเป็นแรงดัน $qd0$	40
3.3.3 การแปลงกระแส $qd0$ เป็นกระแสสามเฟส.....	41
3.3.4 กระแส Zero sequence.....	42
3.3.5 กระแส $qd0$ และแรงบิด.....	42
3.3.6 ส่วนประกอบที่ช่วยในการทำงานของแบบจำลอง.....	44
3.3.7 แบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	45
บทที่ 4 วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ.....	46
4.1 บทนำ.....	46
4.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	46
4.2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	46
4.2.2 มู่เล่.....	47
4.2.2.1 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมู่เล่.....	47
4.2.2.2 มู่เล่ขนาดเล็ก.....	48
4.2.2.3 มู่เล่ขนาดใหญ่.....	50
4.2.3 ANALYZING RECORDER.....	52
4.3 ค่าต่างๆที่ใช้ในแบบจำลอง.....	52
4.4 วิธีการทดสอบ.....	55
4.4.1 วิธีการทดสอบกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะไม่มีภาระทางกล	55
4.4.2 วิธีการทดสอบกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะมีภาระทางกล.....	55
4.5 ผลการทดสอบ.....	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะไม่มีภาระทางกล (ไม่มีมุ่ล่).....	56
4.5.1.1 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 HP และ 1 HP.....	56
4.5.1.2 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 HP และ 1 HP.....	57
4.5.1.3 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 HP และ 3 HP.....	58
4.5.1.4 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 HP, 3 HP และ 1 HP.....	59
4.5.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะไม่มีภาระทางกล (มีมุ่ล่).....	60
4.5.2.1 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 HP และ 1 HP.....	60
4.5.2.2 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 HP และ 1 HP.....	61
4.5.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะมีภาระทางกล (1/4 ของพิกัดแรงบิดของมอเตอร์ เหนี่ยวนำ).....	62
4.5.3.1 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 HP และ 1 HP.....	62
4.5.3.2 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 HP และ 1 HP.....	63
4.5.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะมีภาระทางกล (1/2 ของพิกัดแรงบิดของมอเตอร์ เหนี่ยวนำ).....	64
4.5.4.1 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 HP และ 1 HP.....	64
4.5.4.2 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 HP และ 1 HP.....	65
4.5.5 มอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะมีภาระทางกล โดยเปรียบเทียบกับ [2].....	66
4.5.5.1 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 HP และ 3 HP ที่สภาวะ Steady-state	66
4.5.6 มอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะมีภาระทางกล โดยเปรียบเทียบกับ [3].....	68
4.5.6.1 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 HP, 15 HP, 30 HP, 50 HP และ 100 HP	68
4.6 สรุปผลการทดสอบ.....	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก โปรแกรม MATLAB/SIMULINK.....	76
ภาคผนวก ข การหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อย.....	93
ภาคผนวก ค M-FILE ของแบบจำลองการรวมกลุ่ม.....	96
ภาคผนวก ง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	98
ประวัติผู้เขียน.....	113

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 พิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	53
4.2 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำและกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	53
4.3 ค่าสลิปของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	54
4.4 ค่าความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	54
4.5 ค่าแรงบิดของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	54
4.6 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	54

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะการวางขดลวดของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้วแม่เหล็ก.....	5
2.2 โรเตอร์ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กหมุน.....	6
2.3 หลักการเกิดกระแสเหนี่ยวนำและแรงบิดบน โรเตอร์.....	6
2.4 การเกิดแรงบิดเนื่องจากสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากโรเตอร์.....	8
2.5 แกน d ซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กหลัก และแกน q ซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กบน โรเตอร์.....	10
2.6 การย้ายแกนของระบบไฟฟ้า 3 เฟสให้อยู่บนแกน d-q ในระบบแกนอ้างอิงคงที่.....	11
2.7 การแปลงแรงดันบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง ไปอยู่บนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω_e	14
2.8 ขั้วแม่เหล็กเหนี่ยวนำได้ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω_e ทิศของเวกเตอร์ $\vec{\omega}_e$ จะมีทิศชี้ออกจากหน้ากระดาษ.....	16
2.9 การใช้กฎมือขวาเพื่อหาทิศทางของผลคูณเวกเตอร์แบบครอส.....	17
2.10 วงจรสมมูลย์พลศาสตร์บนแกนที่หมุนด้วยความเร็วเชิง โครน์ส (ก) บนแกน q^s และ ψ บนแกน d^s	18
2.11 วงจรสมมูลย์พลศาสตร์บนแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง กรณีเป็น wound rotor (ก) บนแกน q^s และ ψ บนแกน d^s	20
2.12 วงจรสมมูลย์พลศาสตร์บนแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง กรณีเป็นกรงกระรอก.....	21
2.13 วงจรสมมูลย์รวมบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง กรณีเป็นกรงกระรอก.....	21
2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน $\alpha\beta$ และแกน abc.....	23
2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ dq และ abc.....	24
3.1 วงจรสมมูลย์ต่อเฟสของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	27
3.2 แบบจำลองการหาค่าตัวแปรของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดกัน 2 ตัว.....	32
3.3 แบบจำลองการหาค่าตัวแปรของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดกัน 3 ตัว.....	33
3.4 แบบจำลองการหาค่าตัวแปรของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดกัน 5 ตัว.....	36
3.5 แบบจำลองการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	37
3.6 แบบจำลองการหาค่าสลิปของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	38
3.7 แกนอ้างอิงของกรอบอ้างอิงสแตชันนารี.....	39
3.8 แบบจำลองแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส.....	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 แบบจำลองการแปลงแรงดัน 3 เฟสเป็นแรงดัน $qd0$	41
3.10 แบบจำลองการแปลงกระแส $qd0$ เป็นกระแส 3 เฟส.....	41
3.11 แบบจำลองกระแส Zero sequence.....	42
3.12 แบบจำลองแรงบิด T_e กับกระแส qd ทางด้านสเตเตอร์และทางด้านโรเตอร์.....	43
3.13 แบบจำลองแรงบิด T_L และ ω_r	43
3.14 แบบจำลองการป้อนข้อมูล.....	44
3.15 แบบจำลองการจับเวลาในการทำงาน.....	44
3.16 แบบจำลองการจับสัญญาณ.....	44
3.17 แบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	45
4.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า.....	46
4.2 รูปทรงที่ใช้ในการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมูเล่.....	47
4.3 มูเล่ขนาดเล็กที่ใช้ในการทดสอบ.....	48
4.4 ส่วนที่ 1 ของมูเล่ขนาดเล็ก.....	48
4.5 ส่วนที่ 2 ของมูเล่ขนาดเล็ก.....	49
4.6 ส่วนที่ 3 ของมูเล่ขนาดเล็ก.....	49
4.7 ส่วนที่ 4 ของมูเล่ขนาดเล็ก.....	49
4.8 มูเล่ขนาดใหญ่ที่ใช้ในการทดสอบ.....	50
4.9 ส่วนที่ 1 ของมูเล่ขนาดใหญ่.....	50
4.10 ส่วนที่ 2 ของมูเล่ขนาดใหญ่.....	51
4.11 ส่วนที่ 3 ของมูเล่ขนาดใหญ่.....	51
4.12 ส่วนที่ 4 ของมูเล่ขนาดใหญ่.....	51
4.13 ANALYZING RECORDER ที่ใช้ในการทดสอบ.....	52
4.14 การทดสอบกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะไม่มีภาระทางกล.....	55
4.15 การทดสอบกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะมีภาระทางกล.....	55
4.16 กราฟกระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A ของการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะไม่มีภาระทางกล (ไม่มีมูเล่) กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 HP และ 1 HP.....	56
4.17 กราฟกระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส B ของการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะไม่มีภาระทางกล (ไม่มีมูเล่) กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 HP และ 1 HP.....	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.42 กราฟกระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส C ของการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะมีภาระทางกล (1/2 ของพิกัดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ) กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 HP และ 1 HP	65
4.43 กราฟกระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A ของการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะมีภาระทางกล (1/2 ของพิกัดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ) กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 HP และ 1 HP	65
4.44 กราฟกระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส B ของการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะมีภาระทางกล (1/2 ของพิกัดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ) กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 HP และ 1 HP	66
4.45 กราฟกระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส C ของการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะมีภาระทางกล (1/2 ของพิกัดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ) กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 HP และ 1 HP	66
4.46 กราฟกระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A (จากบทความ [2]).....	66
4.47 กราฟกระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A (จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์).....	67
4.48 กราฟกระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส B (จากบทความ [2]).....	67
4.49 กราฟกระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส B (จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์).....	67
4.50 กราฟกระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส C (จากบทความ [2]).....	68
4.51 กราฟกระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส C (จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์).....	68
4.52 กราฟกระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A (จากบทความ [3]).....	68
4.53 กราฟกระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A (จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์).....	69
ก1 หน้าต่างการใช้งานของโปรแกรม MATLAB/SIMULINK.....	77
ก2 หน้าต่างคำสั่ง (Command Windows).....	78
ก3 หน้าต่างบันทึกข้อมูลคำสั่ง (Command History).....	79
ก4 หน้าต่างไดเรกทอรีที่ใช้งานอยู่ (Current Directory).....	79
ก5 หน้าต่างแสดงพื้นที่การใช้งาน (Workspace).....	80
ก6 หน้าต่างการกล่าวถึงส่วนต่างๆ (Launch Pad).....	80
ก7 หน้าต่างอธิบายการทำงาน (Help).....	81
ก8 หน้าต่างตัวอย่างการใช้งาน (Demos).....	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก9 ส่วนประกอบต่างๆภายใน Simulink Library Browser.....	84
ก10 กลุ่มการทำงานแบบ Continuous.....	85
ก11 กลุ่มการทำงานแบบ Discrete.....	85
ก12 กลุ่มการทำงานแบบ Functions & Tables.....	86
ก13 กลุ่มการทำงานแบบ Math.....	87
ก14 กลุ่มการทำงานแบบ Nonlinear.....	88
ก15 กลุ่มการทำงานแบบ Signals & Systems.....	89
ก16 กลุ่มการทำงานแบบ Sinks.....	90
ก17 กลุ่มการทำงานแบบ Sources.....	91
ก18 กลุ่มการทำงานแบบ Subsystems.....	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระแสขณะเริ่มต้นหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดเหนี่ยวนำโดยทั่วไปจะมีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่พิกัด [1] จึงทำให้ได้มีการศึกษาการจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อนำไปใช้ในการตั้งค่าในส่วนจาของระบบป้องกันต่างๆในระบบไฟฟ้าเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหาย และเนื่องจากมีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นจำนวนมากทำให้ได้มีการศึกษาแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังและเมื่อในความเป็นจริงจะมีมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นจำนวนมากที่ต่อขนานร่วมกันอยู่ที่บัสหนึ่งของระบบไฟฟ้ากำลังดังนั้นจึงจะไม่ใช้การวิเคราะห์ระบบกับแบบจำลองแต่ละตัวของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่จะใช้การวิเคราะห์แบบจำลองสถานะการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำแทนซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าโดยวิธีการสำหรับวิเคราะห์สถานะการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีผู้นำเสนอหลายแบบดังเช่น [2-10] โดยแต่ละบทความจะแตกต่างกันที่สมการที่นำมาวิเคราะห์

วิทยานิพนธ์นี้ได้มีการนำเสนอการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองโดยใช้คอมพิวเตอร์และการวัดจริง เพื่อพิจารณาถึงกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอาศัยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยที่การทดสอบจะทดสอบด้วยวิธี Direct on Line Starting ในส่วนของค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้สามารถหาค่ามาได้จากการทดสอบและสมการการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยที่สมการการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการพัฒนามาจากสมการต่างๆของ [2] และแบบจำลองการรวมกลุ่มในวิทยานิพนธ์จะอ้างอิงมาจาก [11-17] ซึ่งถือได้ว่าเป็นแบบจำลองมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ต้องการที่จะนำเสนอการจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK จำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานกันที่บัสเดียวกัน โดยมีจุดมุ่งหมายในการนำเสนอดังต่อไปนี้

- 1) สามารถที่จะใช้สมการต่างๆในวิทยานิพนธ์สร้างแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- 2) สามารถเลือกขนาดและพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำไปใช้งานในด้านต่างๆได้อย่างเหมาะสม

- 3) สามารถทราบถึงขนาดของกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์
- 4) สามารถตั้งค่าระบบป้องกันสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในโรงงานอุตสาหกรรมและสถานประกอบการที่มีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวนมากได้
- 5) เพื่อศึกษาฟังก์ชันการทำงานต่างๆ ของโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- 6) เพื่อศึกษาสมการต่างๆ ในการสร้างแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- 7) เพื่อศึกษาผลกระทบของโหลดที่มีต่อกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- 8) เพื่อศึกษาสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์กลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีจำนวนมากกว่า 2 ตัวในบัสเดียวกัน

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การศึกษากระแสขณะเริ่มต้นหมุนสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้แบบจำลองการรวมกลุ่ม จะต้องทำการศึกษาวงจรสมมูลของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำและสมการที่ใช้ในการเขียนแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำขึ้นมา ซึ่งวงจรสมมูลของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะอ้างอิงมาจาก [2] และส่วนของการเขียนแบบจำลองการรวมกลุ่มนั้นต้องมีสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการเขียนแบบจำลอง โดยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการเขียนแบบจำลองจะอ้างอิงมาจาก [11-17]

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในปี พ.ศ.2543 T. Kataoka, H. Uchida, S. Nishikata, T. Kai และ T. Funabashi [2] ได้มีการนำเสนอการศึกษาแบบจำลองของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานกันภายในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการศึกษาของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในบทความจะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 ตัวขนานกันที่บัสเดียวกัน และตัวแปรต่างๆของวงจรสมมูลของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในบทความจะได้ออกมาจากการพิจารณาสถานะการทำงาน 2 สถานะนั้นคือ สถานะไร้ภาระของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และสถานะล๊อค โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เนื่องจากว่าการนำเสนอของบทความนี้มีข้อจำกัดอยู่ที่มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการศึกษาจะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 ตัวขนานกันที่บัสเดียวกันเท่านั้นทำให้ไม่สามารถที่จะศึกษามอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานกันที่บัสเดียวกันได้มากกว่า 2 ตัวขึ้นไป

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้มีการนำเสนอแบบจำลองของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานกันภายในระบบไฟฟ้ากำลังที่สามารถทำการศึกษามอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานกันที่บัสเดียวกันได้มากกว่า 2 ตัวขึ้นไปเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์กระแสไฟฟ้าขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มของ

มอเตอร์เหนี่ยวนำภายในโรงงานอุตสาหกรรมและสถานประกอบการที่มีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวนมาก ซึ่งสมการต่างๆที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการพัฒนามาจากบทความของ [2] และแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะสร้างมาจากสมการต่างๆของ [11-17] แบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในวิทยานิพนธ์นี้ถูกเขียนขึ้นบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

1.5 ขอบเขตการศึกษา

ขอบเขตการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองของแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกสร้างขึ้นบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กับผลที่ได้จากการทดสอบ เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในการทดสอบได้ทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก, 380 โวลต์, 50 เฮิร์ต โดยจะทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เช่น stator resistance, stator leakage inductance, rotor resistance, rotor leakage inductance, magnetizing inductance และ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย เป็นต้น และทดสอบหากระแสไฟฟ้าขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยจะทดสอบด้วยวิธี Direct on Line Starting การเปรียบเทียบกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีการดำเนินการเปรียบเทียบกับสถานะไม่มีภาระทางกล มีภาระทางกล และงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในต่างประเทศ [2, 3] โดยการทดสอบสถานะมีภาระทางกลจะทำการทดสอบที่ 1/2 ของพิกัดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และ 1/4 ของพิกัดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ยังได้ทำการศึกษาสมการต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์กลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อที่จะใช้ในการพัฒนาและคิดค้นสมการการวิเคราะห์หม้อมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานกันที่บัสเดียวกัน N ตัว ทำให้เป็นประโยชน์ในการตั้งค่าระบบป้องกันสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในโรงงานอุตสาหกรรมและสถานประกอบการที่มีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวนมาก และยังสามารถศึกษาสมการต่างๆ ในการสร้างแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีการดำเนินการวิจัยโดยกำหนดขั้นตอนรายละเอียดต่างๆ จัดแบ่งเป็น 5 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการศึกษา ขั้นตอนการศึกษา เนื้อหาโดยย่อในแต่ละบท ตลอดจนประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำและวิธีการในการเขียนแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งส่วนของวิธีการเขียนแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะกล่าวถึงทฤษฎีกรอบอ้างอิงที่ใช้ในการเขียนแบบจำลอง

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งจะมีส่วนของการวิเคราะห์กลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำกับสมการที่ใช้ในการหาค่าตัวแปรต่างๆของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานกันที่บัสเดียวกันจำนวน N ตัวและสมการต่างๆที่ใช้ในการเขียนแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำกับแบบจำลองในส่วนต่างๆของแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงวิธีการทดสอบกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธี Direct on Line Starting ทั้งในส่วนของสภาวะไม่มีภาระทางกลและมีภาระทางกล มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบจะมีขนาด 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก, 380 โวลต์, 50 เฮิร์ต และในส่วน of บทนี้ยังมีส่วนของผลการทดสอบซึ่งจะมีการเปรียบเทียบกันระหว่างผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์กับผลจากการทดสอบและจากงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในต่างประเทศ [2, 3]

บทที่ 5 เป็นการกล่าวถึงสรุปผลการวิจัยการศึกษากระแสนะเริ่มต้นหมุนสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้แบบจำลองการรวมกลุ่มจากวิทยานิพนธ์นี้และข้อเสนอแนะต่างๆเพื่อที่จะทำการพัฒนางานวิจัยในลำดับต่อไป

บทที่ 2

หลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

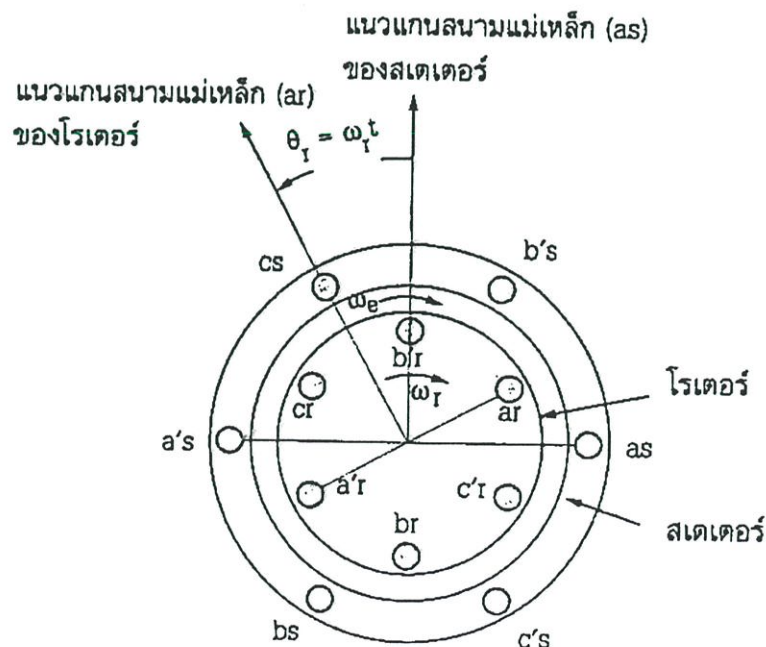
2.1 บทนำ

การศึกษาหลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำภายในวิทยานิพนธ์ จะแบ่งเป็นส่วนของ หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และส่วนของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งได้มีการ อธิบายถึงทฤษฎีกรอบอ้างอิงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

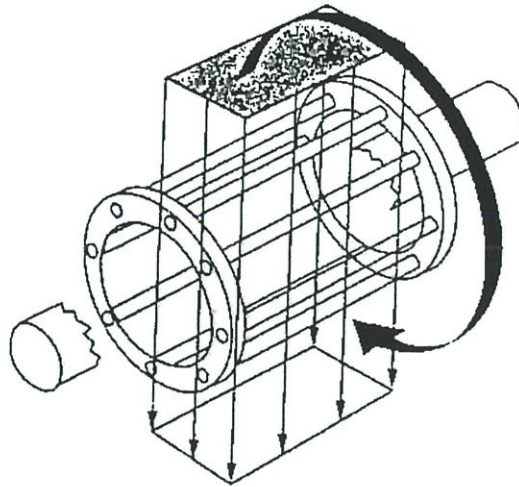
2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีการแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของสเตเตอร์ (Stator) และส่วนของ โรเตอร์ (Rotor) ซึ่งส่วนของโรเตอร์จะมีทั้งแบบที่เป็นขดลวด (Wound Rotor) และแบบที่เป็นแท่ง คิวน่า (Squirrel Cage) เมื่อต่อไฟให้ขดลวดบนสเตเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่าน โร เตอร์ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและแรงบิดที่ทำให้โรเตอร์หมุน ด้วยเหตุผลที่มีการเหนี่ยวนำ เกิดขึ้นระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ จึงได้มีการเรียกเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทนี้ว่า เครื่องจักรกล ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ

2.2.1 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

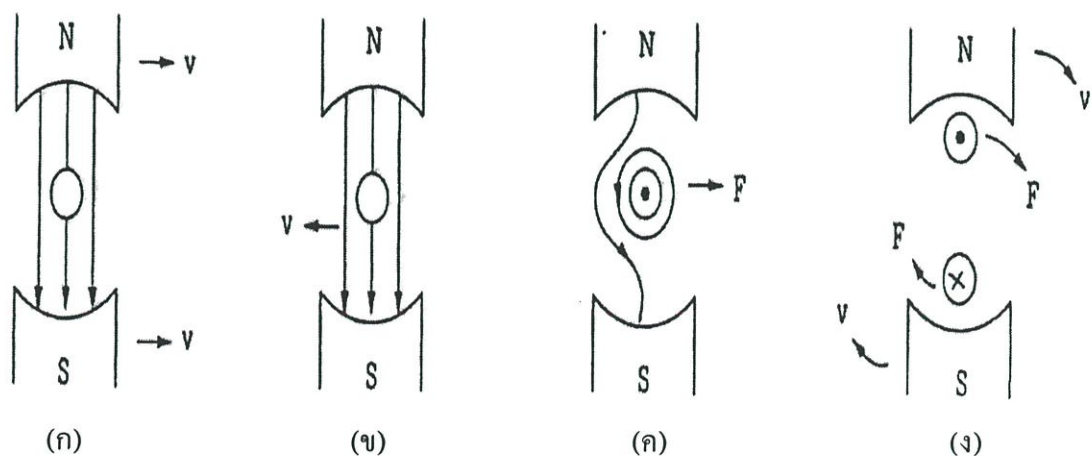


รูปที่ 2.1 ลักษณะการวางขดลวดของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้วแม่เหล็ก [1]



รูปที่ 2.2 โรเตอร์ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กหมุน [1]

มอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อมีการจ่ายไฟสามเฟสเข้าไปที่สเตเตอร์จะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นในช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้จะหมุนรอบสเตเตอร์ด้วยความเร็วซิงโครนัส และทันทีที่เกิดสนามแม่เหล็กหมุนรอบสเตเตอร์ โรเตอร์ซึ่งวางอยู่ในสเตเตอร์ก็จะตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กหมุนนี้ ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าไหลภายในวงจรของโรเตอร์ซึ่งมีลักษณะลัดวงจร ดังรูปที่ 2.2 ทิศทางของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ที่เกิดขึ้นจะเป็นไปในลักษณะที่ทำให้กระแสเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในทิศทางที่ต่อต้านกับการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้เกิดขึ้นมา หลักการกำเนิดแรงเคลื่อนและกระแสเหนี่ยวนำนี้ก็คือกฎของเลนซ์



รูปที่ 2.3 หลักการเกิดกระแสเหนี่ยวนำและแรงบิดบนโรเตอร์ [1]

จากรูปที่ 2.3 (ก) สมมุติว่ามีแม่เหล็กคู่หนึ่งเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กและให้สนามแม่เหล็กนี้วิ่งตัดผ่านแท่งตัวนำไปทางขวาด้วยความเร็ว V จากหลักการความเร็วสัมพัทธ์อาจกล่าวได้และมีผลเหมือนกับว่าสนามแม่เหล็กอยู่กับที่ และตัวนำถูกทำให้วิ่งไปทางซ้ายด้วยความเร็ว V แทน ดังแสดงในรูป 2.3 (ข) ใช้กฎของเลนซ์จะได้ว่า กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะต้องมีทิศทางที่ทำให้เกิดแรงผลักดันตัวนำไปทางขวาทั้งนี้เพื่อต่อต้านการเคลื่อนที่ไปทางซ้ายซึ่งทิศทางดังกล่าวในกรณีนี้ก็คือกระแสต้องมีทิศชี้ออกจากหน้ากระดาษ ดังรูปที่ 2.3 (ค) เมื่อพิจารณาแท่งตัวนำ 2 ตัวที่ประกบกันเป็นโรเตอร์ที่มีสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์หมุนตัดผ่าน จะทำให้ได้แรงบิดเกิดขึ้นบนโรเตอร์ตามรูป 2.3 (ง) และนี่คือหลักการกำเนิดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

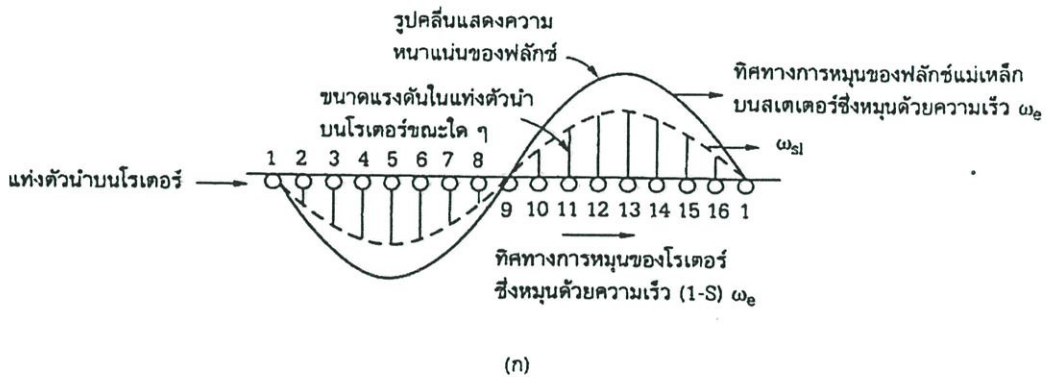
หากพิจารณาให้ถ่องแท้แล้วจะพบว่าแท้จริงแล้วในเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทหมุนทุกประเภททั้งกระแสดตรงและกระแสลับจะมีปรากฏการณ์และพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดและมอเตอร์อยู่ในเวลาเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นกระแสดตรงหรือกระแสลับ สมมุติว่าให้เครื่องต้นกำลังหมุนเครื่องกำเนิดไปทางขวา เมื่อเครื่องกำเนิดจ่ายกระแสให้โหลด ก็จะมีแรงต้านการหมุนของเครื่องต้นกำลัง ซึ่งแรงนี้ก็คือปฏิกิริยาแบบมอเตอร์เนื่องจากกระแสที่จ่ายให้โหลด (Motoring Action) เช่นเดียวกันในกรณีของมอเตอร์ ไม่ว่าจะเป็นกระแสดตรงหรือกระแสลับ เมื่อจ่ายไฟให้มอเตอร์หมุนแล้วก็จะเกิดมีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำด้านกลับ (back emf) ขึ้นมาตัวหนึ่งเสมอ และแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำด้านกลับนี้ก็คือปฏิกิริยาแบบเครื่องกำเนิดเมื่อมีสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านขดลวด (Generating Action)

อย่างไรก็ดีในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำนี้ หากขาดซึ่งความเร็วที่แตกต่างระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์กับความเร็วของตัวโรเตอร์เองแล้ว การเหนี่ยวนำย่อมไม่เกิดขึ้น แต่เมื่อใดก็ตามที่มอเตอร์มีโหลดแม้แต่เพียงแค่ว่าแรงเสียดทานต่อการหมุนของโรเตอร์เอง ก็จะทำให้โรเตอร์หมุนช้ากว่าสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ทันที การที่โหลดทำให้โรเตอร์หมุนช้ากว่าสนามแม่เหล็กนี้เรียกว่าเกิดการไถล และมักเรียกค่าไถลด้วยการเรียกทับศัพท์ว่า ค่าสลิป (Slip) โดยให้นิยามของค่าสลิปตามปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่าสลิป หมายถึง ค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ กับความเร็วของโรเตอร์

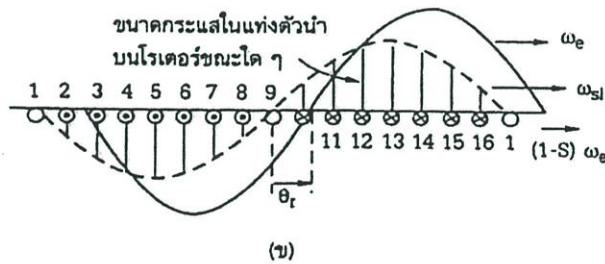
โดยปกติมักเรียกค่าสลิปต่อหนึ่งหน่วยว่า สลิป เฉยๆ แต่เป็นที่เข้าใจว่าหมายถึง สลิปต่อหนึ่งหน่วย เช่น สลิป = 0 หมายความว่าไม่มีสลิป คือความเร็วโรเตอร์เท่ากับความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ ในขณะที่ สลิป = 1 หมายความว่า มอเตอร์หยุดนิ่งไม่มีการหมุน

การที่โรเตอร์ถูกสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์หมุนตัดผ่านด้วยความเร็วเชิงมุมของสลิปนี้ทำให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำบนโรเตอร์มีความเร็วเชิงมุมเท่ากับความเร็วเชิงมุมของสลิป เช่นกัน ค่าความเร็วเชิงมุมของสลิปนี้จะขึ้นอยู่กับโหลด เพราะเมื่อโหลดมากขึ้นก็จะมีผลทำให้โรเตอร์หมุนช้าลงและส่งผลกระทบต่อเนื่องทำให้ค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์กับความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์มีค่ามากขึ้น กล่าวคือ โรเตอร์จะถูกสนาม

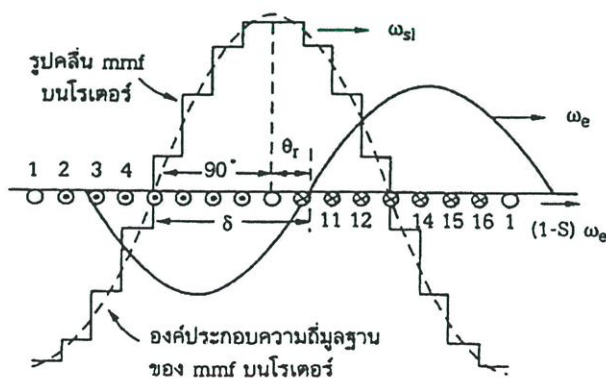
แม่เหล็กถัฟ้หมุนตัดด้วยความเร็วมากขึ้น ตามกฎของฟาราเดย์ เมื่อการหมุนตัดมีความเร็วมากขึ้น แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำก็ยิ่งมากขึ้นตามสมการ $\mathcal{E} = -N \frac{d\phi_B}{dt}$ ผลก็คือกระแสในตัวโรเตอร์มากขึ้น และด้วยหลักการเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อกระแสในด้านทุติยภูมิมากขึ้นก็ส่งผลให้กระแสในสเตเตอร์ซึ่งเป็นกระแสปฐมภูมิมีค่ามากขึ้น จึงกล่าวได้ว่าภาระทางกลจะถูกส่งผ่านเข้ามาสู่ภาระทางไฟฟ้าในรูปของค่าสลลิปหรือค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์กับความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์นั่นเอง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.4 การเกิดแรงบิดเนื่องจากสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากโรเตอร์ [1]

จากรูปที่ 2.4 เป็นการแสดงการเกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ ซึ่งแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์และโรเตอร์คือ แรงที่ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นบนตัวโรเตอร์ของมอเตอร์ รูปที่ 2.4 (ก) แสดงการเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ ซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ตัดผ่านโรเตอร์ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ ทำให้โรเตอร์รู้สึกว่ามีสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านด้วยความเร็วเชิงมุมของสลิป ผลลัพธ์นี้เองที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ความถี่ความเร็วจึงมุมของสลิป โดยเส้นตรงแนวตั้งแสดงขนาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนแท่งตัวนำแต่ละแท่งที่ฝังอยู่บนตัวโรเตอร์ รูปที่ 2.4 (ข) แสดงกระแสเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ซึ่งจะล้าหลังแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำอยู่ด้วยมุม θ_r โดยกระแสเหนี่ยวนำนี้จะมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ เพราะเป็นผลตอบสนองของอิมพีแดนซ์ (Impedance) บนโรเตอร์ต่อแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น รูปที่ 2.4 (ค) แสดงแรงเคลื่อนแม่เหล็กเหนี่ยวนำซึ่งเกิดขึ้นบนโรเตอร์ แรงเคลื่อนแม่เหล็กนี้เกิดจากกระแส i_r ที่ไหลผ่านแท่งตัวนำแต่ละแท่งในทิศทางดังรูปทำให้เกิดการเสริมกันของสนามแม่เหล็กของแต่ละคู่ขดลวดจากวงในถึงวงนอก เกิดเป็นสนามแม่เหล็กที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดและมีความถี่มูลฐานดังเส้นประ จากรูปจะเห็นว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กของโรเตอร์นี้ล้าหลังแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์อยู่ถึง $90 + \theta_r$ ซึ่งนิยามให้ค่ามุมนี้คือมุม δ และมีความเร็วเชิงมุมเท่ากับความเร็วเชิงมุมของสลิปเทียบกับโรเตอร์ แต่เนื่องจากว่าตัวโรเตอร์เองก็หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์อยู่แล้ว ดังนั้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กบนโรเตอร์จึงหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์รวมกับความเร็วเชิงมุมของสลิปเท่ากับความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์เทียบกับจุดหยุดนิ่งบนสเตเตอร์ ซึ่งความเร็วเชิงมุมนี้ก็มีความเร็วเชิงมุมเดียวกับสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์ ดังนั้นแรงบิดจึงเกิดจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กทั้ง 2 ตัวนี้รวมกันทางเวกเตอร์ และหาได้จากสมการที่ 2.1

$$T_e = \pi \left(\frac{P}{2} \right) l_r B_p F_p \sin \delta \quad (2.1)$$

โดยที่ l = ความยาวตามแนวแกนของตัวนำที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก

r = รัศมีของโรเตอร์

B_p = ค่าสูงสุดของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศ (Air Gap Flux Density)

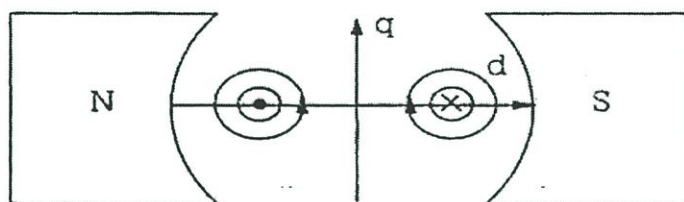
F_p = ค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ (Rotor mmf)

สมการ (2.1) นี้สามารถเขียนได้อีกรูปหนึ่งคือ

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) |\bar{\psi}_m| |\bar{i}_r| \sin \delta \quad (2.2)$$

โดยที่ $|\bar{\psi}_m|$ คือค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กหลักต่อขั้วแม่เหล็ก
 $|\bar{i}_r|$ คือกระแสสูงสุดบนโรเตอร์

2.2.2 ทฤษฎีกรอบอ้างอิง



รูปที่ 2.5 แกน d ซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กหลักและแกน q ซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กบน โรเตอร์ [11]

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสสลับที่ควบคุมให้ V/f คงที่กับกราฟความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแล้ว จะพบว่า กราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวของมอเตอร์ทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะเหมือนกัน แต่การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงจะง่ายกว่ามากในขณะที่ต้องการควบคุมมอเตอร์กระแสสลับค่อนข้างสลับซับซ้อน ดังนั้น เพื่อให้การควบคุมมอเตอร์กระแสสลับเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงเกิดแนวความคิดที่จะมองมอเตอร์กระแสสลับให้เป็นมอเตอร์กระแสตรง ทั้งนี้เพื่อง่ายต่อการควบคุมวิธีดังกล่าวสามารถทำได้โดยการโอนย้ายพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับให้มาอยู่บนแกน d - q ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.5 โดยที่แกน d - q นี้ยังสามารถที่จะพิจารณาให้เป็นแกนที่อยู่กับที่หรือเป็นแกนที่หมุนได้ด้วยความเร็วเชิงมุม ω_e ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการที่จะพิจารณาสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับให้อยู่ในรูปสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่หยุดนิ่งอยู่กับที่

ทฤษฎีกรอบอ้างอิงได้ถูกนำมาใช้สำหรับวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าสามารถแบ่งกรอบอ้างอิงได้ดังต่อไปนี้

2.2.2.1 กรอบอ้างอิงอาบิทารี

กรอบอ้างอิงอาบิทารีเป็นตัวแปรในวงจรสเตชันนารีถูกเทียบเคียงไปยังกรอบอ้างอิงอาบิทารีซึ่งมีตัวแปร $[f_{qd0s}]$ หรือ f_{qs}, f_{ds}, f_{0s} และตัวแปรการแปลง K_s ความเร็วที่ใช้ในกรอบอ้างอิง ω ไม่กำหนด

2.2.2.2 กรอบอ้างอิงสเตชันนารี

กรอบอ้างอิงสเตชันนารีเป็นตัวแทนในวงจรสเตชันนารีถูกเทียบเคียงไปยังกรอบอ้างอิงสเตชันนารีซึ่งมีตัวแปร $[f_{qd0s}^s]$ หรือ $f_{qs}^s, f_{ds}^s, f_{0s}^s$ และตัวแปรการแปลง K_s^s ความเร็วที่ใช้ในกรอบอ้างอิง $\omega = 0$

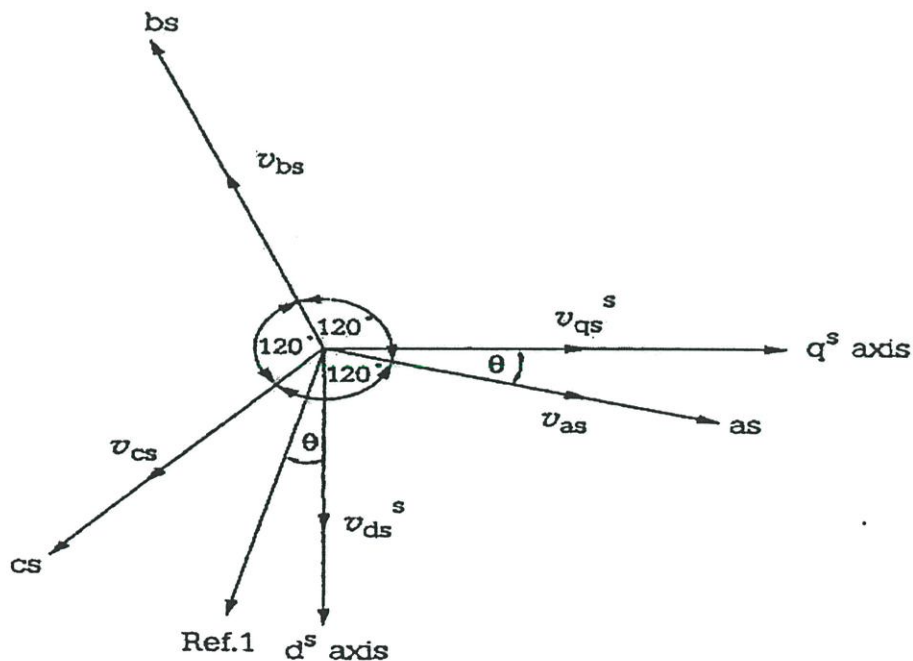
2.2.2.3 กรอบอ้างอิงโรเตอร์

กรอบอ้างอิงโรเตอร์เป็นตัวแทนในวงจรสเตชันนารีถูกเทียบเคียงไปยังกรอบอ้างอิงที่ถูกกำหนดในโรเตอร์ซึ่งมีตัวแปร $[f_{qd0s}^r]$ หรือ $f_{qs}^r, f_{ds}^r, f_{0s}^r$ และตัวแปรการแปลง K_s^r ความเร็วที่ใช้ในกรอบอ้างอิง $\omega = \omega_r$

2.2.2.4 กรอบอ้างอิงซิงโครนัส

กรอบอ้างอิงซิงโครนัสเป็นตัวแทนในวงจรสเตชันนารีถูกเทียบเคียงไปยังกรอบอ้างอิงซิงโครนัสซึ่งมีตัวแปร $[f_{qd0s}^e]$ หรือ $f_{qs}^e, f_{ds}^e, f_{0s}^e$ และตัวแปรการแปลง K_s^e ความเร็วที่ใช้ในกรอบอ้างอิง $\omega = \omega_e$

2.2.3 การย้ายแกน



รูปที่ 2.6 การย้ายแกนของระบบไฟฟ้า 3 เฟสให้อยู่บนแกน d-q ในระบบแกนอ้างอิงคงที่ [11]

จากรูปที่ 2.6 เป็นเฟสเซอร์โคออร์เดเนตของแรงดันที่จ่ายให้สเตเตอร์ as, bs และ cs กับแกน d^s และ q^s ซึ่งจะทำให้การย้ายแกนของแรงดัน 3 เฟสเข้าหา สำหรับสัญลักษณ์ของเฟส a, b, c และ

แกน d, q นั้นใช้สัญลักษณ์ s ตัวล่างเพื่อบอกว่าเฟสเซอร์และแกนที่อ้างอิงอยู่บนสเตเตอร์ ส่วน s ตัวบนแทนแกนอ้างอิงที่อยู่นิ่ง (Stationary Axis) ในส่วนนี้จะพิจารณาให้เห็นเฉพาะการย้ายแกนของแรงดัน ซึ่งการพิจารณาย้ายแกนในส่วนของกระแสและฟลักซ์แม่เหล็กสามารถทำได้ด้วยวิธีเดียวกัน มุม θ เป็นมุมระหว่างเฟส a และแกน q ซึ่งจะมีค่าเป็นเท่าใดก็ได้ จากรูปจะเริ่มด้วยการพิจารณาแรงดันของแต่ละเฟสให้อยู่ในรูปของแกน d^s และ q^s ตามลำดับดังต่อไปนี้

2.2.3.1 พิจารณาองค์ประกอบของแรงดัน V_{ds}^s และ V_{qs}^s บนแกน as

- 1) องค์ประกอบของ V_{qs}^s บนแกน as คือ $V_{qs}^s \cos \theta$
- 2) องค์ประกอบของ V_{ds}^s บนแกน as คือ $V_{ds}^s \sin \theta$ ทั้งนี้อ้างอิงมุม θ กับแกน Ref. 1 ซึ่งตั้งฉากกับ as ทำให้แกน Ref. 1 ทำมุม θ กับแกน d^s ด้วย

2.2.3.2 พิจารณาองค์ประกอบของแรงดัน V_{ds}^s และ V_{qs}^s บนแกน bs

- 1) องค์ประกอบของ V_{qs}^s บนแกน bs คือ $V_{qs}^s \cos (120 - \theta)$ แต่เนื่องจาก $\cos (-\varphi) = \cos \varphi$ ดังนั้นอาจเขียนเป็น $V_{qs}^s \cos (\theta - 120^\circ)$
- 2) องค์ประกอบของ V_{ds}^s บนแกน bs คือ $V_{ds}^s \cos (90 + (120 - \theta))$ โดยมุม 90° คือมุมระหว่าง d^s กับ q^s ส่วน $(120 - \theta)$ คือมุมระหว่าง q^s กับ bs, ใช้กฎการกระจายของฟังก์ชันตรีโกณมิติจะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น $V_{ds}^s [\cos 90 \cos (120 - \theta) - \sin 90 \sin (120 - \theta)]$ ซึ่งก็คือ $-V_{ds}^s \sin (120 - \theta)$ แต่เนื่องจาก $-\sin \varphi = \sin (-\varphi)$ ดังนั้นจะได้ $-V_{ds}^s \sin (120 - \theta) = V_{ds}^s \sin (\theta - 120)$

2.2.3.3 พิจารณาองค์ประกอบของแรงดัน V_{ds}^s และ V_{qs}^s บนแกน cs

- 1) องค์ประกอบของ V_{qs}^s บนแกน cs คือ $V_{qs}^s \cos (\theta + 120)$
- 2) องค์ประกอบของ V_{ds}^s บนแกน cs มุมระหว่างแกน d^s และ cs คือ $360 - (120 + 120 + 90 - \theta) = 30 + \theta$ ดังนั้นองค์ประกอบของ V_{ds}^s บน cs คือ $V_{ds}^s \cos (30 + \theta)$ แต่เนื่องจาก $\cos (30 + \theta)$ มีค่าเท่ากับ $\sin (120 + \theta)$ จึงเขียนใหม่ได้เป็น $V_{ds}^s \sin (\theta + 120)$

เมื่อพิจารณาตั้งแต่ 2.2.3.1-2.2.3.3 นำมาเขียนสมการของแรงดัน V_{as}^s , V_{bs}^s และ V_{cs}^s ให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_{as}^s \\ V_{bs}^s \\ V_{cs}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos (\theta - 120) & \sin (\theta - 120) & 1 \\ \cos (\theta + 120) & \sin (\theta + 120) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ V_{0s}^s \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

โดย V_{0s}^s คือ องค์ประกอบของแรงดันลำดับศูนย์ (zero-sequence component) เทคนิคการย้ายแกนและการนำเอาแรงดันลำดับศูนย์เข้ามาองค์ประกอบในสมการนี้ได้ถูกคิดค้นเป็นครั้งแรก

โดย Andre' Blondel วิศวกรชาวฝรั่งเศส โดยเรียกเทคนิคการย้ายแกนนี้ว่า Blondel two-reaction method และได้รับการพัฒนาจนได้รูปแบบที่นิยมใช้ในปัจจุบันโดยทีมวิศวกรชาวอเมริกัน คือ R.E Doherty, C.A. Nickle, R.H. Park และทีมงาม ซึ่งเทคนิคนี้เป็นที่รู้จักกันในนามการย้ายแกนแบบ dq0 (dq0 transformation)

V_{0s}^s หรือองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์นี้ในสถานะที่เฟสทั้งสามเกิดสมดุลแรงดันลำดับศูนย์จะไม่ปรากฏแต่ที่ต้องเขียนไว้เนื่องจากทางด้านซ้ายมือของสมการมีสมาชิกอยู่ 3 ตัว ดังนั้นในพจน์ของ DC จึงต้องมีสมาชิกอยู่ 3 ตัวด้วย แต่ส่วนที่เป็นแรงดันลำดับศูนย์นี้เมื่อไปปรากฏเป็นส่วนหนึ่งในสมการของ V_{as} , V_{bs} และ V_{cs} เฟสเซอร์หนึ่งหน่วยของแรงดันลำดับศูนย์ที่แฝงอยู่ในเฟสทั้งสามนี้ก็จะเกิดสมดุลและหักล้างกันไปเอง จากสมการ (2.3) ทำอินเวอร์สเมทริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ V_{0s}^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120) & \cos(\theta + 120) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120) & \sin(\theta + 120) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

เพื่อให้การพิจารณาเป็นไปได้ง่ายขึ้น จะกำหนดให้ $\theta = 0^\circ$ ซึ่งจะทำให้แกน q^s ทับกับแกน as พอดี และเนื่องจากการพิจารณากระทำบนสมมุติฐานที่ว่าแรงดันทั้ง 3 เฟสสมดุล ดังนั้นผลของแรงดันลำดับศูนย์จะหักล้างกันไปเอง จากสมการ (2.3) จึงสามารถแยกเขียนสมการให้ดูง่ายขึ้นได้ ดังนี้

$$V_{as} = V_{qs}^s \quad (2.5)$$

$$V_{bs} = -\frac{1}{2}V_{qs}^s - \frac{\sqrt{3}}{2}V_{ds}^s \quad (2.6)$$

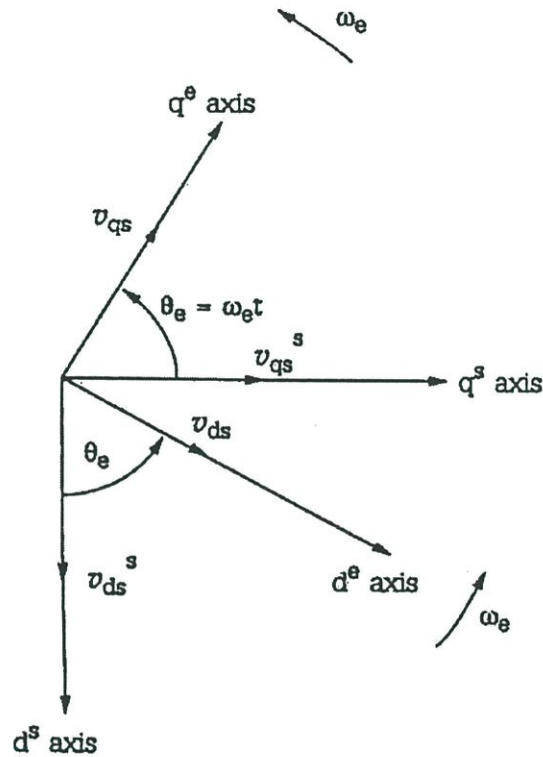
$$V_{cs} = -\frac{1}{2}V_{qs}^s + \frac{\sqrt{3}}{2}V_{ds}^s \quad (2.7)$$

และจากสมการ (2.4) จะได้

$$V_{qs}^s = \frac{2}{3}V_{as} - \frac{1}{3}V_{bs} - \frac{1}{3}V_{cs} = V_{as} \quad (\text{ทับกันพอดี}) \quad (2.8)$$

$$V_{ds}^s = -\frac{1}{\sqrt{3}}V_{bs} + \frac{1}{\sqrt{3}}V_{cs} \quad (2.9)$$

แรงดันบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่งนี้สามารถแปลงไปอยู่บนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω_e ได้ โดยใช้รูปที่ 2.7 ช่วย



รูปที่ 2.7 การแปลงแรงดันบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่งไปอยู่บนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω_e [11]

เพื่อให้ง่ายต่อการเขียน จึงทำการเขียน V_{ds} และ V_{qs} ซึ่งอยู่บนแกน d^s และ q^s โคนละเวกเตอร์ การเขียนตัวห้อย e ไว้ข้างบน จากรูปที่ 2.7 จะได้ว่า

$$V_{qs}^e = V_{qs}^s \cos \omega_e t - V_{ds}^s \sin \omega_e t \quad (2.10)$$

$$V_{ds}^e = V_{qs}^s \sin \omega_e t + V_{ds}^s \cos \omega_e t \quad (2.11)$$

และสามารถแปลงแกนเคลื่อนที่ใหม่มาอยู่บนแกนหยุดนิ่งได้ดังนี้

$$V_{qs}^s = V_{qs}^e \cos \omega_e t + V_{ds}^e \sin \omega_e t \quad (2.12)$$

$$V_{ds}^s = -V_{qs}^e \sin \omega_e t + V_{ds}^e \cos \omega_e t \quad (2.13)$$

เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนมากขึ้น ให้พิจารณาตัวอย่างดังต่อไปนี้

$$V_{as} = V_{sm} \cos \omega_e t \quad (2.14)$$

$$V_{bs} = V_{sm} \cos (\omega_e t - 120^\circ) \quad (2.15)$$

$$V_{cs} = V_{sm} \cos (\omega_e t + 120^\circ) \quad (2.16)$$

แทนสมการ (2.14) - (2.16) ลงในสมการ (2.8) และ (2.9) เพื่อแปลงแรงดันทั้ง 3 เฟสให้ไปอยู่บนแกน q^s และ d^s จะได้

$$V_{qs}^s = V_{sm} \cos \omega_e t \quad (2.17)$$

$$V_{ds}^s = -V_{sm} \sin \omega_e t \quad (2.18)$$

จากนั้นก็แปลงแรงดันบนแกนหยุดนิ่งให้ไปอยู่บนแกนที่เคลื่อนที่ โดยการแทนสมการ (2.17) และ (2.18) ลงในสมการ (2.10) และ (2.11) จะได้

$$V_{qs} = V_{sm} = \widehat{V}_m \quad (2.19)$$

$$V_{ds} = 0 \quad (2.20)$$

เมื่อ \widehat{V}_m เป็นแรงดันเทียบเท่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพราะไม่มีส่วนของคลื่นรูปไซน์เข้ามาเกี่ยวข้อง

จากความสัมพันธ์ตามสมการ (2.19) และ (2.20) จะเห็นถึงความอัศจรรย์ที่เกิดขึ้น แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์และมีความเร็วเชิงมุม ω_e เมื่อสั่งเกตบนแกนหยุดนิ่ง กลับไปปรากฏเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงบนแกนที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส ω_e และสิ่งที่สังเกตได้อีกอย่างหนึ่งก็คือแรงดันที่ไปปรากฏนั้นจะเป็นแรงดันอยู่บนแกน q ซึ่งแกน q นี้ ถ้าเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือ แกนของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากโรเตอร์ และขดลวดซึ่งอยู่บนโรเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงคือ อาร์เมเจอร์ ในขณะที่แรงดันบนแกน q ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเกิดจากการจ่ายไฟเข้าทางสเตเตอร์ ซึ่งเป็นที่วางขดลวดอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสสลับเช่นกัน ดังนั้น ถ้ามองในมุมของแกน $d - q$ แล้ว อาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรงซึ่งอยู่บนโรเตอร์ก็คืออาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสสลับซึ่งอยู่บนสเตเตอร์นั่นเอง และจากสมการ (2.20) $V_{ds} = 0$ ก็เพราะว่ายังไม่พิจารณาถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าบนโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับนั่นเอง

2.2.4 วงจรสมมูลย์ของแบบจำลองพลศาสตร์บนแกนที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโรตัส

ในระบบแกนหมุนหนึ่ง สามารถเขียนสมการของแรงดันบนสเตเตอร์ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังนี้

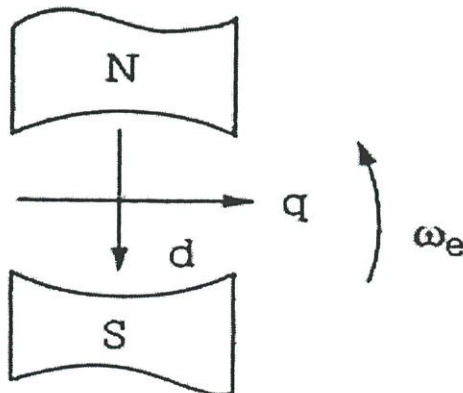
$$\vec{v}_s^s = R_s \vec{i}_s^s + \frac{d\vec{\psi}_s^s}{dt} \quad (2.21)$$

เมื่อ $\vec{\psi}_s^s = L \vec{i}_s^s$

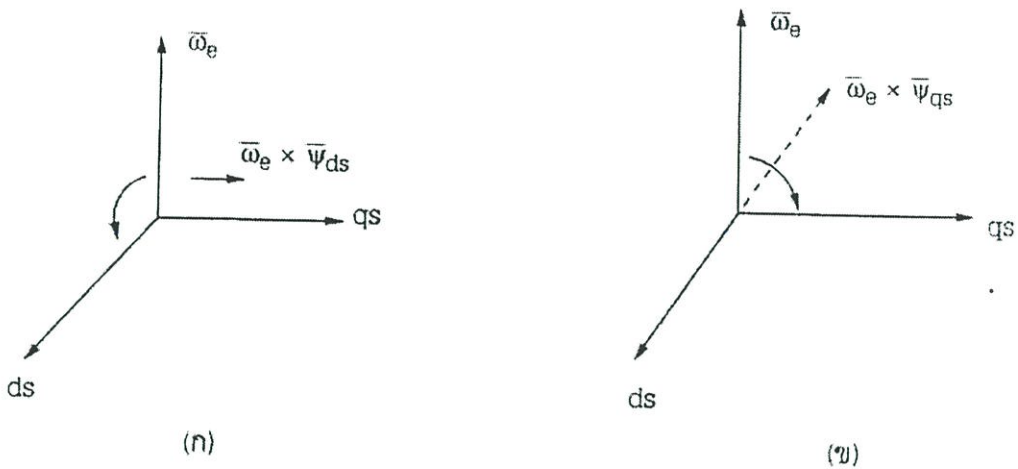
หลังจากนั้นก็หมุนระบบแกนด้วยความเร็วเชิงมุม ω_e ซึ่งจะพาสนามแม่เหล็ก $\vec{\psi}_s^s$ ให้หมุนไปด้วยความเร็ว ω_e ด้วย สมการแรงดันบนสเตเตอร์จึงเปลี่ยนเป็นสมการ

$$\vec{v}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d\vec{\psi}_s}{dt} + \vec{\omega}_e \times \vec{\psi}_s \quad (2.22)$$

สมการ (2.22) จะกลายเป็นสมการแรงดันตามกฎ KVL ของสเตเตอร์บนแกนหมุน $\vec{\omega}_e$ ซึ่งจะเห็นว่าไม่มีตัวอักษรห้อย s อยู่ข้างบนอีกต่อไป พจน์ $\vec{\omega}_e \times \vec{\psi}_s$ ก็คือแรงเคลื่อนที่เกิดจากการที่สนามแม่เหล็ก $\vec{\psi}_s$ หมุนตัดผ่านขดลวดด้วยความเร็ว ω_e จึงเกิดเป็นแรงเคลื่อนขึ้นตามสมการ $\mathcal{E} = \int \vec{v} \times \vec{B} \cdot d\vec{l}$ ซึ่งแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำตัวนี้จะเปรียบเสมือนกับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำด้านกลับ (back emf) ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เรียกพจน์ $\vec{\omega}_e \times \vec{\psi}_s$ นี้ว่าแรงดันที่เกิดจากความเร็ว (speed voltage)



รูปที่ 2.8 ขั้วแม่เหล็กเหนือ-ใต้ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω_e ทิศของเวกเตอร์ $\vec{\omega}_e$ จะมีทิศชี้ออกจากหน้ากระดาษ [11]



รูปที่ 2.9 การใช้กฎมือขวาเพื่อหาทิศทางของผลคูณเวกเตอร์แบบครอส [11]

จากรูปที่ 2.8 สมมุติทิศทางของ ω_e หมุนทวนเข็มนาฬิกา ดังนั้นเวกเตอร์ $\bar{\omega}_e$ จึงมีทิศชี้
 ออกจากกระดาษตามกฎมือขวา ส่วน $\bar{\psi}_s$ เองก็สามารถแยกได้เป็น 2 แกน คือ $\bar{\psi}_{qs}$ และ $\bar{\psi}_{ds}$ ดังนั้น
 จึงสามารถนำทิศทางของเวกเตอร์ทั้งสามมาเขียนรูปแสดงความสัมพันธ์ได้ใหม่ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งจะ
 เห็นว่าผลของ cross product $\bar{\omega}_e \times \bar{\psi}_{ds}$ จะอยู่บนแกน + qs ในขณะที่ cross product $\bar{\omega}_e \times \bar{\psi}_{qs}$ จะ
 อยู่บนแกน - ds ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (2.22) ให้อยู่ในรูปของสมการสเกลาร์ได้ใหม่ดังนี้

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_e \psi_{ds} \quad (2.23)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_e \psi_{qs} \quad (2.24)$$

ถ้าโรเตอร์ไม่หมุน สมการของแรงดันบนโรเตอร์ก็จะเป็นเช่นเดียวกันกับสมการ (2.23)
 และ สมการ (2.24) กล่าวคือ

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \omega_e \psi_{dr} \quad (2.25)$$

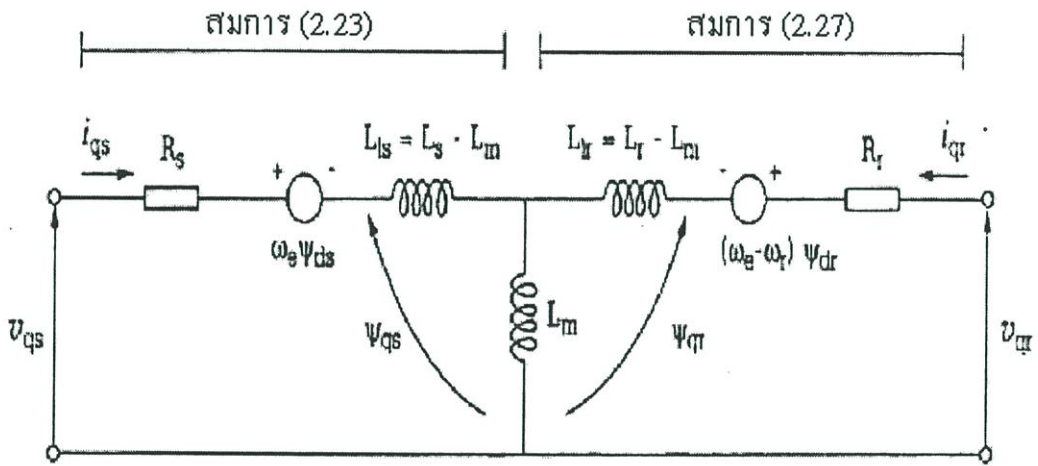
$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \omega_e \psi_{qr} \quad (2.26)$$

แต่เนื่องจากโรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว ω , ดังนั้นสมการบนโรเตอร์จะเปลี่ยนไปเป็น

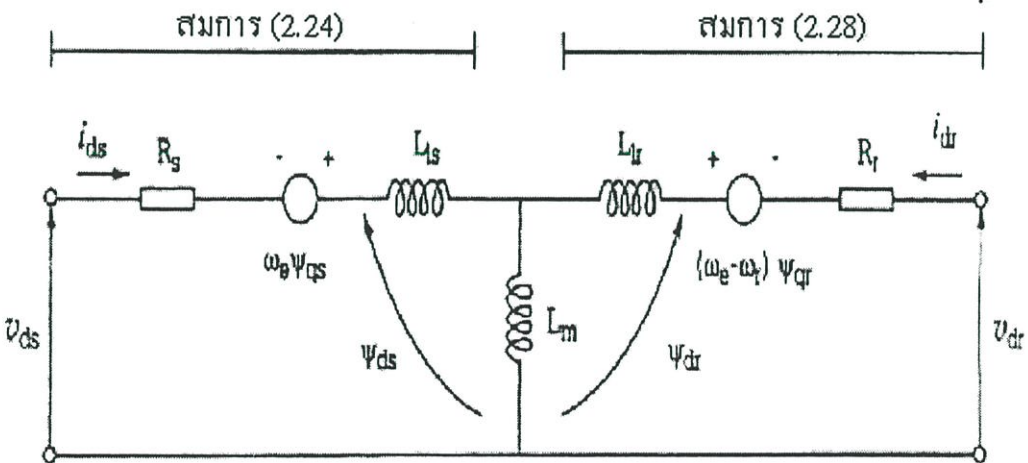
$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr} \tag{2.27}$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr} \tag{2.28}$$

จากสมการ (2.23), (2.24), (2.27) และ (2.28) นำมาเขียนวงจรสมมูลย์ได้ดังรูปที่ 2.10



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลย์ฟลศาสตร์บนแกนที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส (ก) บนแกน q' และ (ข) บนแกน d' [11]

จากรูปที่ 2.10 สามารถแสดงค่าฟลักซ์แม่เหล็กเชื่อมโยง (flux linkage) ในพจน์ของกระแสได้ดังนี้

$$q_s = L_{ls}i_{qs} + L_m(i_{qs} + i_{qr}) \quad (2.29)$$

$$q_r = L_{lr}i_{qr} + L_m(i_{qs} + i_{qr}) \quad (2.30)$$

$$d_s = L_{ls}i_{ds} + L_m(i_{ds} + i_{dr}) \quad (2.31)$$

$$d_r = L_{lr}i_{dr} + L_m(i_{ds} + i_{dr}) \quad (2.32)$$

แทนค่าสมการ (2.29) – (2.32) ลงในสมการ (2.23), (2.24), (2.27) และ (2.28) จะได้

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{qr} \\ V_{ds} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + SL_s & \omega_e L_s & SL_m & \omega_e L_m \\ -\omega_e L_s & R_s + SL_s & -\omega_e L_m & SL_m \\ SL_m & (\omega_e - \omega_r)L_m & R_r + SL_r & (\omega_e - \omega_r)L_r \\ -(\omega_e - \omega_r)L_m & SL_m & -(\omega_e - \omega_r)L_r & R_r + SL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

เมื่อ S คือตัวกระทำลาปลาซซึ่งใช้แทนตัวกระทำ d/dt และสามารถสรุปสมการได้ดังนี้

1. สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำทั่วไปที่วงจรด้านโรเตอร์ลัดวงจร เช่น โรเตอร์แบบกรงกระรอก แรงดัน V_{qr} และ V_{dr} ถือว่าเป็น 0 ได้ ดังนั้นถ้า ω_r คงที่ ก็จะสามารถหาค่าของตัวแปรกระแสได้จากสมการ (2.33) แต่สำหรับ wound rotor การวิเคราะห์จะต้องคง V_{qr} และ V_{dr} ไว้

2. ในกรณีมอเตอร์ที่จ่ายด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ i_{qs} , i_{ds} และ ω_e ถือเป็นตัวแปรอิสระและสามารถหา V_{qs} , V_{ds} , i_{qr} และ i_{dr} ได้จากสมการ

3. ถ้าเป็นสภาวะคงที่ d/dt = 0 พจน์ที่มีตัวกระทำ S จะกลายเป็น 0 ทั้งหมด

อย่างไรก็ตามค่าความเร็วเชิงมุม ω_r โดยปกติแล้วจะไม่คงที่แต่จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงบิดของโหลดตามสมการ

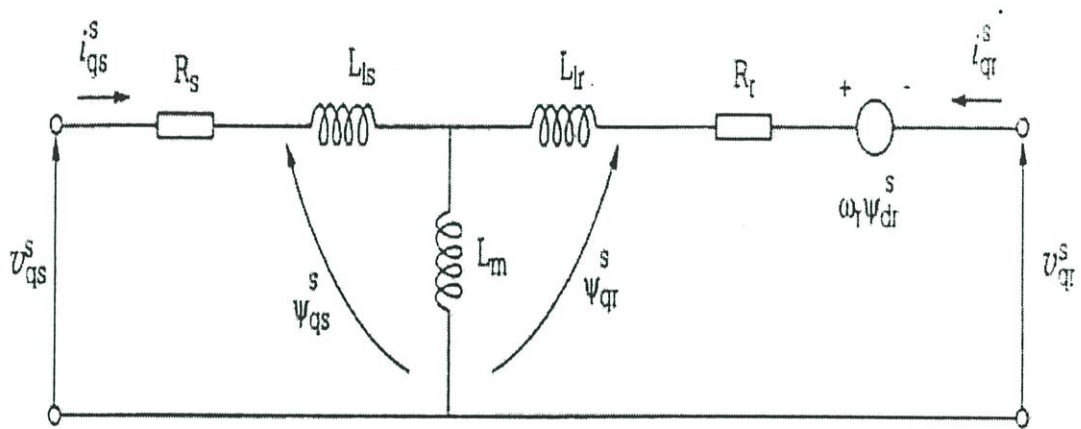
$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{2}{P} J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2.34)$$

เมื่อ T_L คือ แรงบิดของโหลด

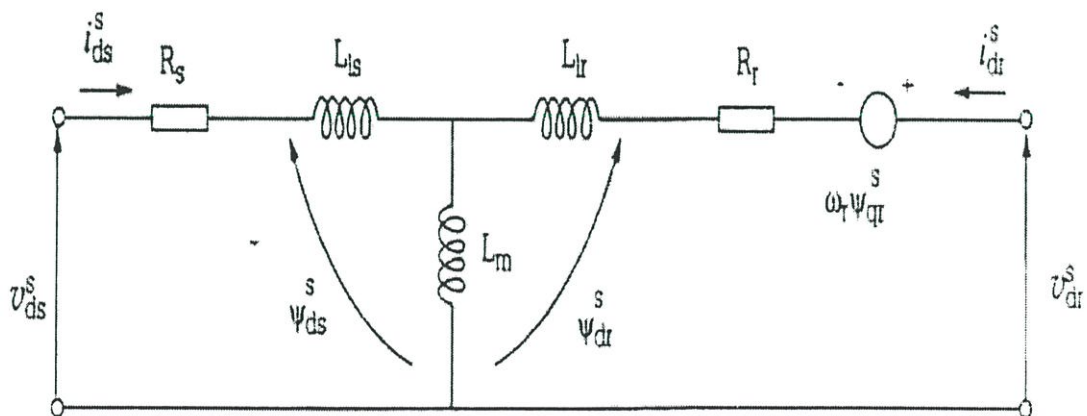
J คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ

2.2.5 วงจรสมมูลของแบบจำลองพลศาสตร์บนแกนที่อยู่กับที่

ถ้าแทน $\omega_e = 0$ ลงในสมการ (2.33) ผลที่ได้ก็คือระบบแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω_e จะถูกจับหยุดนิ่ง และระบบแกนอ้างอิงจะถูกเปลี่ยนจาก $d^c - q^c$ เป็น $d^s - q^s$ แทน วงจรสมมูลดังรูปที่ 2.10 ก็จะเปลี่ยนไปเป็นดังรูปที่ 2.11 และ 2.12 แทน โดยรูปที่ 2.11 เป็นวงจรสมมูลในกรณีของ wound rotor ส่วนรูปที่ 2.12 เป็นวงจรสมมูลในกรณีที่โรเตอร์เป็นกรงกระรอก ซึ่งสามารถนำรูปที่ 2.12 (ก) และ 2.12 (ข) มาเขียนรวมกันได้ตามรูปที่ 2.13 โดยรูปที่ 2.13 (ก) เป็นการรวมเอาวงจรของแกน d และแกน q เข้าไว้ด้วยกันส่วนรูปที่ 2.13 (ข) เป็นการยุบวงจรโดยใช้หลักการของเทวินิน



(ก)



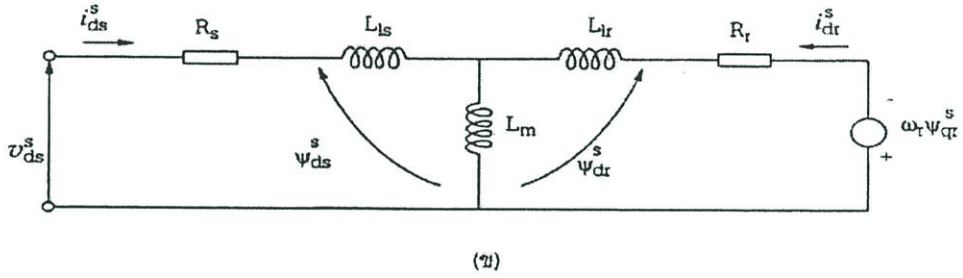
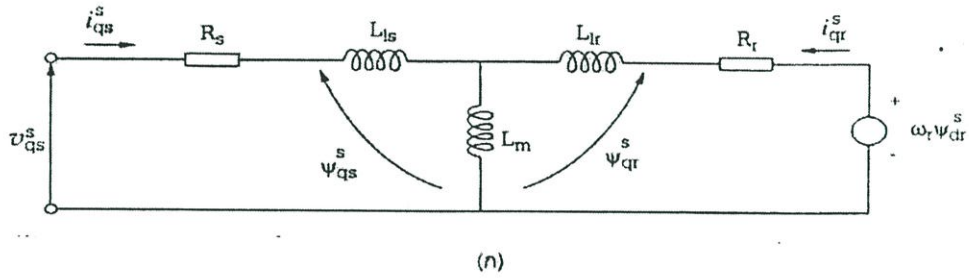
(ข)

รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลพลศาสตร์บนแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง กรณีเป็น wound rotor (ก) บนแกน q^s และ (ข) บนแกน d^s [11]

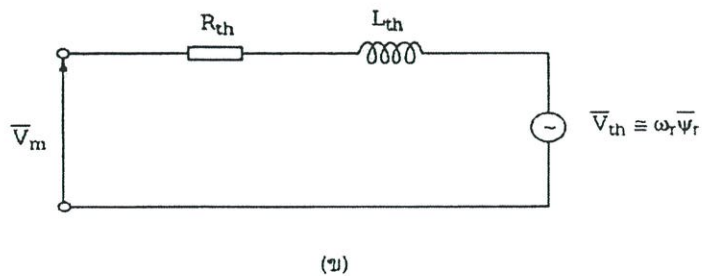
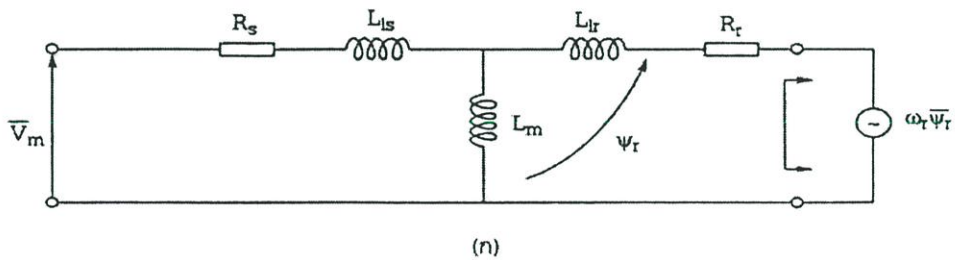
$$|\bar{V}_m| = \sqrt{V_{qs}^2 + V_{ds}^2} \tag{2.35}$$

$$|\bar{\Psi}_r| = \sqrt{\Psi_{qr}^2 + \Psi_{dr}^2} \tag{2.36}$$

เมื่อ $|\bar{V}_m|$ และ $|\bar{\Psi}_r|$ คือค่าขนาดสูงสุดของ \bar{V}_m และ $\bar{\Psi}_r$ ตามลำดับ ส่วน $R_{th} \cong R_s + R_r$, $L_{th} \cong L_{ls} + L_{lr}$ และ $\bar{V}_{th} = \omega_r \bar{\Psi}_r$



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลย์พลศาสตร์บนแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง กรณีเป็นกรงกระรอก [11]



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลย์รวมบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง กรณีเป็นกรงกระรอก [11]

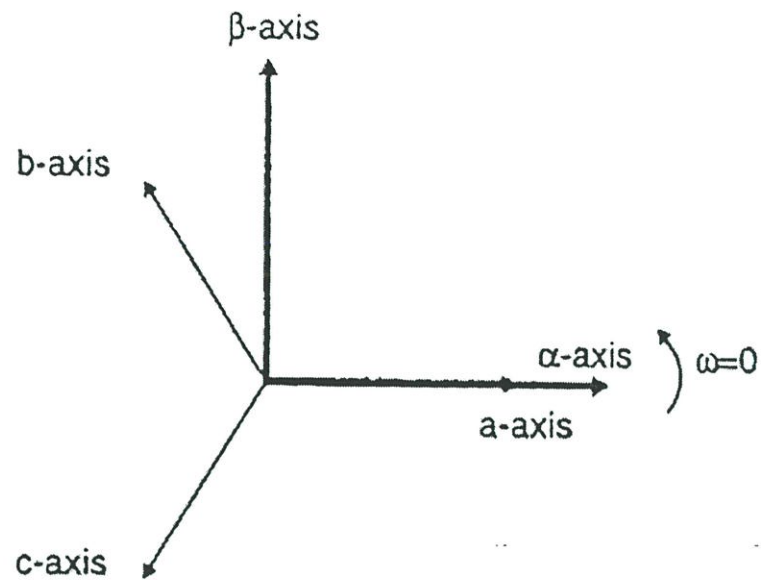
มาถึงตรงนี้อาจมีข้อสงสัยว่า ทำไมวงจรมูลย์มอเตอร์เหนี่ยวนำที่เห็นกันทั่วไปของสถานะคงที่จึงไม่เหมือนกับวงจรมูลย์แกนหุคหนึ่ง ตรงนี้ตอบได้ว่าต้องไม่สับสนกับคำว่าสถานะคงที่กับหุคหนึ่ง วงจรมูลย์มอเตอร์เหนี่ยวนำที่เห็นกันทั่วไปเป็นวงจรมูลย์ในสถานะคงที่หมายความว่าเมื่อทำงานอยู่ในสถานะใด เช่น โหลดเท่าใด หรือความเร็วเท่าใดก็ตาม ในขณะที่พิจารณาไม่มีอะไรเปลี่ยนแปลง แต่รูปที่ 2.11 และ 2.12 เป็นการพิจารณาขณะที่มอเตอร์กำลังเปลี่ยนแปลงจากสถานะความเร็วหนึ่งไปสู่ความเร็วหนึ่ง หรือโหลดหนึ่งไปสู่อีกโหลดหนึ่ง และเป็นการพิจารณาบนแกนที่หุคหนึ่ง

จากรูปที่ 2.10 และ 2.11 จะเห็นว่าพจน์ $\omega_e \psi_r$ ซึ่งมีในรูปที่ 2.10 จะไม่ปรากฏในรูปที่ 2.11 เนื่องด้วยรูปที่ 2.10 แกนอ้างอิงหมุนไปกับสนามแม่เหล็ก ดังนั้นขดลวดที่อยู่กับที่บนสเตเตอร์จึงหมุนด้วยความเร็ว ω_e เทียบกับแกนจึงทำให้ $\omega_e \psi_r$ ปรากฏอยู่ แต่ในรูปที่ 2.11 จะไม่มีเนื่องจากว่าแกนอ้างอิงถูกจับอยู่กับที่บนสเตเตอร์ การหมุนตัดของ ψ_r กับขดลวดจึงไม่มี แต่การหมุนตัดของ ψ_r จะเปลี่ยนจากความเร็ว $\omega_e - \psi_r$ ซึ่งเป็นความเร็วเทียบแกนหมุนไปเป็น ω_e ซึ่งเป็นความเร็วของโรเตอร์เทียบแกนอ้างอิงหุคหนึ่ง

รูปที่ 2.13 เป็นการรวมรูปที่ 2.12 (ก) และ 2.12 (ข) เข้าไว้ด้วยกัน ผลของการรวมจะได้วงจรมูลย์รวมในสถานะเปลี่ยนแปลง ซึ่งเมื่อนำไปเทียบกับวงจรมูลย์มอเตอร์เหนี่ยวนำที่เห็นกันทั่วไปแล้วจะเห็นว่าเหมือนกันแต่ต่างกันตรงการแสดงความสัมพันธ์ของโหลดต่อวงจร ซึ่งวงจรมูลย์มอเตอร์เหนี่ยวนำที่เห็นกันทั่วไปจะแสดงในรูป R_r / s เพราะพิจารณาที่สถานะคงที่ แต่รูปที่ 2.13 แสดงในรูป $\omega_r \bar{\psi}_r$ เพราะการพิจารณาเป็นผลจากการเป็นผลจากการพิจารณาวงจรในสถานะเปลี่ยนแปลง วงจรในรูปที่ 2.13 นี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมชั่วขณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำมาก

2.2.6 การแปลงแบบคล้าก

การแปลงวงจรสเตชันนารีไปยังกรอบอ้างอิงสเตชันนารีถูกสร้างขึ้นโดย E. Clarke ตัวแปรสเตชันนารี 2 เฟส ของการแปลงของคล้ากถูกกำหนดโดย α และ β ดังรูป 2.14 ส่วนตัวแปร 0 ไม่ขึ้นอยู่กับ ω จึงไม่ถูกรวมอยู่ในรูป แกน α ทับอยู่บนแกนเฟส A และแกน β ล้าหลังแกน α ไป $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน สมการในการแปลงคือสมการที่ 2.37



รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน $\alpha\beta$ และแกน abc [11]

$$[f_{\alpha\beta}] = [T_{\alpha\beta}] [f_{abc}] \quad (2.37)$$

เมื่อ เมตริกซ์การแปลง $[T_{\alpha\beta}]$ ถูกกำหนดโดย

$$[T_{\alpha\beta}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

การแปลงกลับทำได้โดยใช้เมตริกซ์แปลงผั

$$[T_{\alpha\beta}]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

2.2.7 การแปลงแบบพาร์ค

การแปลงของพาร์คเป็นการแปลงสามเฟสไปยังสองเฟส ในการวิเคราะห์เครื่องจักรกลเชิงโรตอรีส ถูกนำมาใช้เป็นครั้งแรกโดย R.H.Park สมการของการแปลงจะเป็นสมการที่ 2.40

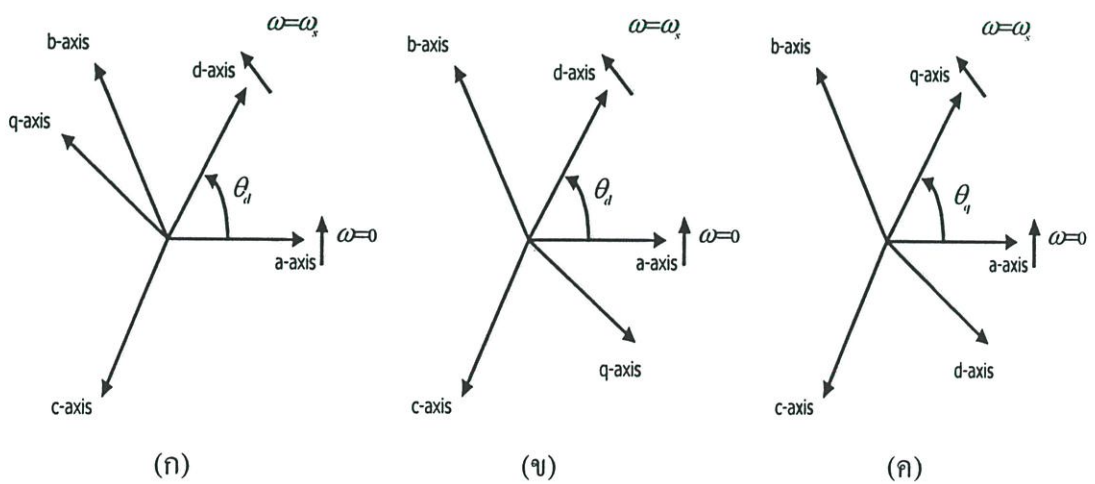
$$[f_{dq0}] = [T_{dq0}(\theta_d)][f_{abc}] \tag{2.40}$$

เมื่อ เมตริกซ์การแปลง dq0 ถูกนิยามดังนี้

$$[T_{dq0}(\theta_d)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_d & \cos\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta_d & -\sin\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{2.41}$$

และเมตริกซ์แปลงผัถูกกำหนดโดย

$$[T_{dq0}(\theta_d)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_d & -\sin \theta_d & 1 \\ \cos\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \tag{2.42}$$



รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ dq และ abc [11]

การแปลงของพาร์คถูกนำไปใช้กับการแปลงปริมาณสเกลเตอร์ของเครื่องจักรกลเชิงโครนัส ไปยังกรอบอ้างอิง dq ซึ่งถูกกำหนดขึ้นที่โรเตอร์ แกน d ตั้งอยู่บนแกนเดียวกับแกนแม่เหล็กของขดลวดสนาม แกน q ถูกนิยามให้นำหน้า แกน d ไป $\frac{\pi}{2}$ ในการแปลงของพาร์คดั้งเดิมนั้นแรงดันภายใน $\omega L_{\sigma} i_f$ อยู่ระหว่างแกน q ถ้านิยามให้แกน q ล้าหลังแกน d ไป $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน แกน q จะทับอยู่กับแรงดันเหนี่ยวนำซึ่งมีค่าเป็นลบของแรงดันภายใน การแปลงโดยให้แกน q ล้าหลังแกน d ถูกกำหนดโดย

$$[T_{dq0}(\theta_d)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_d & \cos\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\theta_d & \sin\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

ในที่นี้จะกำหนดให้เป็นการแปลง qd0 ซึ่งแทน q นำหน้าแกน d และการแปลงถูกแสดงในเทอมของมุม θ_q ระหว่างแกน q และ แกนเฟส A ดังรูป 2.15 (ค)

$$[f_{qd0}] = [T_{dq0}(\theta_q)][f_{abc}] \quad (2.44)$$

เมื่อ

$$[T_{qd0}(\theta_q)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_q & \cos\left(\theta_q - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_q + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\theta_q & \sin\left(\theta_q - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_q + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

โดยเมตริกแปลงผันคือ

$$[T_{qd0}(\theta_q)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_q & \sin\theta_q & 1 \\ \cos\left(\theta_q - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_q - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_q + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_q + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

บทที่ 3

แบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

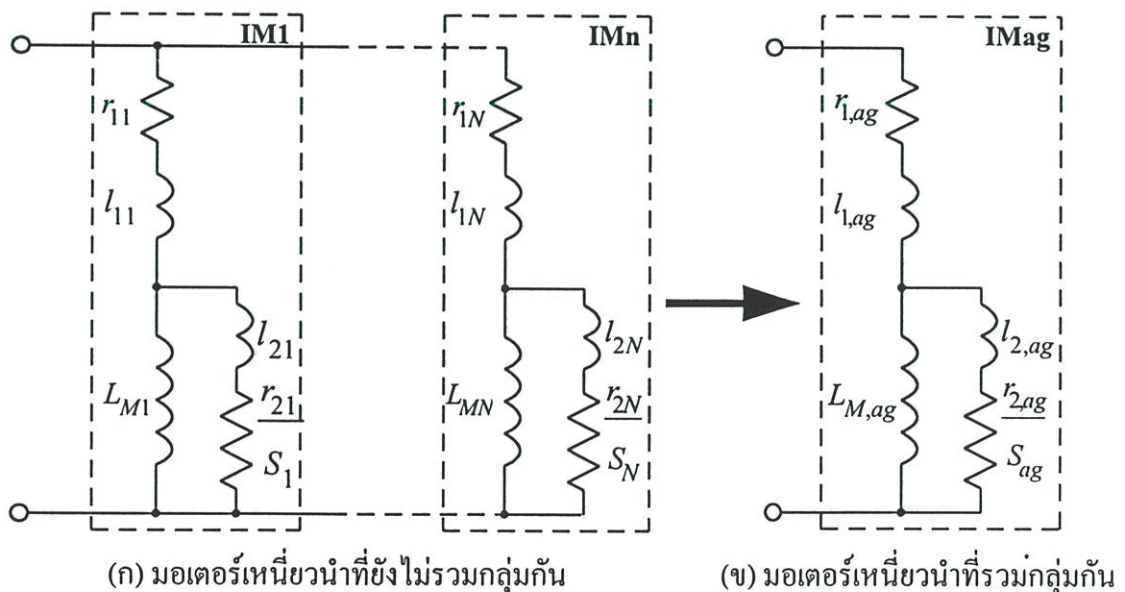
3.1 บทนำ

การศึกษาของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่ออยู่ในบัสเดียวกันของระบบไฟฟ้ากำลังภายในโรงงานอุตสาหกรรมและสถานประกอบการที่มีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวนมากของวิทยานิพนธ์นี้ จะมีการแบ่งเป็นส่วนของวิธีการวิเคราะห์กลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งอธิบายถึงสมการต่างๆที่ใช้ในการหาค่าตัวแปรของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำและส่วนของแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งได้มีการอธิบายถึงส่วนต่างๆของแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.2 วิธีการวิเคราะห์กลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์กลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในวิทยานิพนธ์จะเป็นการวิเคราะห์กลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขนานกันที่บัสเดียวกัน โดยมีการพัฒนามาจาก [2] ซึ่งมีวงจรสมมูลย์ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ สมการที่ใช้ในการหาค่าตัวแปรต่างๆในวงจรสมมูลย์และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังนี้

3.2.1 วงจรสมมูลย์ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลย์ต่อเฟสของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.2.2 สมการที่ใช้หาค่าตัวแปรต่างๆในวงจรสมมูลย์ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วิธีการหาค่าตัวแปรต่างๆของวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่รวมกลุ่มกันในรูปที่ 3.1

(ข) สามารถทำได้โดยการพิจารณาเงื่อนไขการทำงาน 2 เงื่อนไขนั่นคือ no-load และ locked-rotor ซึ่งเมื่อพิจารณาเงื่อนไขการทำงาน 2 เงื่อนไขนี้แล้ว จะทำให้ได้สมการที่สามารถหาค่าตัวแปรต่างๆของวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่รวมกลุ่มกันได้ดังนี้

3.2.2.1 สมการ Stator Resistance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$r_{1,ag} = \frac{\sum_{i=1}^N r_{1i} \left[\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N (r_{1k}^2 + \omega^2 L_{1k}^2) \right]}{\left\{ \sum_{i=1}^N \left[\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N (r_{1k} + j\omega L_{1k}) \right] \right\}^2} \quad (3.1)$$

$r_{1,ag}$ = Stator Resistance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

L_{1k} = $l_{1j} + L_{Mj}$; $j = 1 \dots N$

l_{1j} = Stator Leakage Inductance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

L_{Mj} = Magnetizing Inductance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

r_{1i}, r_{1k} = Stator Resistance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ω = แหล่งจ่ายความถี่เชิงมุม

3.2.2.2 สมการ Rotor Resistance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$r_{2,ag} = \frac{\sum_{i=1}^N r_i \left[\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N (r_k^2 + \omega^2 l_k^2) \right]}{\left\{ \sum_{i=1}^N \left[\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N (r_k + j\omega l_k) \right] \right\}^2} - r_{1,ag} \quad (3.2)$$

- $r_{2,ag}$ = Rotor Resistance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 $r_{1,ag}$ = Stator Resistance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 $r_k, r_i = r_{1j} + r_{2j} \quad ; j = 1 \dots N$
 r_{1j} = Stator Resistance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 r_{2j} = Rotor Resistance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 $l_k = l_{1j} + l_{2j} \quad ; j = 1 \dots N$
 l_{1j} = Stator Leakage Inductance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 l_{2j} = Rotor Leakage Inductance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 ω = แหล่งจ่ายความถี่เชิงมุม

3.2.2.3 สมการ Stator Leakage Inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$l_{1,ag} = \frac{\sum_{i=1}^N l_{1i} \left[\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N (r_k^2 + \omega^2 l_k^2) \right]}{\left\{ \sum_{i=1}^N \left[\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N (r_k + j\omega l_k) \right] \right\}^2} \quad (3.3)$$

- $l_{1,ag}$ = Stator Leakage Inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 l_{1i} = Stator Leakage Inductance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 $r_k = r_{1j} + r_{2j} \quad ; j = 1 \dots N$
 r_{1j} = Stator Resistance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 r_{2j} = Rotor Resistance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 $l_k = l_{1j} + l_{2j} \quad ; j = 1 \dots N$
 l_{1j} = Stator Leakage Inductance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 l_{2j} = Rotor Leakage Inductance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 ω = แหล่งจ่ายความถี่เชิงมุม

3.2.2.4 สมการ Rotor Leakage Inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$l_{2,ag} = \frac{\sum_{i=1}^N l_{2i} \left[\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N (r_k^2 + \omega^2 l_k^2) \right]}{\left\{ \sum_{i=1}^N \left[\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N (r_k + j\omega l_k) \right] \right\}^2} \quad (3.4)$$

$l_{2,ag}$ = Rotor Leakage Inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

l_{2i} = Rotor Leakage Inductance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$r_k = r_{1j} + r_{2j} \quad ; j = 1 \dots N$

r_{1j} = Stator Resistance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

r_{2j} = Rotor Resistance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$l_k = l_{1j} + l_{2j} \quad ; j = 1 \dots N$

l_{1j} = Stator Leakage Inductance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

l_{2j} = Rotor Leakage Inductance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ω = แหล่งจ่ายความถี่เชิงมุม

3.2.2.5 สมการ Magnetizing Inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$L_{M,ag} = \frac{\sum_{i=1}^N L_{1i} \left[\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N (r_{1k}^2 + \omega^2 L_{1k}^2) \right]}{\left\{ \sum_{i=1}^N \left[\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N (r_{1k} + j\omega L_{1k}) \right] \right\}^2} - l_{1,ag} \quad (3.5)$$

$L_{M,ag}$ = Magnetizing Inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$l_{1,ag}$ = Stator Leakage Inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$L_{1k}, L_{1i} = l_{1j} + L_{Mj} \quad ; j = 1 \dots N$$

l_{1j} = Stator Leakage Inductance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

L_{Mj} = Magnetizing Inductance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

r_{1k} = Stator Resistance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ω = แหล่งจ่ายความถี่เชิงมุม

3.2.2.6 สมการหาค่าตัวแปรของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2 ตัว

1) สมการ Stator Resistance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$r_{1,ag} = \frac{r_{11}(r_{12}^2 + \omega^2 L_{12}^2) + r_{12}(r_{11}^2 + \omega^2 L_{11}^2)}{(r_{12} + r_{11})^2 + \omega^2 (L_{12} + L_{11})^2} \quad (3.6)$$

2) สมการ Rotor Resistance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$r_{2,ag} = \frac{r_1(r_2^2 + \omega^2 l_2^2) + r_2(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)}{(r_2 + r_1)^2 + \omega^2 (l_2 + l_1)^2} - r_{1,ag} \quad (3.7)$$

3) สมการ Stator Leakage Inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$l_{1,ag} = \frac{l_{11}(r_2^2 + \omega^2 l_2^2) + l_{12}(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)}{(r_2 + r_1)^2 + \omega^2 (l_2 + l_1)^2} \quad (3.8)$$

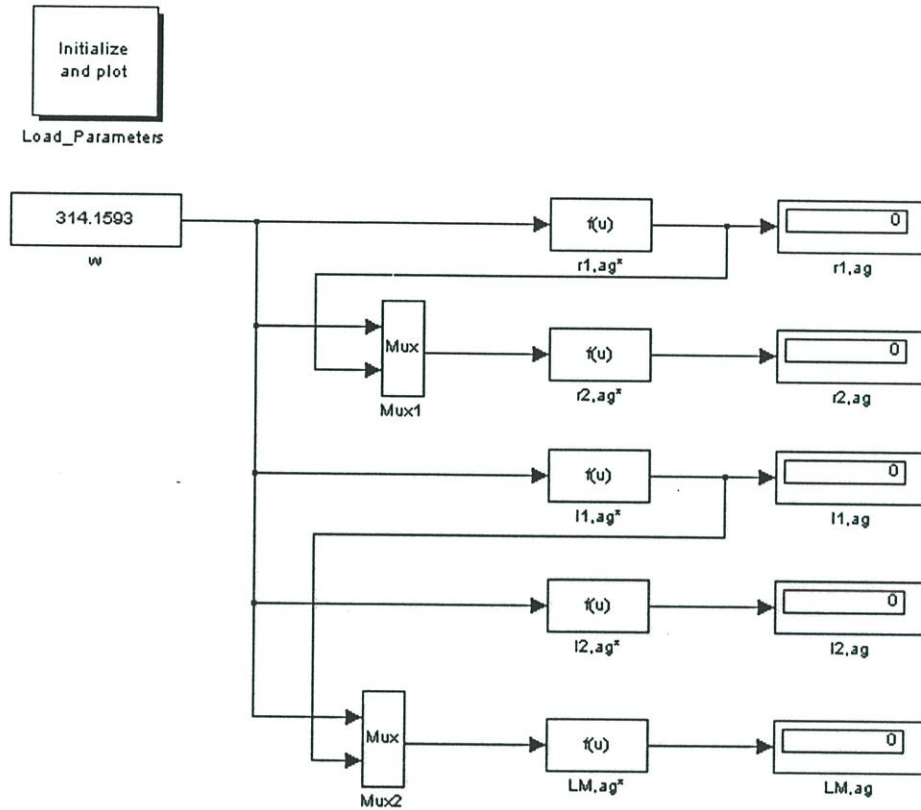
4) สมการ Rotor Leakage Inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$l_{2,ag} = \frac{l_{21}(r_2^2 + \omega^2 l_2^2) + l_{22}(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)}{(r_2 + r_1)^2 + \omega^2 (l_2 + l_1)^2} \quad (3.9)$$

5) สมการ Magnetizing Inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$L_{M,ag} = \frac{L_{11}(r_{12}^2 + \omega^2 L_{12}^2) + L_{12}(r_{11}^2 + \omega^2 L_{11}^2)}{(r_{12} + r_{11})^2 + \omega^2 (L_{12} + L_{11})^2} - l_{1,ag} \quad (3.10)$$

6) แบบจำลองการหาค่าตัวแปรของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดกัน 2 ตัว



รูปที่ 3.2 แบบจำลองการหาค่าตัวแปรของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดกัน 2 ตัว

3.2.2.7 สมการหาค่าตัวแปรของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดกัน 3 ตัว

1) สมการ Stator Resistance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$r_{1,ag} = \frac{r_{11}(r_{12}^2 + \omega^2 L_{12}^2)(r_{13}^2 + \omega^2 L_{13}^2) + r_{12}(r_{11}^2 + \omega^2 L_{11}^2)(r_{13}^2 + \omega^2 L_{13}^2) + r_{13}(r_{11}^2 + \omega^2 L_{11}^2)(r_{12}^2 + \omega^2 L_{12}^2)}{[r_{12}r_{13} + r_{11}r_{13} + r_{11}r_{12} + \omega^2(L_{12}L_{13} + L_{11}L_{13} + L_{11}L_{12})]^2 + \omega^2[L_{12}r_{13} + L_{11}r_{13} + L_{11}r_{12}]^2} \quad (3.11)$$

2) สมการ Rotor Resistance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$r_{2,ag} = \frac{r_1(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2) + r_2(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2) + r_3(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)}{[r_2r_3 + r_1r_3 + r_1r_2 + \omega^2(l_2l_3 + l_1l_3 + l_1l_2)]^2 + \omega^2[l_2r_3 + l_1r_3 + l_1r_2]^2} - r_{1,ag} \quad (3.12)$$

3) สมการ Stator Leakage Inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$l_{1,ag} = \frac{l_{11}(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2) + l_{12}(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2) + l_{13}(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)}{[r_2 r_3 + r_1 r_3 + r_1 r_2 + \omega^2 (l_2 l_3 + l_1 l_3 + l_1 l_2)]^2 + \omega^2 [l_2 r_3 + l_1 r_3 + l_1 r_2]^2} \quad (3.13)$$

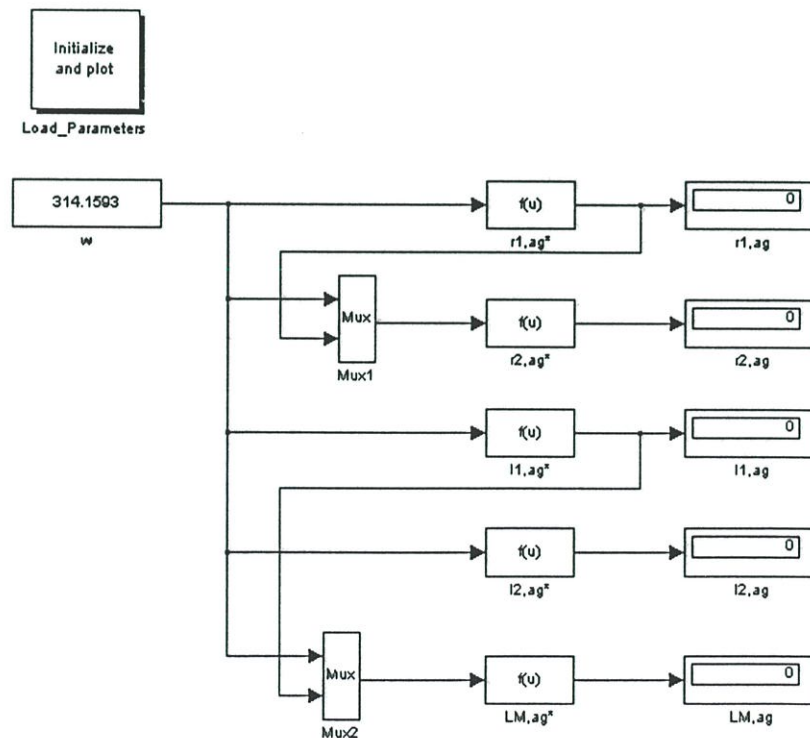
4) สมการ Rotor Leakage Inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$l_{2,ag} = \frac{l_{21}(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2) + l_{22}(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2) + l_{23}(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)}{[r_2 r_3 + r_1 r_3 + r_1 r_2 + \omega^2 (l_2 l_3 + l_1 l_3 + l_1 l_2)]^2 + \omega^2 [l_2 r_3 + l_1 r_3 + l_1 r_2]^2} \quad (3.14)$$

5) สมการ Magnetizing Inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$L_{M,ag} = \frac{L_{11}(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2) + L_{12}(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2) + L_{13}(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)}{[r_2 r_3 + r_1 r_3 + r_1 r_2 + \omega^2 (L_{12} L_{13} + L_{11} L_{13} + L_{11} L_{12})]^2 + \omega^2 [L_{12} r_3 + L_{11} r_3 + L_{11} r_2]^2} - l_{1,ag} \quad (3.15)$$

6) แบบจำลองการหาค่าตัวแปรของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 ตัว



รูปที่ 3.3 แบบจำลองการหาค่าตัวแปรของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 ตัว

3.2.2.8 สมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดกัน 5 ตัว

1) สมการ Stator Resistance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$r_{1,ag} = r_{11}(r_{12}^2 + \omega^2 L_{12}^2)(r_{13}^2 + \omega^2 L_{13}^2)(r_{14}^2 + \omega^2 L_{14}^2)(r_{15}^2 + \omega^2 L_{15}^2) + r_{12}(r_{11}^2 + \omega^2 L_{11}^2)(r_{13}^2 + \omega^2 L_{13}^2)(r_{14}^2 + \omega^2 L_{14}^2)(r_{15}^2 + \omega^2 L_{15}^2) \\ + r_{13}(r_{11}^2 + \omega^2 L_{11}^2)(r_{12}^2 + \omega^2 L_{12}^2)(r_{14}^2 + \omega^2 L_{14}^2)(r_{15}^2 + \omega^2 L_{15}^2) + r_{14}(r_{11}^2 + \omega^2 L_{11}^2)(r_{12}^2 + \omega^2 L_{12}^2)(r_{13}^2 + \omega^2 L_{13}^2)(r_{15}^2 + \omega^2 L_{15}^2) \\ + r_{15}(r_{11}^2 + \omega^2 L_{11}^2)(r_{12}^2 + \omega^2 L_{12}^2)(r_{13}^2 + \omega^2 L_{13}^2)(r_{14}^2 + \omega^2 L_{14}^2)$$

$$[(r_{12}r_{13}r_{14}r_{15} + r_{11}r_{13}r_{14}r_{15} + r_{11}r_{12}r_{14}r_{15} + r_{11}r_{12}r_{13}r_{15} + r_{11}r_{12}r_{13}r_{14}) + \omega^2(r_{12}r_{13}L_{14}L_{15} + L_{12}r_{13}L_{14}r_{15} + L_{12}L_{13}r_{14}r_{15} \\ + r_{11}r_{13}L_{14}L_{15} + L_{11}r_{13}L_{14}r_{15} + L_{11}L_{13}r_{14}r_{15} + r_{11}r_{12}L_{14}L_{15} + L_{11}r_{12}L_{14}r_{15} + L_{11}L_{12}r_{14}r_{15} + r_{11}r_{12}L_{13}L_{15} + L_{11}r_{12}L_{13}r_{15} \\ + L_{11}L_{12}r_{13}r_{15} + r_{11}r_{12}L_{13}L_{14} + L_{11}r_{12}L_{13}r_{14} + L_{11}L_{12}r_{13}r_{14}) + \omega^4(L_{12}L_{13}L_{14}L_{15} + L_{11}L_{13}L_{14}L_{15} + L_{11}L_{12}L_{14}L_{15} \\ + L_{11}L_{12}L_{13}L_{15} + L_{11}L_{12}L_{13}L_{14})]^2 + \omega^2[(r_{12}r_{13}L_{14}r_{15} + L_{12}r_{13}L_{14}r_{15} + r_{11}r_{13}L_{14}r_{15} + L_{11}r_{13}L_{14}r_{15} + r_{11}r_{12}L_{14}r_{15} + L_{11}r_{12}L_{14}r_{15} \\ + r_{11}r_{12}L_{13}r_{15} + L_{11}r_{12}r_{13}r_{15} + r_{11}r_{12}L_{13}r_{14} + L_{11}r_{12}r_{13}r_{14}) + \omega^2(L_{12}r_{13}L_{14}L_{15} + L_{12}L_{13}L_{14}r_{15} + L_{11}r_{13}L_{14}L_{15} + L_{11}L_{13}L_{14}r_{15} \\ + L_{11}r_{12}L_{14}L_{15} + L_{11}L_{12}L_{14}r_{15} + L_{11}r_{12}L_{13}L_{15} + L_{11}L_{12}L_{13}r_{15} + L_{11}r_{12}L_{13}L_{14} + L_{11}L_{12}L_{13}r_{14})]^2$$

(3.16)

2) สมการ Rotor Resistance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$r_{2,ag} = r_1(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2)(r_4^2 + \omega^2 l_4^2)(r_5^2 + \omega^2 l_5^2) + r_2(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2)(r_4^2 + \omega^2 l_4^2)(r_5^2 + \omega^2 l_5^2) \\ + r_3(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)(r_4^2 + \omega^2 l_4^2)(r_5^2 + \omega^2 l_5^2) + r_4(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2)(r_5^2 + \omega^2 l_5^2) \\ + r_5(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2)(r_4^2 + \omega^2 l_4^2)$$

$$[(r_2r_3r_4r_5 + r_1r_3r_4r_5 + r_1r_2r_4r_5 + r_1r_2r_3r_5 + r_1r_2r_3r_4) + \omega^2(r_2r_3l_4l_5 + l_2r_3l_4r_5 + l_2l_3r_4r_5 + r_1r_3l_4l_5 \\ + l_1r_3l_4r_5 + l_1l_3r_4r_5 + r_1r_2l_4l_5 + l_1r_2l_4r_5 + l_1r_2l_3l_5 + l_1r_2l_3r_5 + l_1l_2r_3r_5 + r_1r_2l_3l_4 \\ + l_1r_2l_3r_4 + l_1l_2r_3r_4) + \omega^4(l_2l_3l_4l_5 + l_1l_3l_4l_5 + l_1l_2l_4l_5 + l_1l_2l_3l_5 + l_1l_2l_3l_4)]^2 + \omega^2[(r_2r_3l_4r_5 + l_2r_3l_4r_5 \\ + r_1r_3l_4r_5 + l_1r_3r_4r_5 + r_1r_2l_4r_5 + l_1r_2r_4r_5 + r_1r_2l_3r_5 + l_1r_2r_3r_5 + r_1r_2l_3r_4 + l_1r_2r_3r_4) + \omega^2(l_2r_3l_4l_5 \\ + l_2l_3l_4r_5 + l_1r_3l_4l_5 + l_1l_3l_4r_5 + l_1l_2l_4r_5 + l_1l_2l_3l_5 + l_1l_2l_3l_4)]^2$$

(3.17)

3) สมการ Stator Leakage Inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$l_{1,og} = l_{11}(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2)(r_4^2 + \omega^2 l_4^2)(r_5^2 + \omega^2 l_5^2) + l_{12}(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2)(r_4^2 + \omega^2 l_4^2)(r_5^2 + \omega^2 l_5^2) \\ + l_{13}(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)(r_4^2 + \omega^2 l_4^2)(r_5^2 + \omega^2 l_5^2) + l_{14}(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2)(r_5^2 + \omega^2 l_5^2) \\ + l_{15}(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2)(r_4^2 + \omega^2 l_4^2)$$

$$[(r_2 r_3 r_4 r_5 + r_1 r_3 r_4 r_5 + r_1 r_2 r_4 r_5 + r_1 r_2 r_3 r_5 + r_1 r_2 r_3 r_4) + \omega^2 (r_2 r_3 l_4 l_5 + l_2 r_3 l_4 r_5 + l_2 l_3 r_4 r_5 + r_1 r_3 l_4 l_5 \\ + l_1 r_3 l_4 r_5 + l_1 l_3 r_4 r_5 + r_1 r_2 l_4 l_5 + l_1 r_2 l_4 r_5 + l_1 l_2 r_4 r_5 + r_1 r_2 l_3 l_5 + l_1 r_2 l_3 r_5 + l_1 l_2 r_3 r_5 + r_1 r_2 l_3 l_4 \\ + l_1 r_2 l_3 r_4 + l_1 l_2 r_3 r_4) + \omega^4 (l_2 l_3 l_4 l_5 + l_1 l_3 l_4 l_5 + l_1 l_2 l_4 l_5 + l_1 l_2 l_3 l_5 + l_1 l_2 l_3 l_4)]^2 + \omega^2 [(r_2 r_3 l_4 r_5 + l_2 r_3 r_4 r_5 \\ + r_1 r_3 l_4 r_5 + l_1 r_3 r_4 r_5 + r_1 r_2 l_4 r_5 + l_1 r_2 r_4 r_5 + r_1 r_2 l_3 r_5 + l_1 r_2 r_3 r_5 + r_1 r_2 l_3 r_4 + l_1 r_2 r_3 r_4) + \omega^2 (l_2 r_3 l_4 l_5 \\ + l_2 l_3 l_4 r_5 + l_1 r_3 l_4 l_5 + l_1 l_3 l_4 r_5 + l_1 r_2 l_4 l_5 + l_1 l_2 l_4 r_5 + l_1 r_2 l_3 l_5 + l_1 l_2 l_3 r_5 + l_1 r_2 l_3 l_4 + l_1 l_2 l_3 r_4)]^2$$

(3.18)

4) สมการ Rotor Leakage Inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$l_{2,og} = l_{21}(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2)(r_4^2 + \omega^2 l_4^2)(r_5^2 + \omega^2 l_5^2) + l_{22}(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2)(r_4^2 + \omega^2 l_4^2)(r_5^2 + \omega^2 l_5^2) \\ + l_{23}(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)(r_4^2 + \omega^2 l_4^2)(r_5^2 + \omega^2 l_5^2) + l_{24}(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2)(r_5^2 + \omega^2 l_5^2) \\ + l_{25}(r_1^2 + \omega^2 l_1^2)(r_2^2 + \omega^2 l_2^2)(r_3^2 + \omega^2 l_3^2)(r_4^2 + \omega^2 l_4^2)$$

$$[(r_2 r_3 r_4 r_5 + r_1 r_3 r_4 r_5 + r_1 r_2 r_4 r_5 + r_1 r_2 r_3 r_5 + r_1 r_2 r_3 r_4) + \omega^2 (r_2 r_3 l_4 l_5 + l_2 r_3 l_4 r_5 + l_2 l_3 r_4 r_5 + r_1 r_3 l_4 l_5 \\ + l_1 r_3 l_4 r_5 + l_1 l_3 r_4 r_5 + r_1 r_2 l_4 l_5 + l_1 r_2 l_4 r_5 + l_1 l_2 r_4 r_5 + r_1 r_2 l_3 l_5 + l_1 r_2 l_3 r_5 + l_1 l_2 r_3 r_5 + r_1 r_2 l_3 l_4 \\ + l_1 r_2 l_3 r_4 + l_1 l_2 r_3 r_4) + \omega^4 (l_2 l_3 l_4 l_5 + l_1 l_3 l_4 l_5 + l_1 l_2 l_4 l_5 + l_1 l_2 l_3 l_5 + l_1 l_2 l_3 l_4)]^2 + \omega^2 [(r_2 r_3 l_4 r_5 + l_2 r_3 r_4 r_5 \\ + r_1 r_3 l_4 r_5 + l_1 r_3 r_4 r_5 + r_1 r_2 l_4 r_5 + l_1 r_2 r_4 r_5 + r_1 r_2 l_3 r_5 + l_1 r_2 r_3 r_5 + r_1 r_2 l_3 r_4 + l_1 r_2 r_3 r_4) + \omega^2 (l_2 r_3 l_4 l_5 \\ + l_2 l_3 l_4 r_5 + l_1 r_3 l_4 l_5 + l_1 l_3 l_4 r_5 + l_1 r_2 l_4 l_5 + l_1 l_2 l_4 r_5 + l_1 r_2 l_3 l_5 + l_1 l_2 l_3 r_5 + l_1 r_2 l_3 l_4 + l_1 l_2 l_3 r_4)]^2$$

(3.19)

5) สมการ Magnetizing Inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

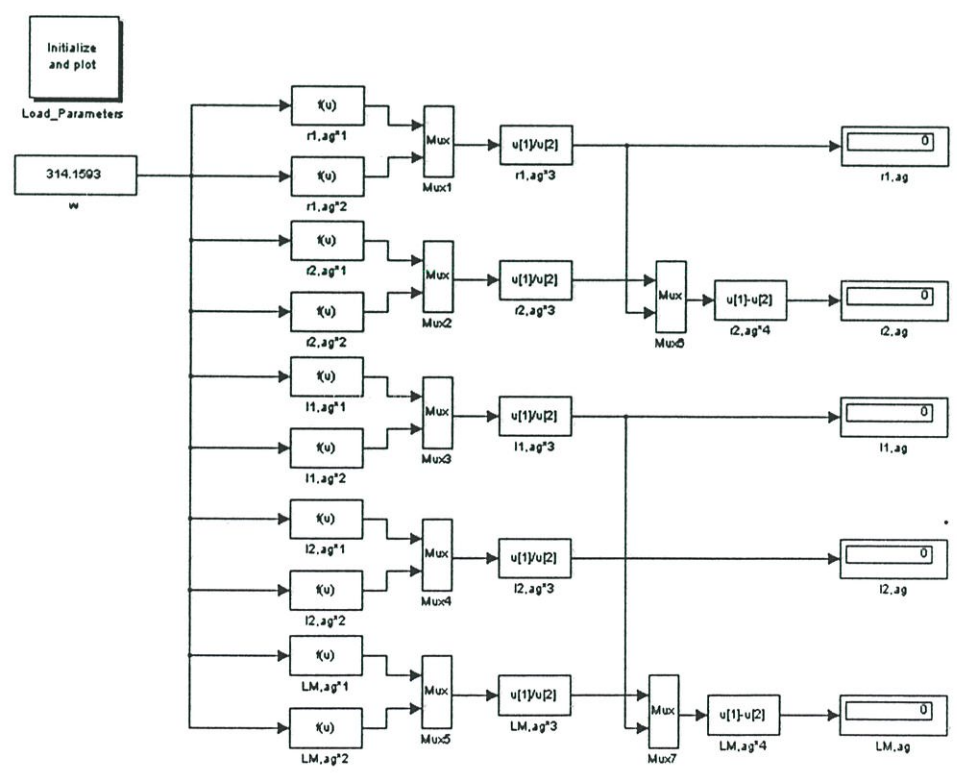
$$L_{Mag} = L_1(i_{12}^2 + \omega^2 L_2^2 i_{13}^2 + \omega^2 L_3^2 i_{14}^2 + \omega^2 L_4^2 i_{15}^2 + \omega^2 L_5^2) + L_2(i_{11}^2 + \omega^2 L_1^2 i_{13}^2 + \omega^2 L_3^2 i_{14}^2 + \omega^2 L_4^2 i_{15}^2 + \omega^2 L_5^2) + L_3(i_{11}^2 + \omega^2 L_1^2 i_{12}^2 + \omega^2 L_2^2 i_{14}^2 + \omega^2 L_4^2 i_{15}^2 + \omega^2 L_5^2) + L_4(i_{11}^2 + \omega^2 L_1^2 i_{12}^2 + \omega^2 L_2^2 i_{13}^2 + \omega^2 L_3^2 i_{15}^2 + \omega^2 L_5^2) + L_5(i_{11}^2 + \omega^2 L_1^2 i_{12}^2 + \omega^2 L_2^2 i_{13}^2 + \omega^2 L_3^2 i_{14}^2 + \omega^2 L_4^2)$$

$$-l_{.ag}$$

$$[(i_{12}i_{13}i_{14}i_{15} + r_1 i_{13}i_{14}i_{15} + r_1 i_{12}i_{14}i_{15} + r_1 i_{12}i_{13}i_{15} + r_1 i_{12}i_{13}i_{14}) + \omega^2 (r_{12}i_{13}L_4L_5 + L_2i_{13}L_4i_{15} + L_2L_4i_{13}i_{15} + r_1 i_{13}L_4L_5 + L_1i_{13}L_4i_{15} + L_1L_4i_{13}i_{15} + r_1 i_{12}L_4L_5 + L_1i_{12}L_4i_{15} + L_1L_4i_{12}i_{15} + r_1 i_{12}L_3L_5 + L_1i_{12}L_3i_{15} + L_1L_3i_{12}i_{15} + r_1 i_{12}i_{13}i_{14} + L_1i_{12}i_{13}i_{14}) + \omega^4 (L_2L_3L_4L_5 + L_1L_3L_4L_5 + L_1L_2L_4L_5 + L_1L_2L_3L_5 + L_1L_2L_3L_4)]^2 + \omega^2 [(r_{12}i_{13}L_4i_{15} + L_2i_{13}i_{14}i_{15} + r_1 i_{13}L_4i_{15} + L_1i_{13}i_{14}i_{15} + r_1 i_{12}L_4i_{15} + L_1i_{12}i_{13}i_{15} + L_1i_{12}i_{13}i_{14} + L_1i_{12}L_3L_5 + L_1L_2L_3L_4)]^2 + \omega^2 (L_2i_{13}L_4L_5 + L_2L_3L_4i_{15} + L_1i_{13}L_4L_5 + L_1L_3L_4i_{15} + L_1i_{12}L_4L_5 + L_1L_2L_3L_5 + L_1L_2L_3L_4)]^2$$

(3.20)

6) แบบจำลองการหาค่าตัวแปรของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดกัน 5 ตัว



รูปที่ 3.4 แบบจำลองการหาค่าตัวแปรของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดกัน 5 ตัว

3.2.3 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมากสำหรับการสร้างแบบจำลองกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะสามารถหาได้จากการทดสอบ ซึ่งเมื่อได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัวมาแล้ว ก็จะทำให้สามารถหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ได้โดยใช้สมการดังนี้

$$H_a = \frac{J_a \omega_s^2}{2P_a} \tag{3.21}$$

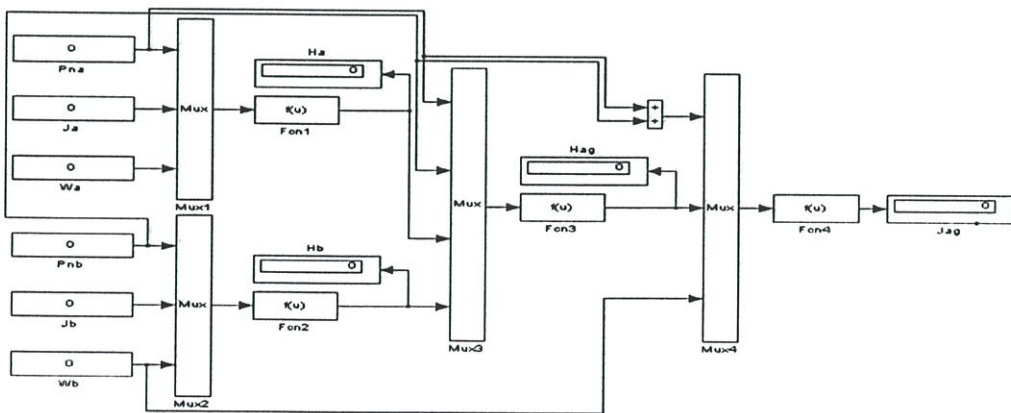
$$H_b = \frac{J_b \omega_s^2}{2P_b} \tag{3.22}$$

$$H_{ag} = \frac{H_a P_a + H_b P_b}{P_a + P_b} \tag{3.23}$$

$$P_{ag} = P_a + P_b \tag{3.24}$$

$$J_{ag} = \frac{2H_{ag} P_{ag}}{\omega_s^2} \tag{3.25}$$

- P_a คือ พิกัดกำลังเอาต์พุตของ IM_a
- P_b คือ พิกัดกำลังเอาต์พุตของ IM_b
- J_a คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของ IM_a
- J_b คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของ IM_b
- J_{ag} คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของ IM_{ag}
- ω_s คือ ความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส



รูปที่ 3.5 แบบจำลองการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.2.4 ค่าสลิปของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การหาค่าสลิปของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เป็นอีกส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญมากในการเขียนแบบจำลอง เนื่องจากค่าแรงบิดของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในแบบจำลองจะหามาได้จากการแทนค่าสลิปของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำลงในสมการการหาค่าแรงบิดของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งการหาค่าสลิปของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ หาได้โดยใช้สมการดังนี้

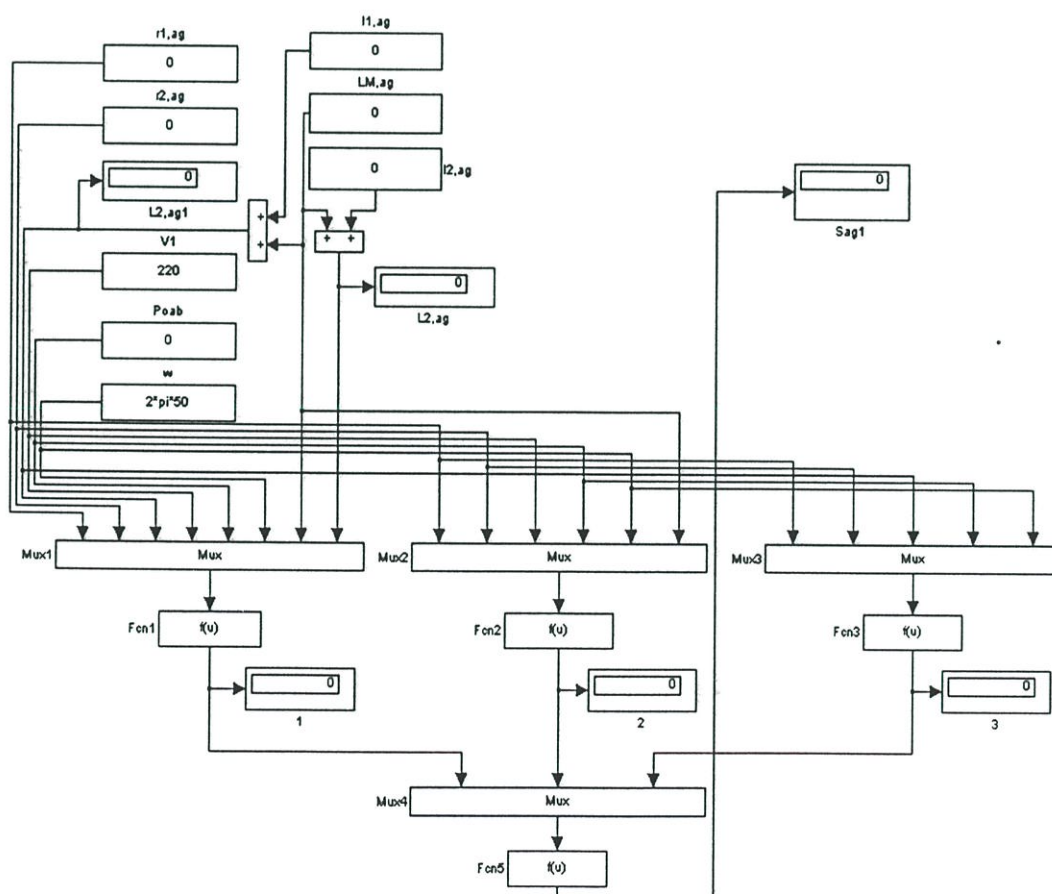
$$\alpha s_{ag}^2 + \beta s_{ag} + \gamma = 0 \quad (3.26)$$

$$\alpha = 3\omega^2 r_{2,ag} L_{M,ag}^2 V_1^2 + \omega^2 \{r_{1,ag}^2 L_{2,ag}^2 + \omega^2 (L_{1,ag} L_{2,ag} - L_{M,ag}^2)^2\} P_{ag} \quad (3.27)$$

$$\beta = -\omega^2 r_{2,ag} L_{M,ag}^2 (3V_1^2 - 2r_{1,ag} P_{ag}) \quad (3.28)$$

$$\gamma = r_{2,ag}^2 (r_{1,ag}^2 + \omega^2 L_{1,ag}^2) P_{ag} \quad (3.29)$$

$$s_{ag} = \frac{-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha} \quad (3.30)$$



รูปที่ 3.6 แบบจำลองการหาค่าสลิปของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.2.5 ค่าแรงบิดของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การหาค่าแรงบิดของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในแบบจำลอง สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$T_{ag} = \frac{P_{ag}}{(1 - S_{ag})\omega_s} \quad (3.31)$$

T_{ag} = แรงบิดของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

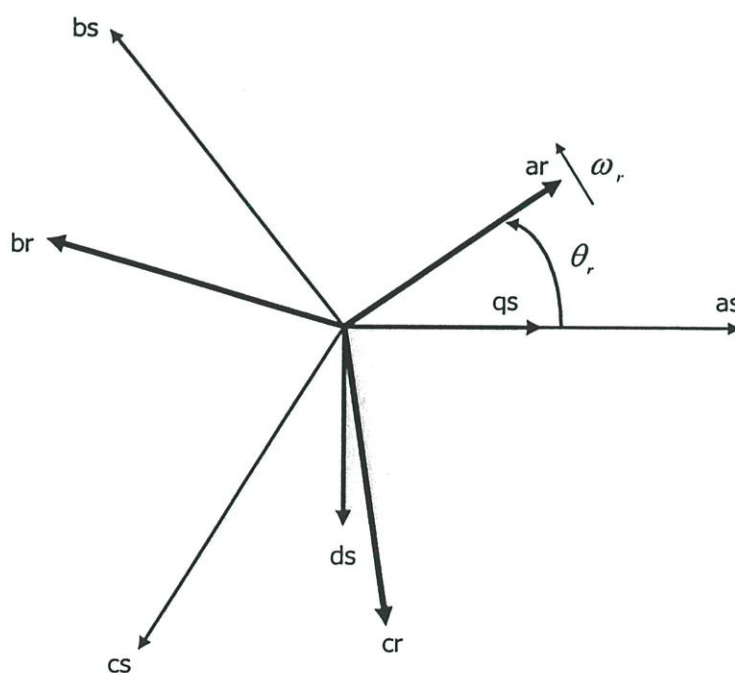
P_{ag} = พิกัดกำลังเอาต์พุตของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

S_{ag} = ค่าสลิปของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ω_s = ความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส

3.3 แบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วิธีการเขียนแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในวิทยานิพนธ์จะเป็นการเขียนในกรอบอ้างอิงสเตชันนารีโดยจะอ้างอิงแกน q ของกรอบอ้างอิงสเตชันนารีให้อ้างอิงอยู่กับแกนของเฟส A ทางด้านสเตเตอร์ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แกนอ้างอิงของกรอบอ้างอิงสเตชันนารี [11]

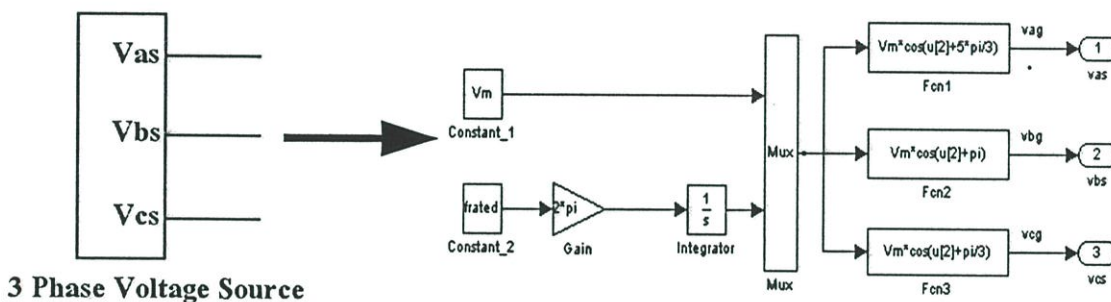
3.3.1 แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส

การเขียนแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงสเตชันนารีมีการแบ่งเป็นส่วนต่างๆอยู่หลายส่วนด้วยกัน โดยเมื่อพิจารณาที่สมการแรงดันอินพุตคือแรงดันทั้งสามเฟสที่จ่ายเข้าทางด้านสเตเตอร์นั้นจะมีสมการทางคณิตศาสตร์ที่นำไปเขียนเป็นแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งจะมีสมการและแบบจำลองดังนี้

$$V_{as} = V_{ms} \cos(\omega_e t) \tag{3.26}$$

$$V_{bs} = V_{ms} \cos(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}) \tag{3.27}$$

$$V_{cs} = V_{ms} \cos(\omega_e t - \frac{4\pi}{3}) \tag{3.28}$$



รูปที่ 3.8 แบบจำลองแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส

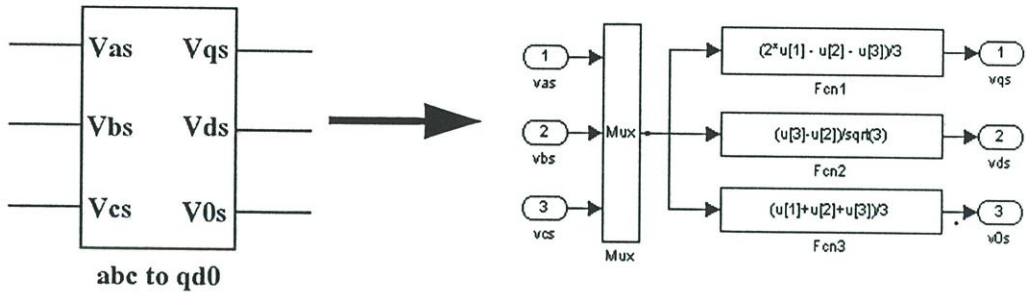
3.3.2 การแปลงแรงดันสามเฟสเป็นแรงดัน qd0

การเขียนแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงสเตชันนารีเมื่อพิจารณาที่สมการการแปลงแรงดันสามเฟสด้านสเตเตอร์เป็นแรงดัน qd0 จะมีสมการทางคณิตศาสตร์ที่นำมาเขียนเป็นแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สำหรับการแปลงแรงดันสามเฟสด้านสเตเตอร์เป็นแรงดัน qd0 ซึ่งจะมีสมการและแบบจำลองดังนี้

$$V_{qs}^s = \frac{2}{3}V_{as} - \frac{1}{3}V_{bs} - \frac{1}{3}V_{cs} \tag{3.29}$$

$$V_{ds}^s = \frac{1}{\sqrt{3}}(V_{cs} - V_{bs}) \tag{3.30}$$

$$V_{0s} = \frac{1}{3}(V_{as} + V_{bs} + V_{cs}) \tag{3.31}$$



รูปที่ 3.9 แบบจำลองการแปลงแรงดัน 3 เฟสเป็นแรงดัน qd0

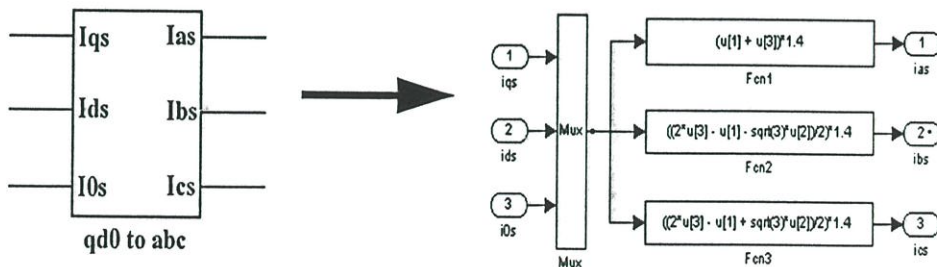
3.3.3 การแปลงกระแส qd0 เป็นกระแสสามเฟส

การเขียนแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงสเตชันนารีเมื่อพิจารณาที่สมการการแปลงกระแส qd0 เป็นกระแสสามเฟสด้านสเตเตอร์ การทำการเขียนแบบจำลองการแปลงกระแส qd0 เป็นกระแสสามเฟสด้านสเตเตอร์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์นั้น เพื่อที่จะทำให้ได้ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่กระแสสามเฟสด้านสเตเตอร์เพื่อนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบและจากงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในต่างประเทศ [2, 3] ซึ่งจะมีสมการและแบบจำลองดังนี้

$$i_{as} = i_{qs}^s + i_{0s} \tag{3.32}$$

$$i_{bs} = -\frac{1}{2}i_{qs}^s - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds}^s + i_{0s} \tag{3.33}$$

$$i_{cs} = -\frac{1}{2}i_{qs}^s + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds}^s + i_{0s} \tag{3.34}$$

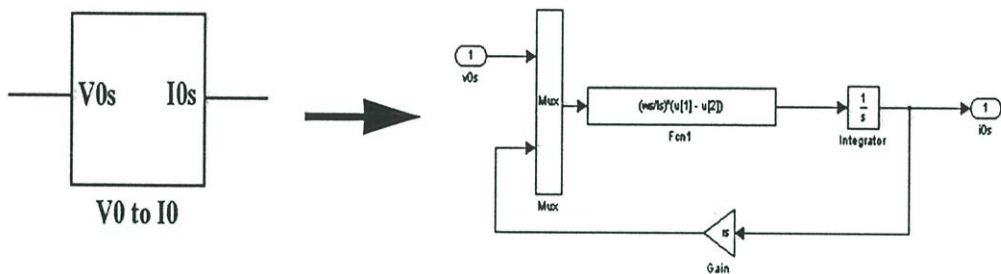


รูปที่ 3.10 แบบจำลองการแปลงกระแส qd0 เป็นกระแส 3 เฟส

3.3.4 กระแส Zero sequence

การเขียนแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงสแตชันนารีเมื่อพิจารณาที่สมการกระแส zero sequence การทำการเขียนแบบจำลองกระแส zero sequence โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์นั้นเพื่อนำไปใช้ร่วมกับแบบจำลองการแปลงกระแส qd0 เป็นกระแสสามเฟสด้านสเตเตอร์ ซึ่งจะมีสมการและแบบจำลองดังนี้

$$i_{0s} = \frac{\omega_b}{x_{ls}} \int \{V_{0s} - i_{0s}r_s\} dt \tag{3.35}$$



รูปที่ 3.11 แบบจำลองกระแส Zero sequence

3.3.5 กระแส qd0 และแรงบิด

การเขียนแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงสแตชันนารีเมื่อพิจารณาที่สมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ในส่วนนี้จะเป็นการเขียนแบบจำลองที่มีส่วนประกอบของกระแส q ทางด้านสเตเตอร์และกระแส d ทางด้านสเตเตอร์กับกระแส q ทางด้านโรเตอร์และกระแส d ทางด้านโรเตอร์ และส่วนของแรงบิดกับความถี่เชิงมุมของโรเตอร์ ซึ่งจะมีสมการและแบบจำลองดังนี้

$$i_{ds} = \frac{R_s L_r i_{ds} - \omega_r L_m^2 i_{qs} - R_r L_m i_{dr} - \omega_r L_r L_m i_{qr} - L_r V_{ds}}{a_0} \tag{3.36}$$

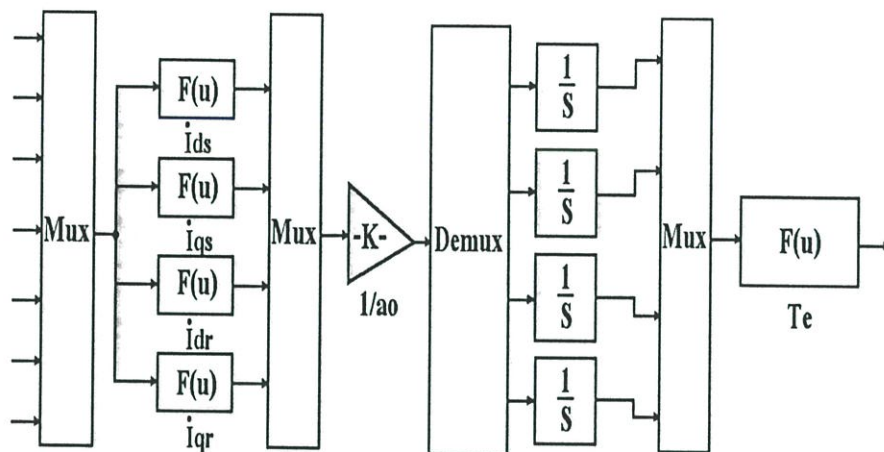
$$i_{qs} = \frac{\omega_r L_m^2 i_{ds} + R_s L_r i_{qs} + \omega_r L_r L_m i_{dr} - R_r L_m i_{qr} - L_r V_{qs}}{a_0} \tag{3.37}$$

$$i_{dr} = -\frac{R_s L_m i_{ds} - \omega_r L_m L_s i_{qs} - R_r L_s i_{dr} - \omega_r L_r L_s i_{qr} - L_m V_{ds}}{a_0} \tag{3.38}$$

$$i_{qr} = -\frac{\omega_r L_m L_s i_{ds} + R_s L_m i_{qs} + \omega_r L_r L_s i_{dr} - R_r L_s i_{qr} - L_m V_{qs}}{a_0} \tag{3.39}$$

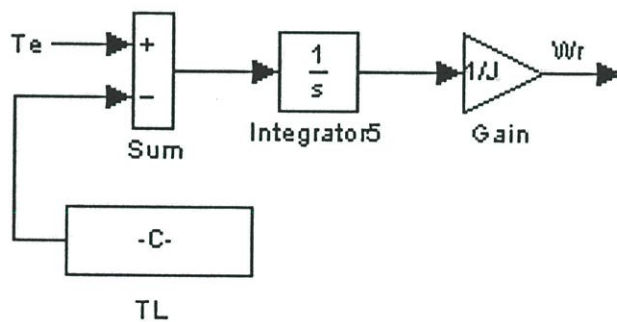
$$a_0 = L_m^2 - L_r L_s \tag{3.40}$$

$$T_e = 1.5 p L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (3.41)$$



รูปที่ 3.12 แบบจำลองแรงบิด T_e กับกระแส qd ทางด้านสเตเตอร์และทางด้าน โรเตอร์

$$\omega_r = \frac{1}{J} \int (T_e - T_L) . dt \quad (3.42)$$



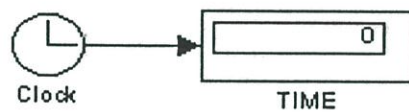
รูปที่ 3.13 แบบจำลองแรงบิด T_L และ ω_r

3.3.6 ส่วนประกอบที่ช่วยในการทำงานของแบบจำลอง

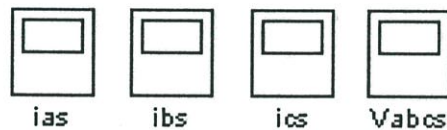
ทั้งนี้การเขียนแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะสมบูรณ์ได้ต้องมีส่วนประกอบที่จะช่วยการทำงานในส่วนต่างๆของการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะประกอบด้วย ส่วนของการป้อนข้อมูลลงสู่แบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ส่วนของการจับเวลาในการทำงานของแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และส่วนของการจับสัญญาณของแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.14 แบบจำลองการป้อนข้อมูล



รูปที่ 3.15 แบบจำลองการจับเวลาในการทำงาน



รูปที่ 3.16 แบบจำลองการจับสัญญาณ

บทที่ 4

วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

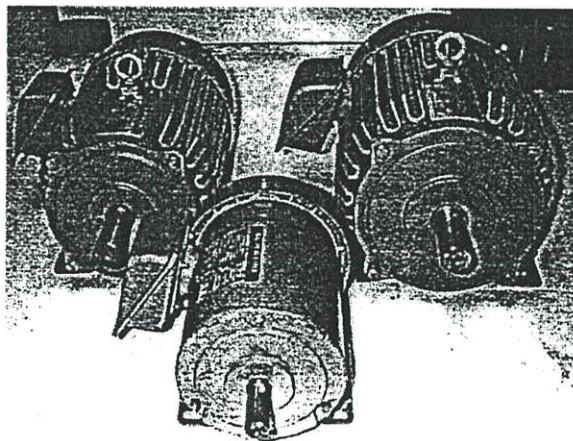
วิธีการทดสอบของวิทยานิพนธ์นี้จะทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธี Direct on Line Starting โดยการทดสอบจะทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก, 380 โวลต์, 50 เฮิรต์ ซึ่งจะทำการทดสอบที่สภาวะไม่มีภาระทางกลกับมีภาระทางกล และในส่วนของผลการทดสอบจะเป็นการเปรียบเทียบกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์กับผลที่ได้จากการทดสอบและจากงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในต่างประเทศ [2, 3]

4.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์และเครื่องมือการทดสอบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์จะมีอยู่ด้วยกันหลายส่วน ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะอุปกรณ์และเครื่องมือบางอย่างเท่านั้น โดยอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบจะมีดังต่อไปนี้

4.2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

วิทยานิพนธ์นี้มีมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการทดสอบซึ่งเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกสร้างขึ้นโดยอ้างอิงมาตรฐาน JIS C4004 เป็นมอเตอร์ประเภท totally enclosed fan cool (TEFC) โดยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้มีขนาด 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก, 380 โวลต์, 50 เฮิรต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

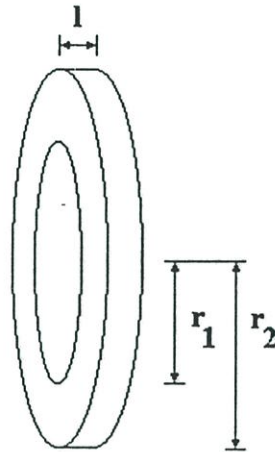


รูปที่ 4.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า

4.2.2 มูเล่

การทดสอบกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะมีภาระทางกลจำเป็นที่จะต้องมียุปกรณ์ช่วยในการทดสอบ ซึ่งอุปกรณ์ที่ช่วยในการทดสอบกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะมีภาระทางกลคือมูเล่ นั่นเอง โดยที่มูเล่ นั้นจะต่ออยู่ที่ส่วนแกนทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งการคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมูเล่และโครงสร้างของมูเล่ที่มีอยู่ 2 ขนาด จะมีรายละเอียดดังนี้

4.2.2.1 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมูเล่



รูปที่ 4.2 รูปทรงที่ใช้ในการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมูเล่

จากรูปที่ 4.2 สมการที่ใช้คำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมูเล่มีดังนี้

$$J = \frac{\pi}{2} \rho l (r_2^4 - r_1^4) \quad (4.1)$$

โดยที่ J = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

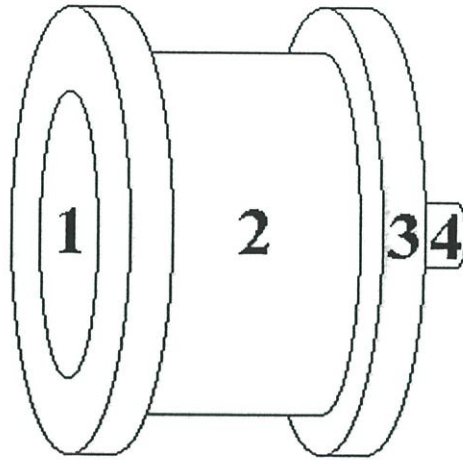
ρ = ความหนาแน่นของเนื้อสารที่ใช้ทำมูเล่ (kg/m^3)

r_1, r_2 = รัศมีภายในและภายนอกของมูเล่ (m)

l = ความหนาของมูเล่ (m)

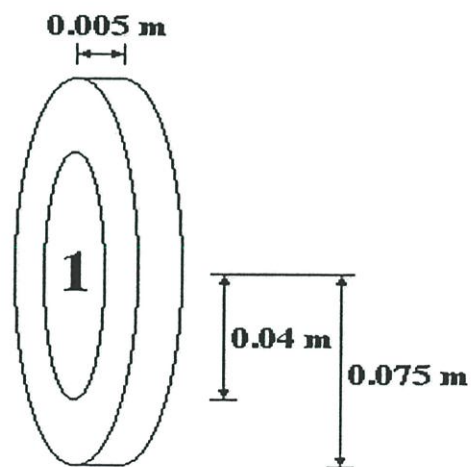
4.2.2.2 มูเล่ขนาดเล็ก

มูเล่ขนาดเล็กเป็นมูเล่ที่ใช้ในการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 HP ซึ่งมีส่วนประกอบอยู่ 4 ส่วนดังต่อไปนี้



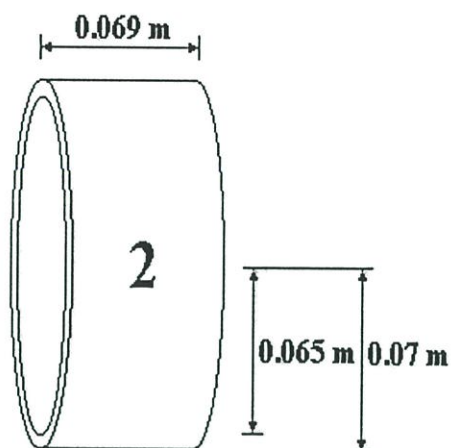
รูปที่ 4.3 มูเล่ขนาดเล็กที่ใช้ในการทดสอบ

1) ขนาดของส่วนประกอบส่วนที่ 1



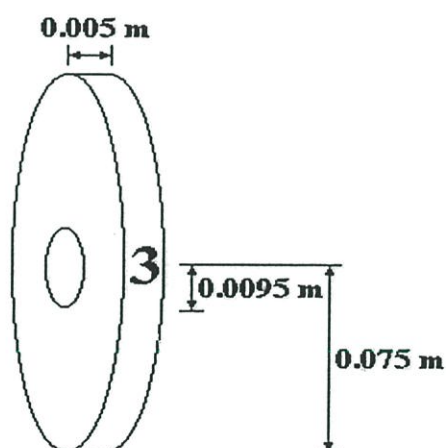
รูปที่ 4.4 ส่วนที่ 1 ของมูเล่ขนาดเล็ก

2) ขนาดของส่วนประกอบส่วนที่ 2



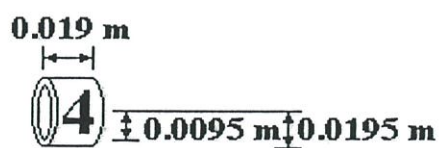
รูปที่ 4.5 ส่วนที่ 2 ของมูเล่ขนาดเล็ก

3) ขนาดของส่วนประกอบส่วนที่ 3



รูปที่ 4.6 ส่วนที่ 3 ของมูเล่ขนาดเล็ก

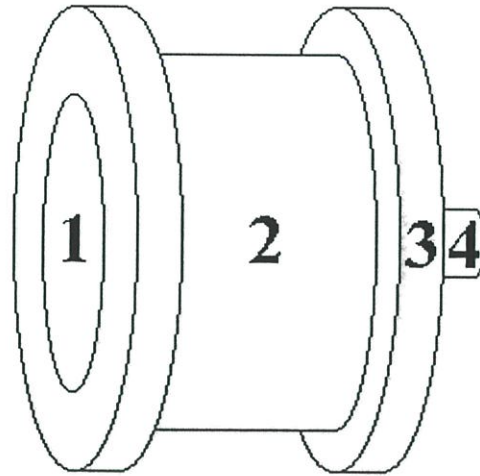
4) ขนาดของส่วนประกอบส่วนที่ 4



รูปที่ 4.7 ส่วนที่ 4 ของมูเล่ขนาดเล็ก

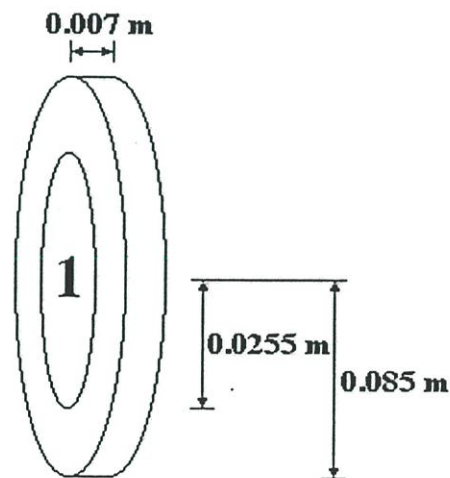
4.2.2.3 มวลขนาดใหญ่

มวลขนาดใหญ่เป็นมวลที่ใช้ในการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 HP, 5 HP ซึ่งมีส่วนประกอบอยู่ 4 ส่วนดังต่อไปนี้



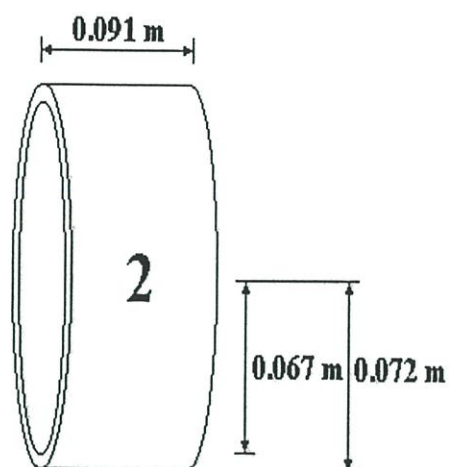
รูปที่ 4.8 มวลขนาดใหญ่ที่ใช้ในการทดสอบ

1) ขนาดของส่วนประกอบส่วนที่ 1



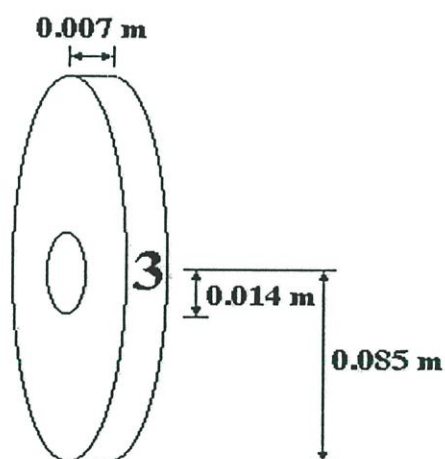
รูปที่ 4.9 ส่วนที่ 1 ของมวลขนาดใหญ่

2) ขนาดของส่วนประกอบส่วนที่ 2



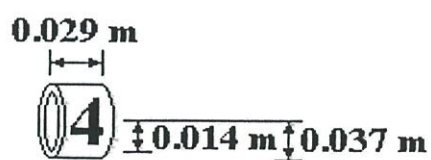
รูปที่ 4.10 ส่วนที่ 2 ของมูเล่ขนาดใหญ่

3) ขนาดของส่วนประกอบส่วนที่ 3



รูปที่ 4.11 ส่วนที่ 3 ของมูเล่ขนาดใหญ่

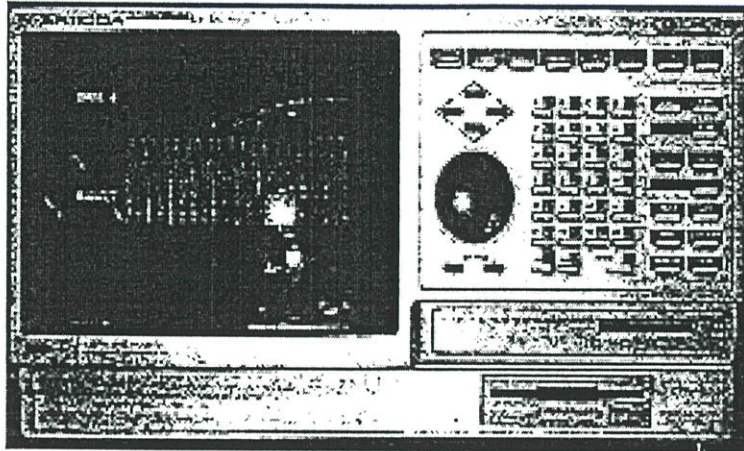
4) ขนาดของส่วนประกอบส่วนที่ 4



รูปที่ 4.12 ส่วนที่ 4 ของมูเล่ขนาดใหญ่

4.2.3 ANALYZING RECORDER

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลแรงคั่นขณะเริ่มต้นหมุน, กระแสขณะเริ่มต้นหมุน และ เวลาขณะเริ่มต้นหมุนที่ใช้ในการทดสอบคือ ANALYZING RECORDER ของ YOKOGAWA รุ่น AR1100A ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ANALYZING RECORDER ที่ใช้ในการทดสอบ

4.3 ค่าต่างๆที่ใช้ในแบบจำลอง

การจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้แบบจำลอง การรวมกลุ่มของวิทยานิพนธ์นี้จะต้องมีการใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในแบบจำลอง ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการดังนี้

$$S_{ag} = \frac{-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha} \quad (4.2)$$

$$\omega_{r,ag} = (1 - S_{ag})\omega_s \quad (4.3)$$

$$T_{ag} = \frac{P_{ag}}{(1 - S_{ag})\omega_s} \quad (4.4)$$

$$J_{ag} = \frac{2H_{ag}P_{ag}}{\omega_s^2} \quad (4.5)$$

S_{ag} = ค่าสลิปของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

T_{ag} = แรงบิดของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

J_{ag} = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

- P_{ag} = พิกัดกำลังเอาต์พุทของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 $\omega_{r,ag}$ = ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 ω_s = ความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส
 H_{ag} = สมการที่ 3.23
 α = สมการที่ 3.27
 β = สมการที่ 3.28
 γ = สมการที่ 3.29

ตารางที่ 4.1 พิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

พิกัด กำลัง (HP)	พิกัด แรงดัน (V)	พิกัด กระแส (A)	พิกัด ความเร็วรอบ (rpm)
1	220/380	3.4/2.0	1400
3	220/380	8.7/5.0	1420
5	220/380	13.7/7.9	1420

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำและกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

พิกัดกำลัง (HP)	R_s (Ω)	R_r (Ω)	X_s (Ω)	X_r (Ω)	X_M (Ω)
1	10.500	10.1312	9.8056	9.8056	216.6351
3	3.780	3.2899	3.8575	3.8575	81.1024
5	2.054	1.9645	2.0896	2.0896	55.2515
3+1	2.780	2.506	2.768	2.768	59.01
5+1	1.736	1.631	1.723	1.723	44.03
5+3	1.346	1.218	1.355	1.355	32.88

ตารางที่ 4.3 ค่าสลิปของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

พิกัด กำลัง (HP)	ค่าสลิปที่ พิกัดแรงบิด (%)	ค่าสลิปที่ 1/2 ของพิกัดแรงบิด (%)	ค่าสลิปที่ 1/4 ของพิกัดแรงบิด (%)
3+1	0.1491	0.1510	0.1547
5+1	0.1555	0.1576	0.1618
5+3	0.1477	0.1496	0.1534

ตารางที่ 4.4 ค่าความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

พิกัด กำลัง (HP)	ค่าความเร็วเชิงมุม ของโรเตอร์ที่ พิกัดแรงบิด (rad/s)	ค่าความเร็วเชิงมุม ของโรเตอร์ที่ 1/2 ของพิกัดแรงบิด (rad/s)	ค่าความเร็วเชิงมุม ของโรเตอร์ที่ 1/4 ของพิกัดแรงบิด (rad/s)
3+1	156.8454	156.8424	156.8366
5+1	156.8353	156.8320	156.8254
5+3	156.8476	156.8446	156.8386

ตารางที่ 4.5 ค่าแรงบิดของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

พิกัด กำลัง (HP)	พิกัด แรงบิด (N-m)	1/2 ของพิกัด แรงบิด (N-m)	1/4 ของพิกัด แรงบิด (N-m)
3+1	19.0251	9.5127	4.7565
5+1	28.5395	14.2700	7.1353
5+3	38.0497	19.0252	9.5130

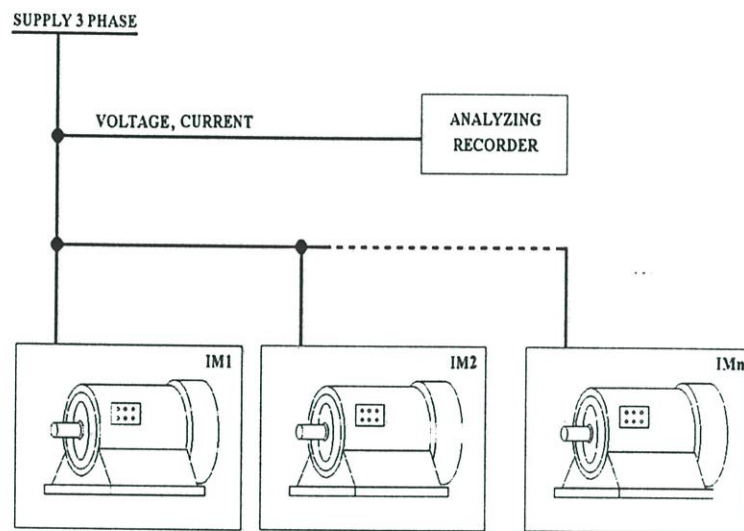
ตารางที่ 4.6 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3 HP+1 HP (kg-m ²)	5 HP+1 HP (kg-m ²)	5 HP+3 HP (kg-m ²)	มูลค่าขนาดเล็ก (kg-m ²)	มูลค่าขนาดใหญ่ (kg-m ²)
0.0084	0.0129	0.0157	0.0077	0.0217

4.4 วิธีการทดสอบ

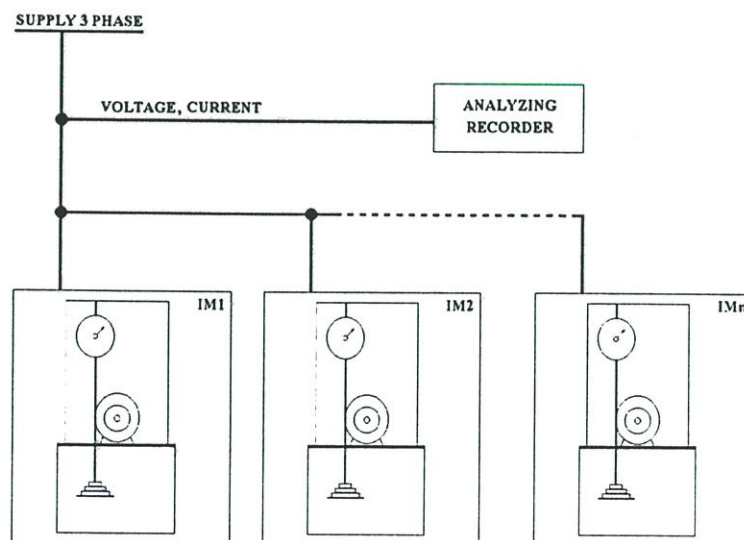
การทดสอบของวิทยานิพนธ์จะมีการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะไม่มีภาระทางกลและสภาวะมีภาระทางกล โดยการทดสอบสภาวะมีภาระทางกลจะทำการทดสอบที่ $1/2$ และ $1/4$ ของพิกัดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งวิธีการทดสอบจะมีดังต่อไปนี้

4.4.1 วิธีการทดสอบกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะไม่มีภาระทางกล



รูปที่ 4.14 การทดสอบกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะไม่มีภาระทางกล

4.4.2 วิธีการทดสอบกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะมีภาระทางกล



รูปที่ 4.15 การทดสอบกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะมีภาระทางกล

จากรูปที่ 4.15 ในการคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการทดสอบภาระของมอเตอร์นั้นสามารถคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์ได้ดังนี้

$$T = (w1 - w2) \times g \times r \quad (4.6)$$

โดยที่ T = แรงบิดของมอเตอร์ (N-m)

$w1$ = มวลภาระที่ทดสอบ (kg)

$w2$ = ค่าแรงที่อ่านได้จากตาชั่ง (kg)

r = รัศมีของมู่เก้ (m)

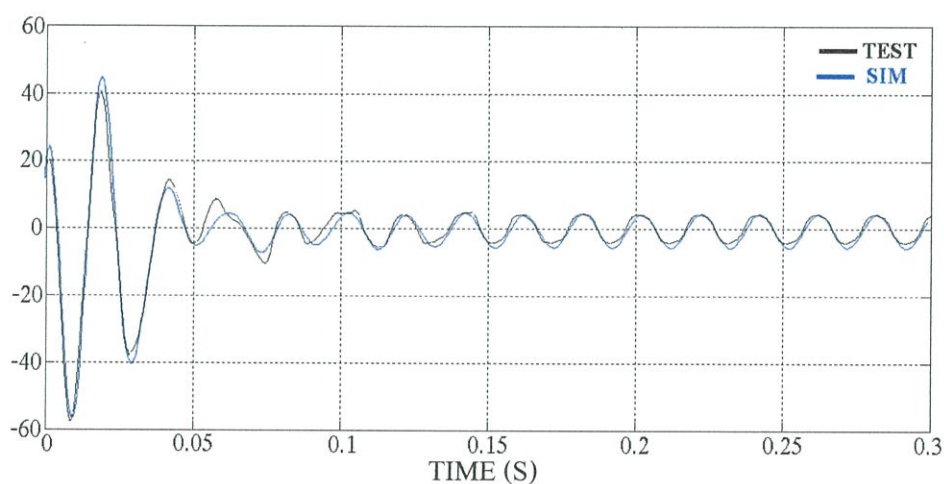
g = ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง โลกมีค่าเท่ากับ $9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$

4.5 ผลการทดสอบ

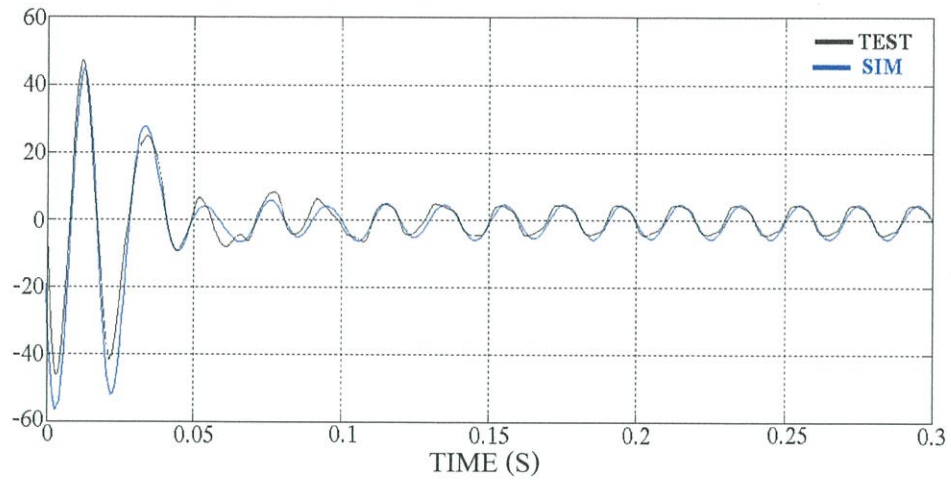
การทดสอบจะทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายขนาดด้วยกัน โดยจะเปรียบเทียบกันระหว่างผลการทดสอบที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์กับผลการทดสอบที่ได้จากการวัดจริงและจากบทความ [2, 3] ซึ่งจะเปรียบเทียบกันในสถานะไม่มีภาระทางกลกับสถานะมีภาระทางกล

4.5.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะไม่มีภาระทางกล (ไม่มีมู่เก้)

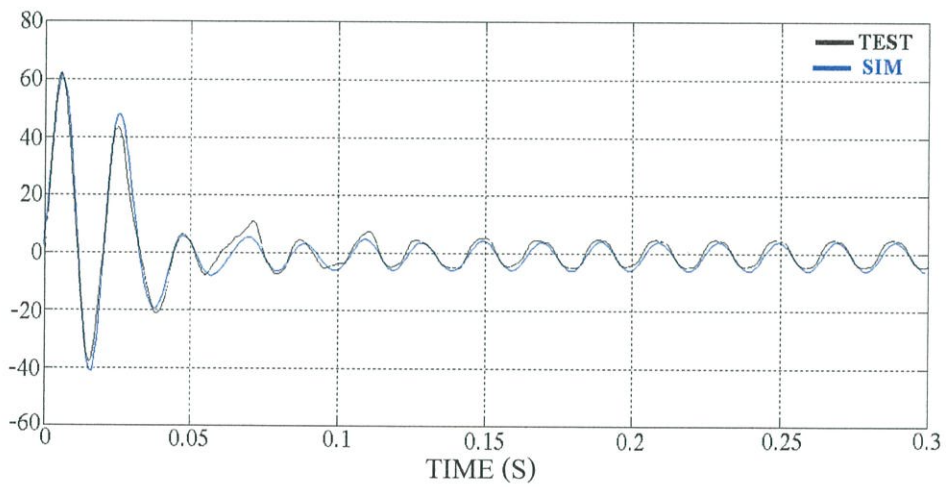
4.5.1.1 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 HP และ 1 HP



รูปที่ 4.16 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A

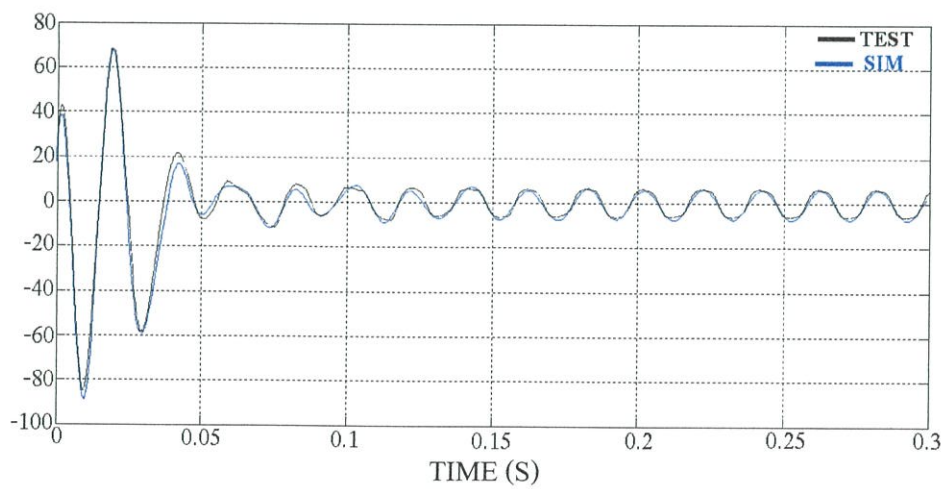


รูปที่ 4.17 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส B

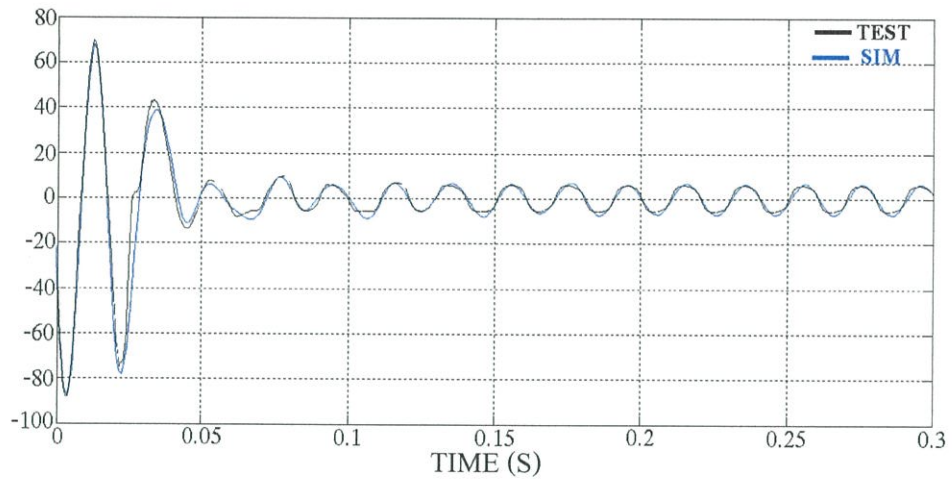


รูปที่ 4.18 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส C

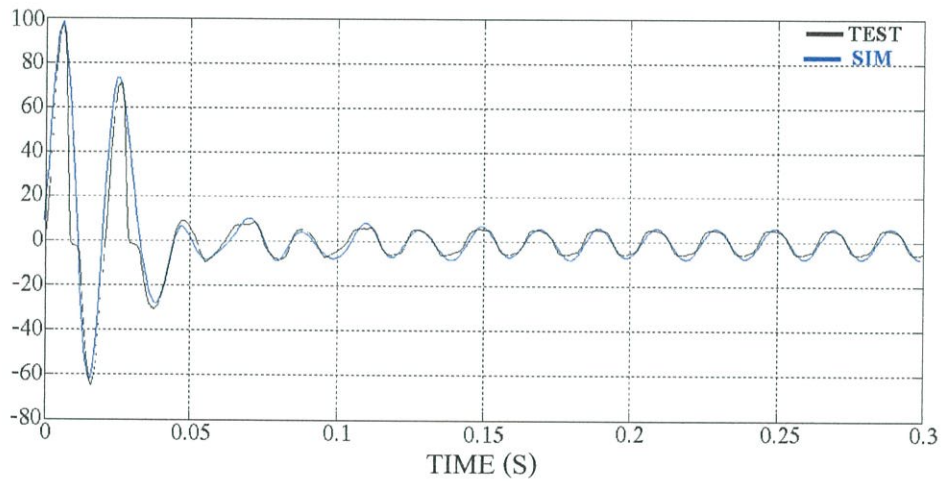
4.5.1.2 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 HP และ 1 HP



รูปที่ 4.19 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A

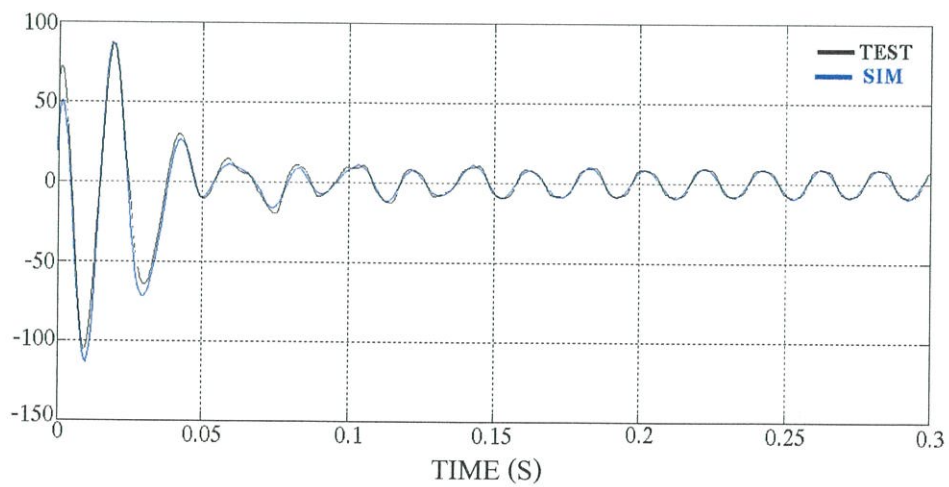


รูปที่ 4.20 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส B

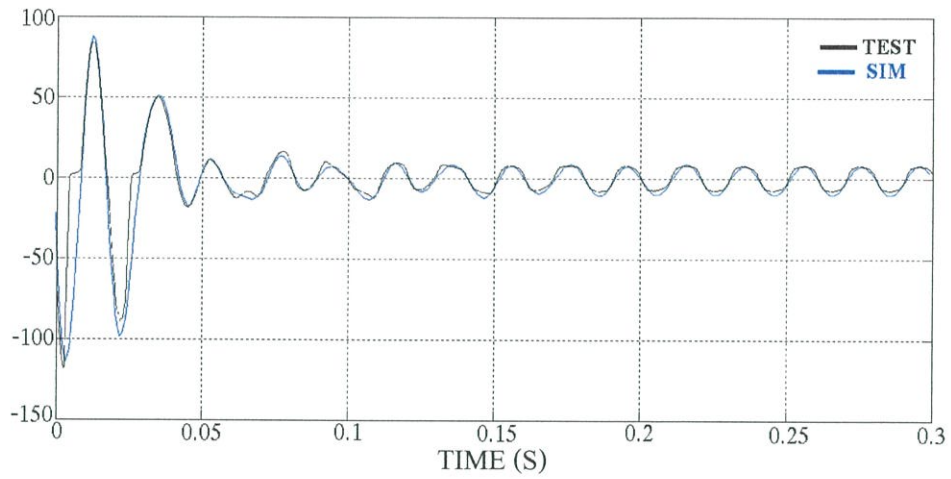


รูปที่ 4.21 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส C

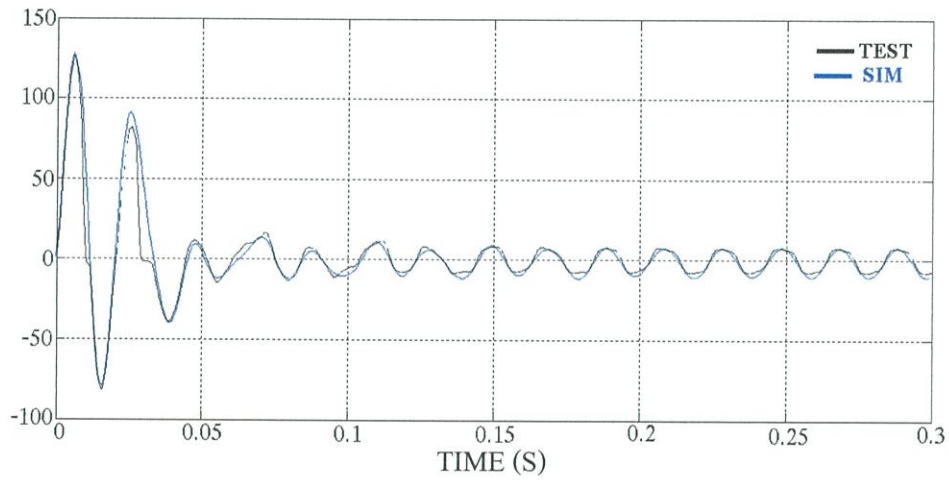
4.5.1.3 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 HP และ 3 HP



รูปที่ 4.22 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A

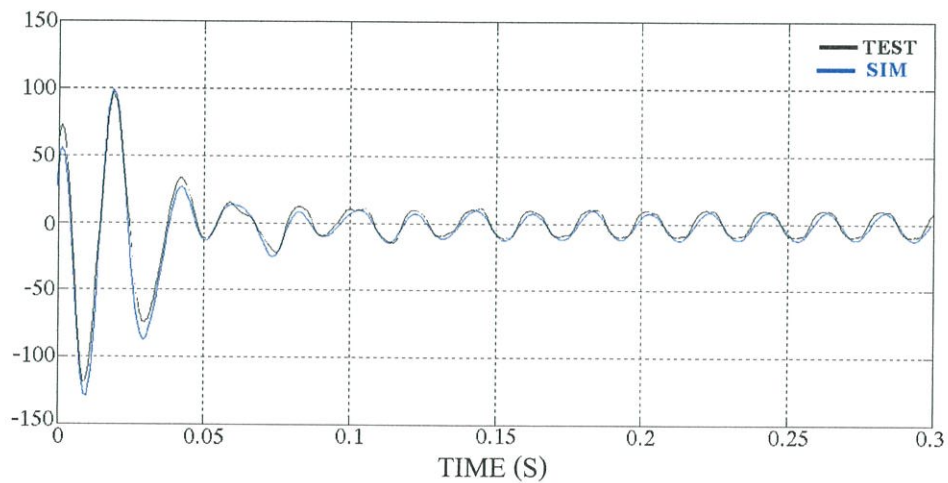


รูปที่ 4.23 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส B

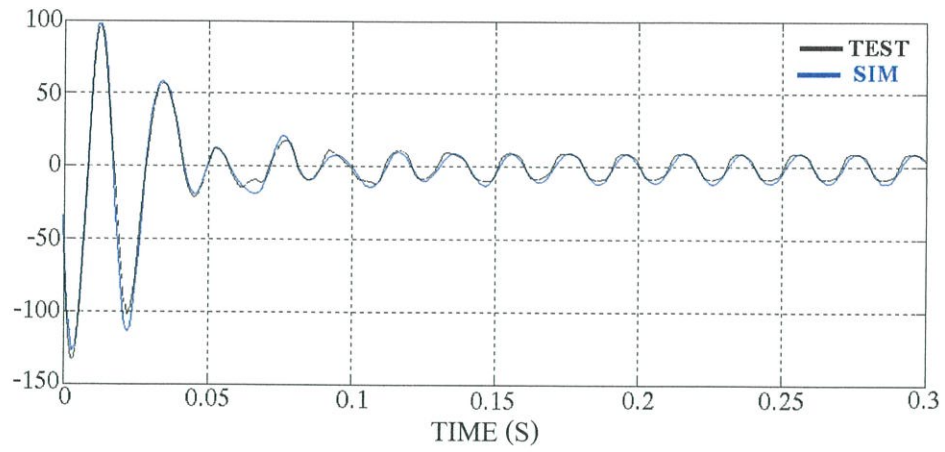


รูปที่ 4.24 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส C

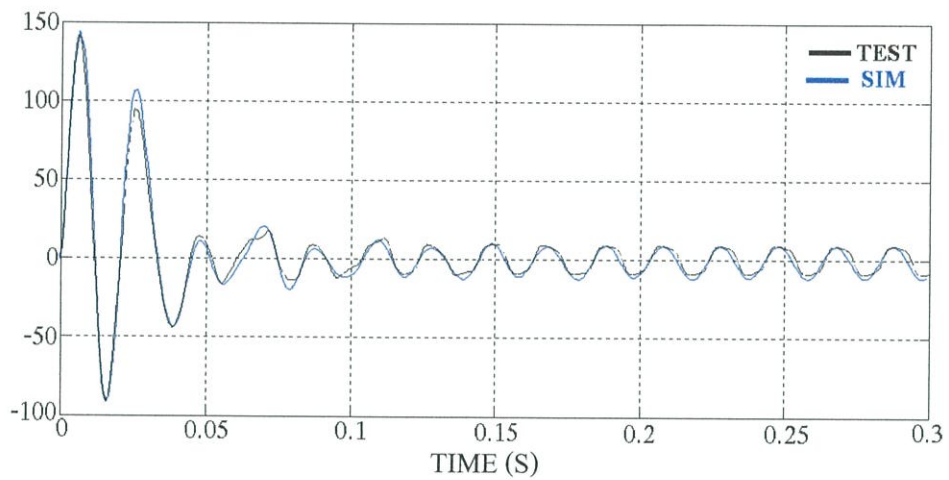
4.5.1.4 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 HP, 3 HP และ 1 HP



รูปที่ 4.25 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A



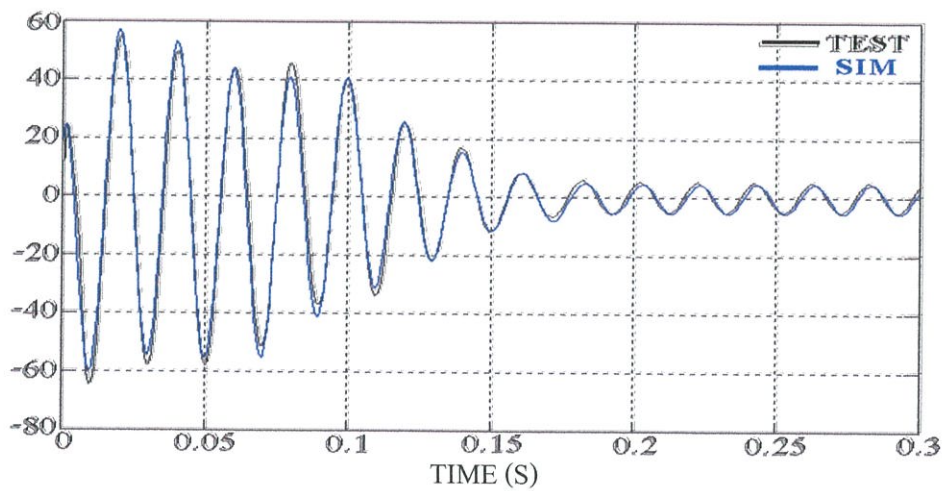
รูปที่ 4.26 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส B



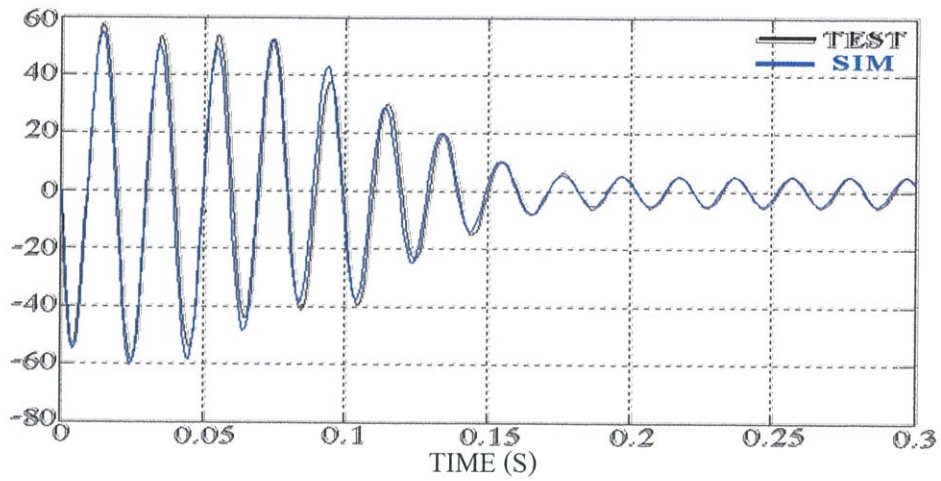
รูปที่ 4.27 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส C

4.5.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะไม่มีภาระทางกล (มีมุ่ล)

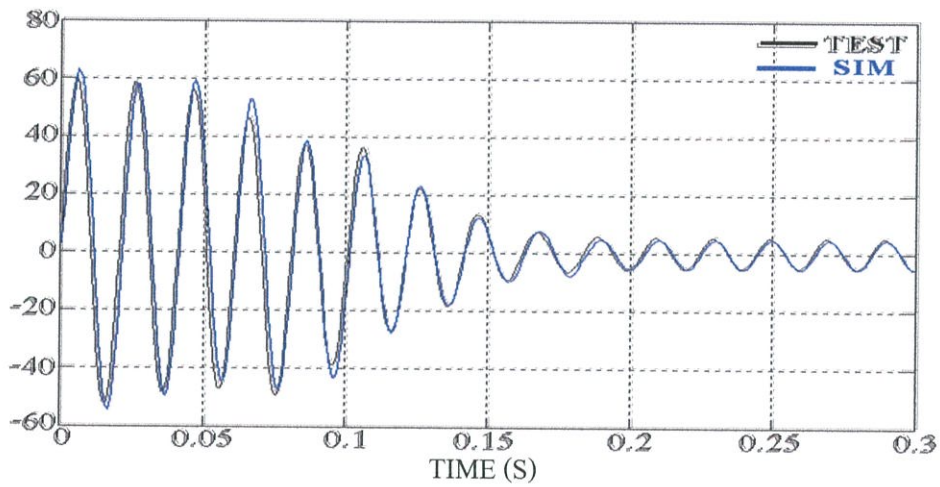
4.5.2.1 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 HP และ 1 HP



รูปที่ 4.28 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A

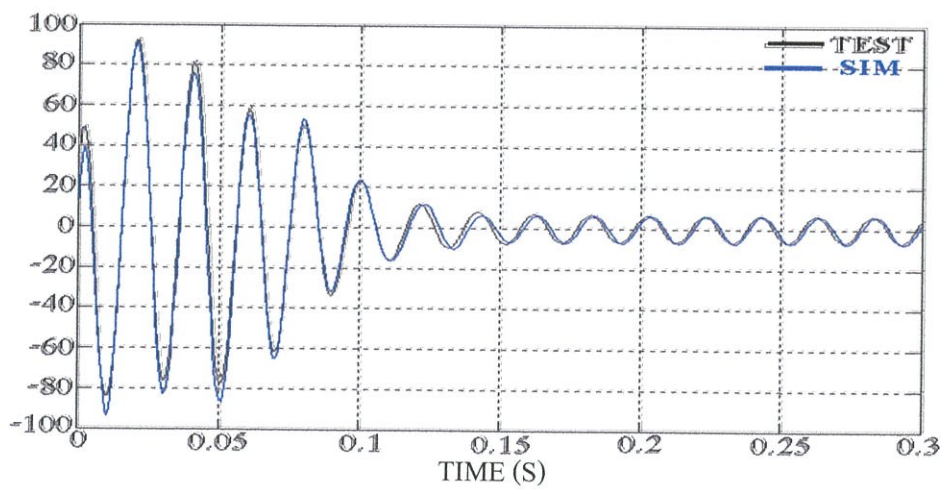


รูปที่ 4.29 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส B

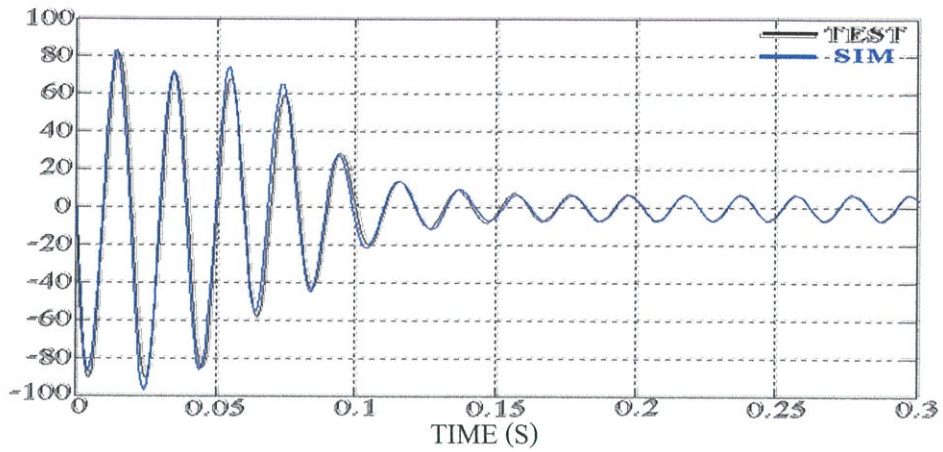


รูปที่ 4.30 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส C

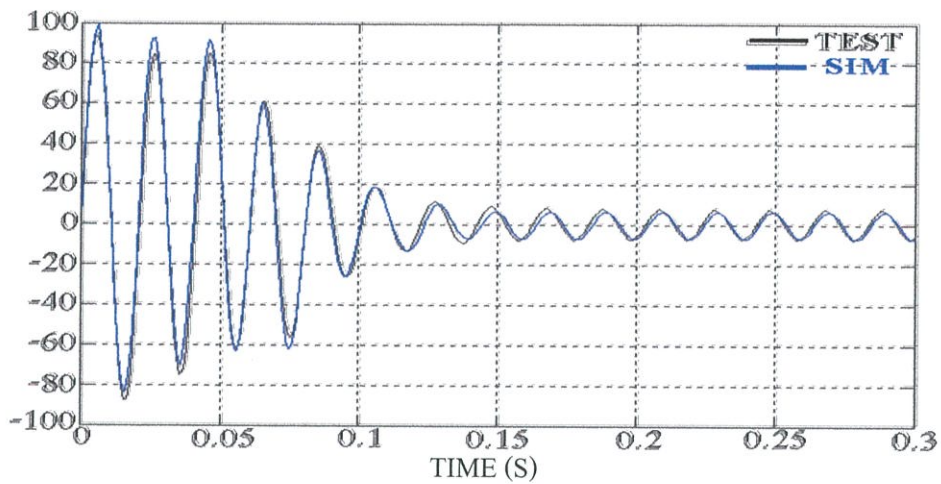
4.5.2.2 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 HP และ 1 HP



รูปที่ 4.31 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A



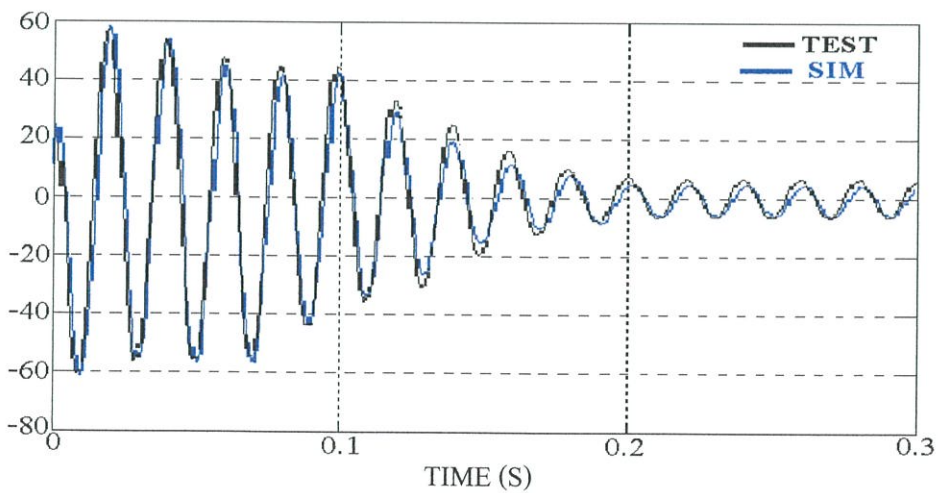
รูปที่ 4.32 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส B



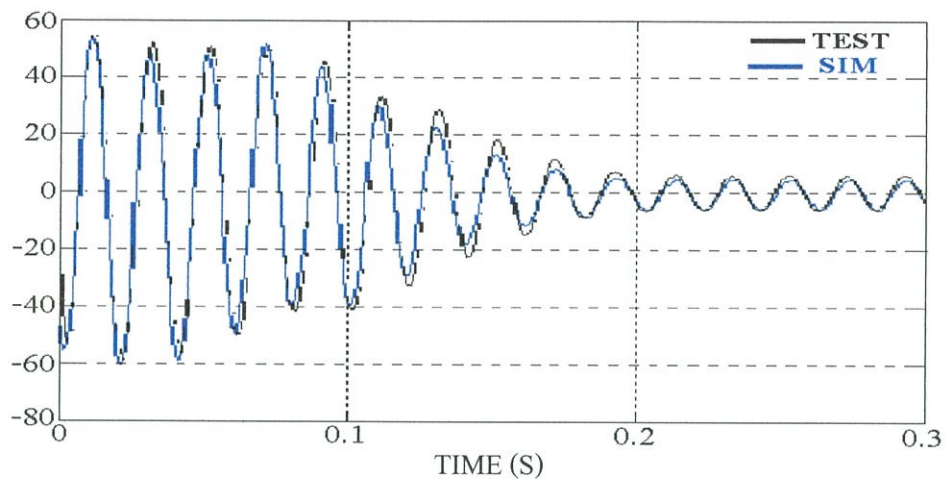
รูปที่ 4.33 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส C

4.5.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะมีภาระทางกล (1/4 ของพิกัดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ)

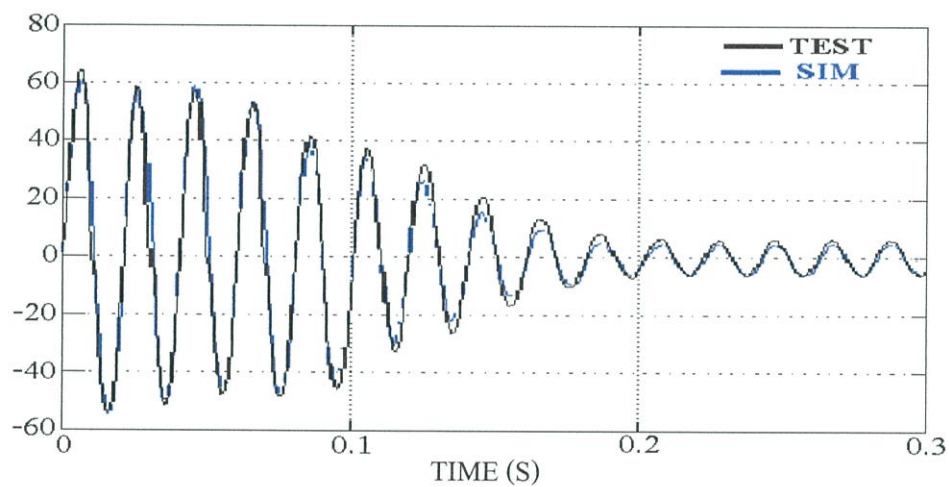
4.5.3.1 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 HP และ 1 HP



รูปที่ 4.34 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A

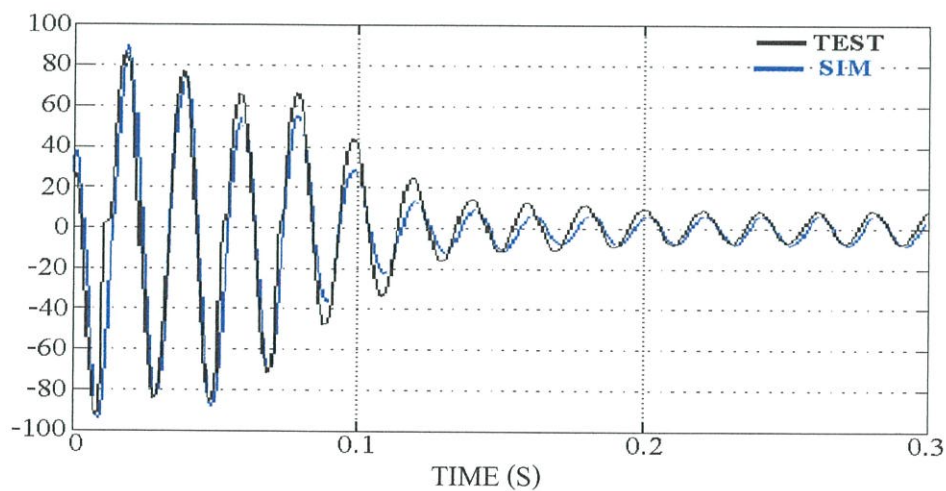


รูปที่ 4.35 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส B

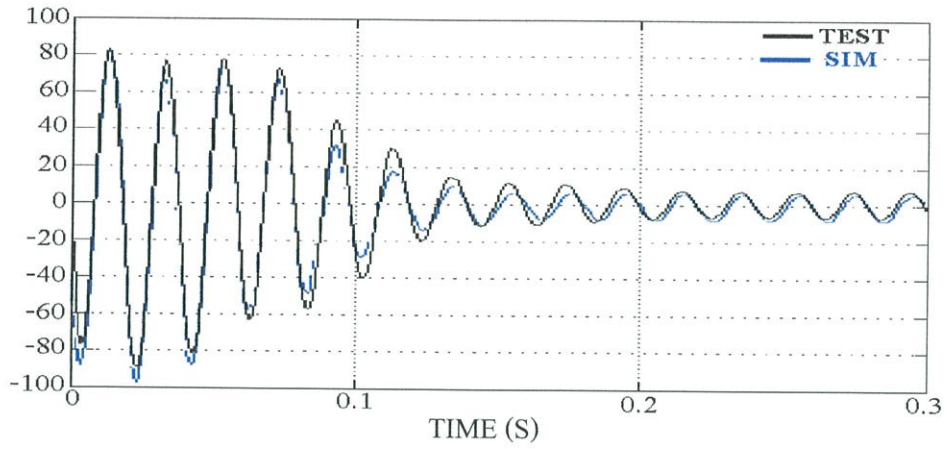


รูปที่ 4.36 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส C

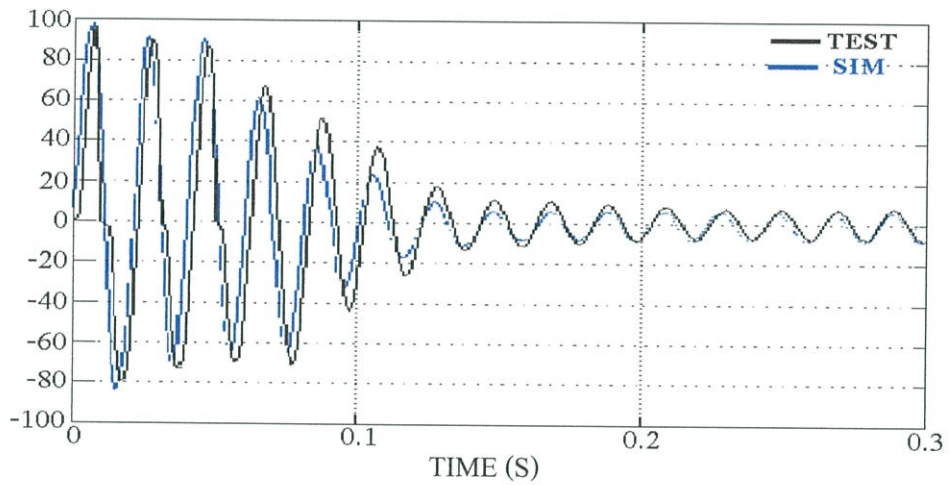
4.5.3.2 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 HP และ 1 HP



รูปที่ 4.37 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A



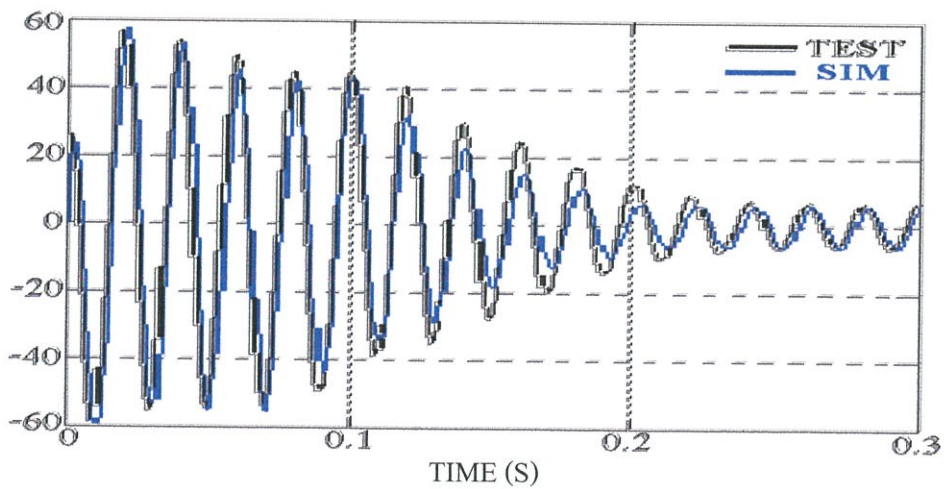
รูปที่ 4.38 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส B



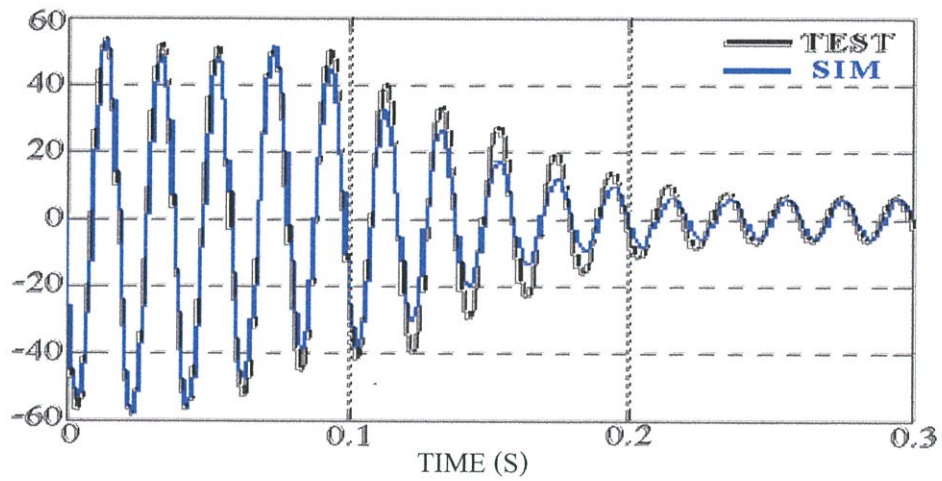
รูปที่ 4.39 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส C

4.5.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะมีภาระทางกล (1/2 ของพิกัดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ)

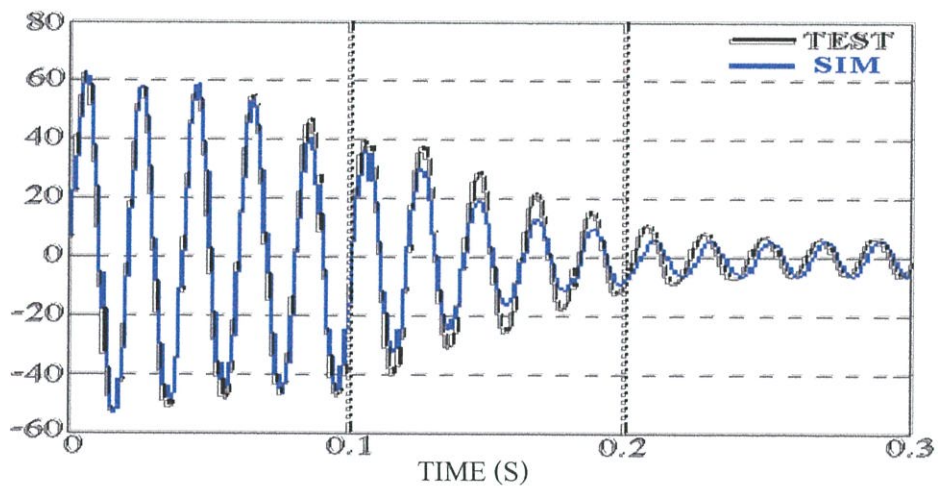
4.5.4.1 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 HP และ 1 HP



รูปที่ 4.40 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A

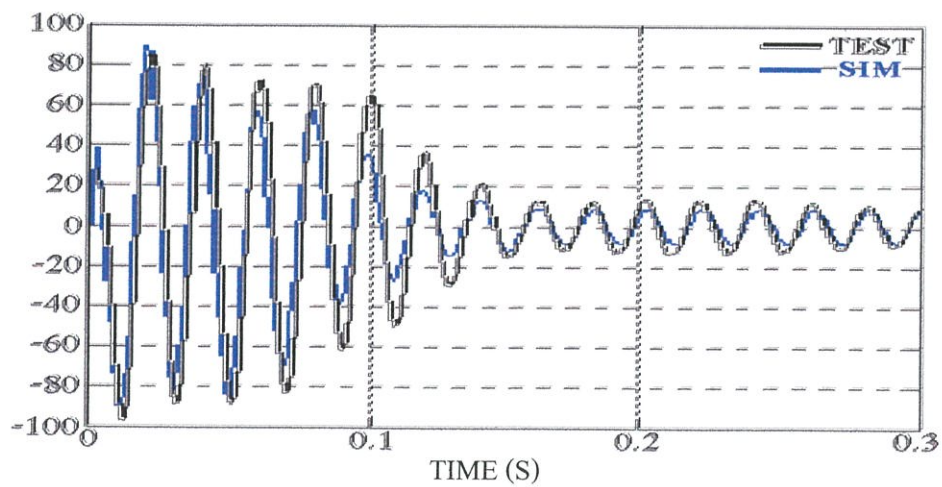


รูปที่ 4.41 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส B

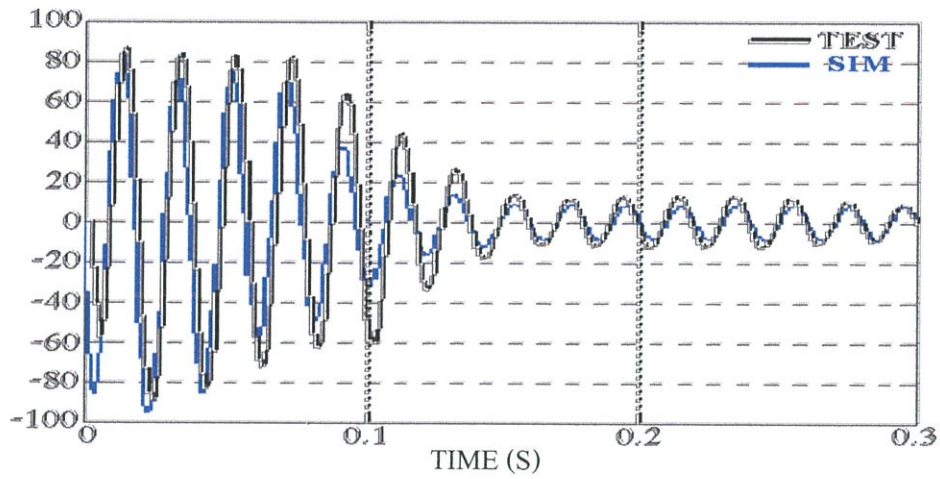


รูปที่ 4.42 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส C

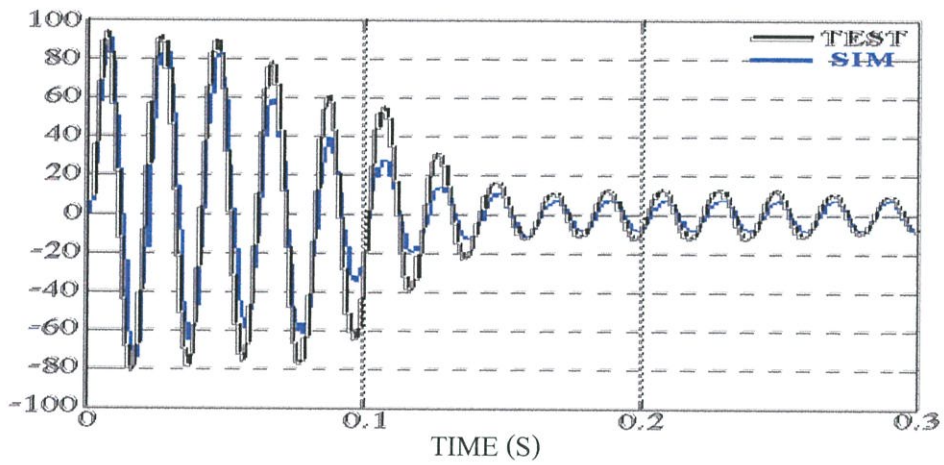
4.5.4.2 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 HP และ 1 HP



รูปที่ 4.43 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A



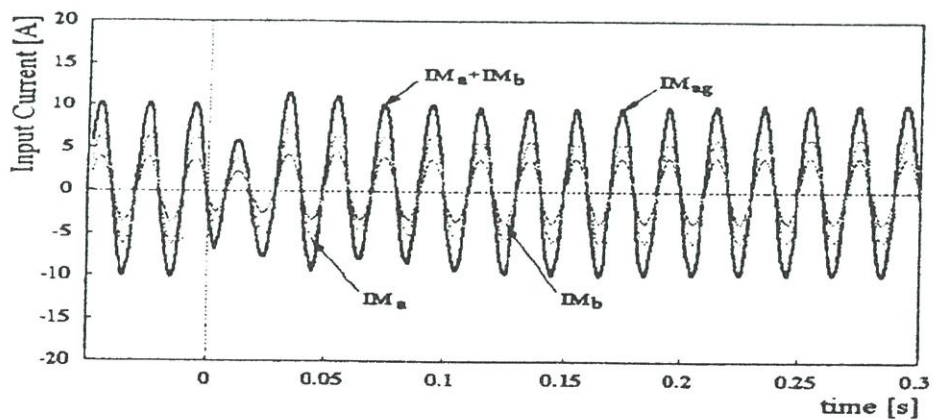
รูปที่ 4.44 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส B



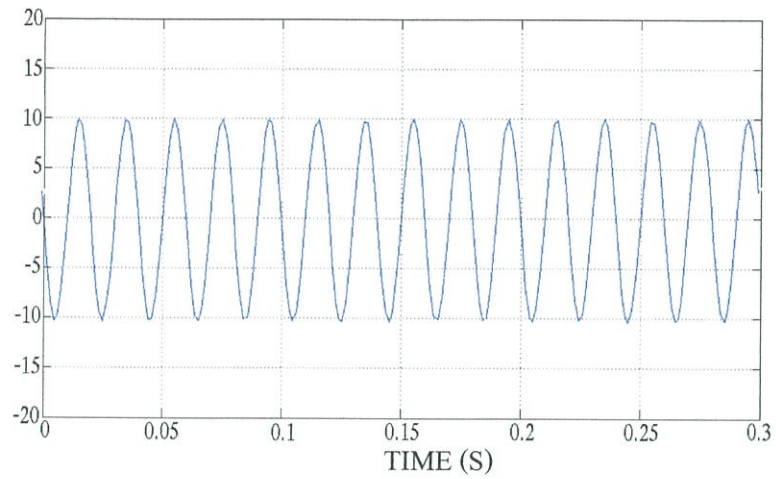
รูปที่ 4.45 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส C

4.5.5 มอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะมีภาระทางกลโดยเปรียบเทียบกับ [2]

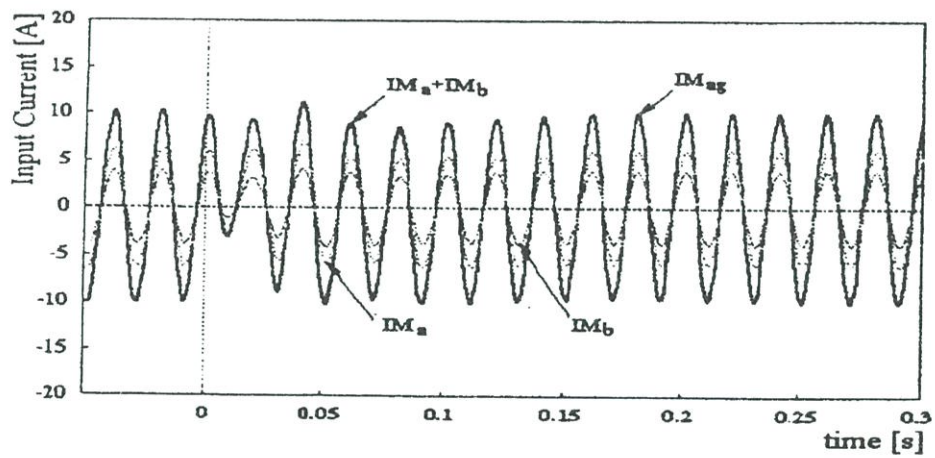
4.5.5.1 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 HP และ 3 HP ที่สภาวะ Steady-state



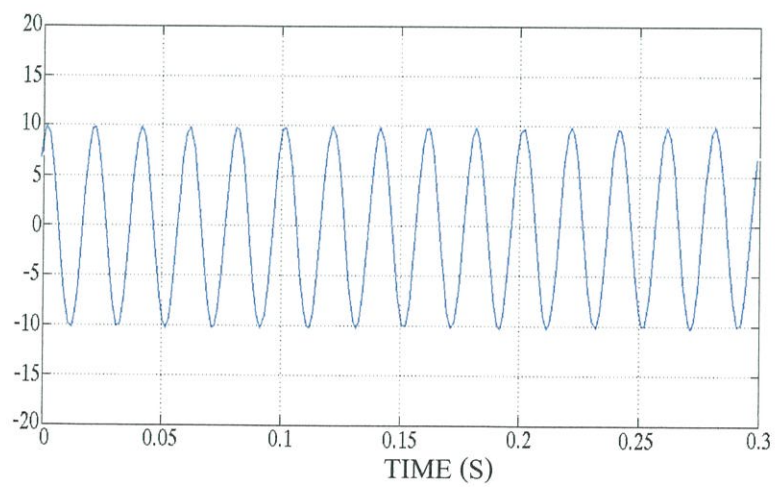
รูปที่ 4.46 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A (จากบทความ [2])



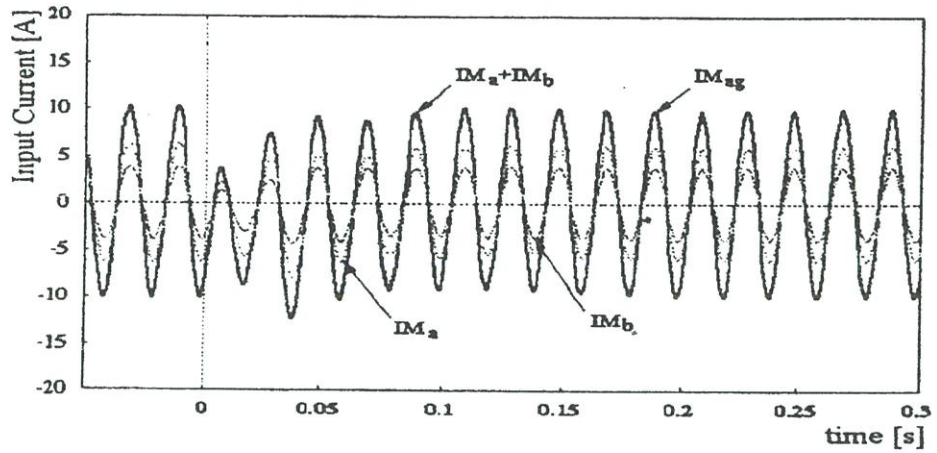
รูปที่ 4.47 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A (จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์)



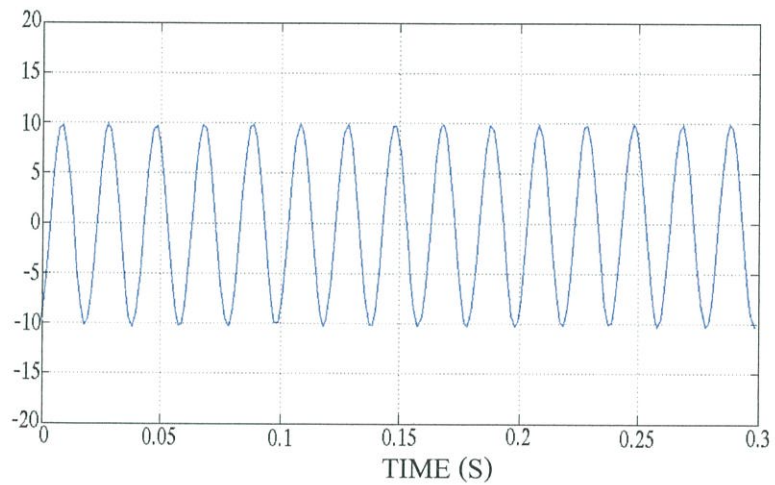
รูปที่ 4.48 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส B (จากบทความ [2])



รูปที่ 4.49 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส B (จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์)



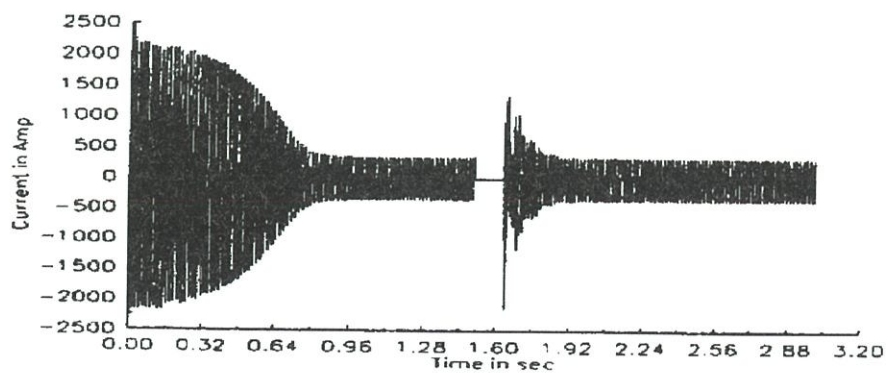
รูปที่ 4.50 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส C (จากบทความ [2])



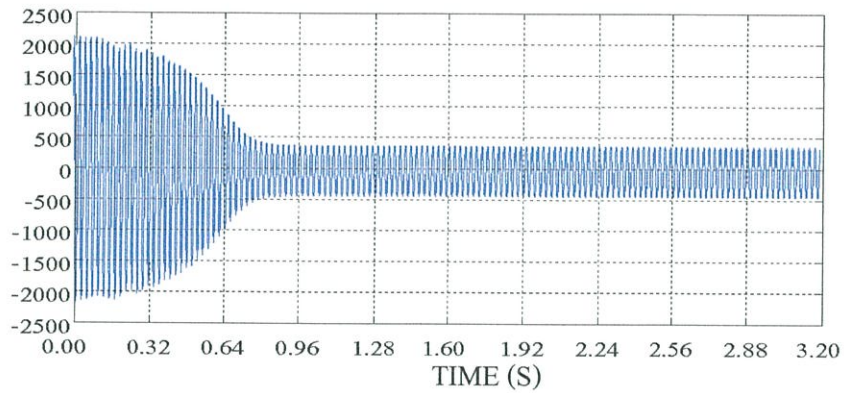
รูปที่ 4.51 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส C (จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์)

4.5.6 มอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะมีภาระทางกลโดยเปรียบเทียบกับ [3]

4.5.6.1 กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 HP, 15 HP, 30 HP, 50 HP และ 100 HP



รูปที่ 4.52 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A (จากบทความ [3])



รูปที่ 4.53 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนเฟส A (จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์)

4.6 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบสถานะไม่มีภาระทางกลผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์จะมีความคลาดเคลื่อนไปจากผลลัพธ์ที่ได้มาจากการวัดน้อยกว่าที่สถานะมีภาระทางกล (เปรียบเทียบจากผลการทดสอบหัวข้อ 4.5.2 หัวข้อ 4.5.3 และหัวข้อ 4.5.4) เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดที่สถานะมีภาระทางกลจะทดสอบด้วยวิธีใส่ภาระให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยตุ้มน้ำหนัก ซึ่งวิธีการนี้จะมีส่วนของสปริงเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย จึงอาจทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดมีความคลาดเคลื่อนไป

ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของวิทยานิพนธ์นี้จะมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้มาจากการวัด (เปรียบเทียบได้จากส่วนของผลการทดสอบหัวข้อ 4.5) ซึ่งผลที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่น่าเสนอก็ยังมีความน่าเชื่อถือพอที่จะสามารถนำไปใช้ในการทำนายการทำงานในช่วงขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อร่วมกันอยู่ได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ระบบไฟฟ้ากำลังของโรงงานอุตสาหกรรมและสถานประกอบการที่มีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวนมากส่วนใหญ่นั้นจะมีการต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดกันที่บัสเดียวกันอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นการที่จะทำการศึกษามอเตอร์เหนี่ยวนำจึงเป็นเรื่องที่สำคัญมากในระบบไฟฟ้ากำลังภายในโรงงานอุตสาหกรรมและสถานประกอบการที่มีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวนมาก แต่เนื่องจากการที่จะทำการศึกษามอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้ากำลังโดยตรงนั้นเป็นเรื่องยุ่งยากและอันตรายมากทำให้ต้องมีการใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มาช่วยในการศึกษาแทน เนื่องจากการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์นั้นค่อนข้างที่จะมีความปลอดภัยและสะดวกในการศึกษามอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้ากำลังมากกว่าที่จะทำการศึกษาโดยตรง

การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังภายในโรงงานอุตสาหกรรมและสถานประกอบการที่มีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวนมากจะมีการตั้งค่าการป้องกันเมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังเกิดการเสียหายขึ้น โดยเหตุการณ์ที่ทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังเกิดการเสียหายนั้นจะมีด้วยกันหลายแบบดังเช่น การเกิดฟ้าผ่า การเกิดกระแสลัดวงจรที่จุดต่างๆ การเกิดกระแสเกินเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำเริ่มต้นหมุน เป็นต้น ทำให้ต้องมีการศึกษาการตั้งค่าการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังขึ้น โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะ ได้ทำการศึกษาในเรื่องของการจำลองกระแสเริ่มต้นหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อเป็นประโยชน์ในการตั้งค่าการป้องกันการเกิดกระแสเกินเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำเริ่มต้นหมุน เนื่องจากว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำภายในโรงงานอุตสาหกรรมและสถานประกอบการที่มีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวนมาก จะเริ่มต้นหมุนพร้อมกันหลายๆ ตัวในเวลาเดียวกัน จึงทำให้กระแสขณะเริ่มต้นหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่าสูงมาก การที่ทำการศึกษาระแสขณะเริ่มต้นหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมและสถานประกอบการที่มีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวนมาก

วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเสมือนของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยได้ทำการพัฒนามาจากบทความ [2] จากนั้นทำการเปรียบเทียบลักษณะของกระแสไฟฟ้าขณะเริ่มต้นหมุนที่ไหลเข้าสู่กลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการทดสอบจริงและจากบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในต่างประเทศ [2, 3] กับผลจากแบบจำลองการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งถูกเขียนบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ผลลัพธ์ในวิทยานิพนธ์จะเป็นกรณีการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะทำการต่อโหลดและขณะที่ยังไม่มีการต่อโหลด

แบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำหัวข้อ 3.3 ของวิทยานิพนธ์นี้จะสร้างขึ้นมา โดยการนำสมการต่างๆจาก [11-17] มาทำการสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม MATLAB /SIMULINK ซึ่งจะมีการแบ่งเป็นส่วนต่างๆดังแสดงในหัวข้อ 3.3.1 - 3.3.7 และในส่วนของการ ป้อนข้อมูลต่างๆลงในแบบจำลองจะเป็นการป้อนข้อมูลโดยใช้ M-FILE ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้การใส่ ค่าต่างๆ ลงในแบบจำลองมีความสะดวกมากขึ้นเนื่องจากการป้อนข้อมูลโดยใช้ M-FILE วิธีการใส่ ค่าข้อมูลต่าง ๆ นั้นจะทำในส่วนของ M-FILE แล้วจึงป้อนค่าต่างๆลงแบบจำลอง ทำให้การป้อนข้อมูลต่างๆไม่ต้องทำการเขียนข้อมูลบนแบบจำลอง ซึ่งการเขียนข้อมูลบนแบบจำลองจะเป็นวิธีการที่ ยุ่งยากและอาจทำให้เกิดการผิดพลาดขึ้นได้

กรณีการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำภายในวิทยานิพนธ์นี้ จะมีการทดสอบขณะที่ทำการต่อโหลดและขณะที่ยังไม่มีการต่อโหลด โดยกรณีการทดสอบในขณะที่ยังไม่มีการต่อโหลดจะ ทำการทดสอบแบบที่ไม่มีมุเล่หัวข้อ 4.5.1 กับแบบที่มีมุเล่หัวข้อ 4.5.2 มุเล่ที่ใช้ในการทดสอบจะมี 2 ขนาด คือ มุเล่ขนาดเล็กกับมุเล่ขนาดใหญ่ซึ่งมุเล่ขนาดเล็กนั้นจะใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ส่วนมุเล่ขนาดใหญ่จะใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้ากับ 5 แรงม้า การทดสอบ มอเตอร์เหนี่ยวนำขณะที่ยังไม่มีการต่อโหลดแบบที่ไม่มีมุเล่และแบบที่มีมุเล่ก็เพื่อที่จะพิจารณาว่า เมื่อมีการต่อมุเล่เข้ากับมอเตอร์เหนี่ยวนำแล้วผลของกระแสขณะเริ่มต้นหมุนจะมีลักษณะแตกต่างกันอย่างไรบ้าง ซึ่งผลที่ได้เมื่อพิจารณารูปกราฟของหัวข้อ 4.5.1 เปรียบเทียบกับรูปกราฟของหัวข้อ 4.5.2 ที่กรณีการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำกรณีเดียวกันจะสังเกตเห็นว่าช่วงระยะเวลาในการเข้าสู่ สภาวะ Steady-state ของแบบที่มีมุเล่จะมีช่วงระยะเวลาที่ยาวนานกว่าแบบที่ไม่มีมุเล่และถ้า พิจารณาค่ากระแสขณะเริ่มต้นหมุนในช่วง Transient จะพบว่าค่ากระแสของแบบที่มีมุเล่จะมีค่า กระแสที่มากกว่าแบบที่ไม่มีมุเล่แต่ที่สภาวะ Steady-state จะมีค่ากระแสที่เท่ากัน จึงทำให้สรุปได้ ว่าเมื่อทำการต่อมุเล่เข้ากับมอเตอร์เหนี่ยวนำแล้ว จะทำให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเพิ่มมากขึ้นและส่งผลให้ระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะ Steady-state ยาวนานขึ้นส่วนกระแสขณะเริ่มต้นหมุนในช่วง Transient ก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย อีกส่วนของการทดสอบภายในวิทยานิพนธ์นี้คือการทดสอบขณะที่ ทำการต่อโหลด ซึ่งจะทำการทดสอบที่ 1/4 ของพิกัดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำหัวข้อ 4.5.3 และ 1/2 ของพิกัดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำหัวข้อ 4.5.4 การทดสอบขณะที่ทำการต่อโหลดนี้ทำการ ทดสอบเพื่อพิจารณาถึงผลกระทบของกระแสขณะเริ่มต้นหมุนเมื่อมีการต่อโหลด โดยจะสังเกตเห็นว่าเมื่อมีการต่อโหลดเข้ากับมอเตอร์เหนี่ยวนำผลของกระแสขณะเริ่มต้นหมุนที่ได้เมื่อพิจารณา เปรียบเทียบระหว่างรูปกราฟการทดสอบที่ 1/4 ของพิกัดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำหัวข้อ 4.5.3 กับรูปกราฟการทดสอบที่ 1/2 ของพิกัดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำหัวข้อ 4.5.4 ที่กรณีการ ทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำกรณีเดียวกันจะพบว่าถ้าพิจารณาในช่วง Transient ค่ากระแสที่ได้จะมีความแตกต่างกันเล็กน้อยเท่านั้นแต่ที่สภาวะ Steady-state ค่ากระแสของการทดสอบที่ 1/2 ของ พิกัดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่ามากกว่าค่ากระแสของการทดสอบที่ 1/4 ของพิกัดแรงบิด

ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ไม่มีโหลดแบบมีมูลกับการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโหลดค่ากระแสขณะเริ่มต้นหมุนที่ได้ในช่วง Transient จะไม่ค่อยมีความแตกต่างกันแต่ที่สภาวะ Steady-state จะมีความแตกต่างกัน และในส่วนของผลกระทบเมื่อมีการต่อมูลขณะไม่มีโหลดกับแบบที่ไม่มีการต่อมูลขณะไม่มีโหลดจะมีความแตกต่างกันในช่วง Transient แต่ที่สภาวะ Steady-state จะไม่ค่อยมีความแตกต่างกัน ซึ่งกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งหมดในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วงจรสมมูลและสมการของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานกัน N ตัวที่บัสเดียวกันหัวข้อ 3.2.1 และหัวข้อ 3.2.2

จากการพิจารณาผลการจำลองที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นจะเห็นว่ารูปกราฟกระแสไฟฟ้าขณะเริ่มต้นหมุนทั้งสามเฟสทางด้านสเตเตอร์ของแบบจำลองการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำกับรูปกราฟที่ได้จากการทดสอบจริงและจากบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในต่างประเทศ [2, 3] มีความใกล้เคียงกัน โดยที่ผลจากการจำลองที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้จะมีความแตกต่างกับผลที่ได้จากการทดสอบจริงไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ (เปรียบเทียบได้จากส่วนของผลการทดสอบหัวข้อ 4.5) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันที่การทดสอบในสภาวะมีภาระทางกลกับสภาวะไม่มีภาระทางกลจะสังเกตเห็นว่าที่สภาวะมีภาระทางกลจะมีความผิดพลาดมากกว่าในสภาวะไม่มีภาระทางกลเนื่องมาจากค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำของวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการละเลยค่าในส่วนของ Core Loss (R_c) ไปทำให้ผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ได้มีความผิดเพี้ยนไปบ้าง แต่ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่นำเสนอก็ยังคงมีความน่าเชื่อถือพอที่จะสามารถนำไปใช้ในการทำนายการทำงานในช่วงขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อรวมกันอยู่ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับผู้ที่มีความสนใจเกี่ยวกับการศึกษากระแสขณะเริ่มต้นหมุนสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้แบบจำลองการรวมกลุ่มซึ่งอาจจะใช้ข้อมูลในวิทยานิพนธ์นี้เป็นแนวทางสำหรับพัฒนางานวิจัยของท่านเอง มีดังต่อไปนี้

1. การศึกษากระแสขณะเริ่มต้นหมุนสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำควรมีเครื่องมือและอุปกรณ์ที่เพียงพอต่องานวิจัย
2. วงจรสมมูลของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในวิทยานิพนธ์นี้ยังละเลยในส่วนของคุณค่า Core Loss (R_c) ไปทำให้ผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ได้มีความผิดเพี้ยนไปบ้าง ดังนั้นในการพัฒนางานวิจัยในลำดับต่อไปควรคำนึงถึงค่า Core Loss (R_c) ด้วย
3. แบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ยังมีข้อจำกัดอยู่ที่มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำต้องมีค่าความเร็วเชิงโคโรนัสที่เท่ากัน

4. แบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในวิทยานิพนธ์นี้สามารถที่จะนำเข้าไปใช้กับการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังในส่วนอื่นได้อีก เช่น นำไปใช้ศึกษาการคำนวณโหลดในระบบไฟฟ้าว่าเมื่อทำการต่อกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้าไปแล้วต้องทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเท่าไรมีผลกระทบอย่างไรบ้างกับระบบไฟฟ้า เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] S J. Chapman, “ Electric Machinery Fundamentals ”, McGraw-Hill, 1999
- [2] T. Kataoka, H. Uchida, S. Nishikata, T.Kai and T. Funabashi, “ A Method for Aggregation of a Group of Induction Motor Loads ” POWERCON 2000, Perth, Australia, pp. 1683-1688
- [3] P.Pillay, S.M.A. Sabur and M.M. Haq, “ A model for induction motor aggregation for power system studies ”, Electric Power Systems Research, Nov. 1996, pp. 225-228
- [4] T.Y.J. Lem and R.T.H. Alden, “ Comparison of experimental and aggregate induction motor responses ”, IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 9, No. 4, Nov. 1994, pp. 1895-1900
- [5] D.C. Franklin and A. Morelato, “ Improving dynamic aggregation of induction motor models ” IEEE / PES 1994 Winter Meet., New York, New York, Jan. 30-Feb. 3, 1994, pp. 1934-1941
- [6] M. Taleb, M. Akbaba and E.A. Abdullah, “ Aggregation of Induction Machines for Power System Dynamic Studies ”, IEEE/PES 1994 Winter Meet., New York, New York, Jan. 30-Feb. 3, 1994, pp. 2042-2048
- [7] S. Sriharan, L.H. Tan, and H.M. Ting, “ Reduced transient model of a group of induction motors ”, IEEE Trans. Energy Conversion, vol.8, no.4, Dec. 1993, pp. 769-777
- [8] A.H.M.A. Rahim and A.R. Laldin, “ Aggregation of induction motor loads for transient stability studies ”, IEEE Trans. Energy Conv., EC-2 (1), March, 1987, pp. 55-61
- [9] G.J. Rogers, J. Di Manno and R.T.H. Alden, “ An aggregate induction motor model for industrial plants ”, IEEE Trans. Power Appar, Syst., PAS-103 (4), April, 1984, pp. 683-690
- [10] M.M.Abdel Hakim and G.J. Berg, “ Dynamic single-unit representation of induction motor groups”, IEEE Trans. PAS, vol.PAS-95, no. 1, Jan/Feb. 1976, pp. 155-165
- [11] Chee-Mun Ong, “Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab / Simulink”, Prentice Hall, 1998
- [12] S.Wade, M.W.Dunnigan and B.W.Williams, “Modeling and Simulation of Induction Machine Vector Control with Rotor Resistance Identification”, IEEE Trans. Energy Conversion, Vol.12, No.3, MAY 1997,pp. 495-506
- [13] J.R. Smith and Meng-Jen Chen, “Three-Phase Electrical Machine Systems Computer Simulation”, Research Studies Press LTD, 1993

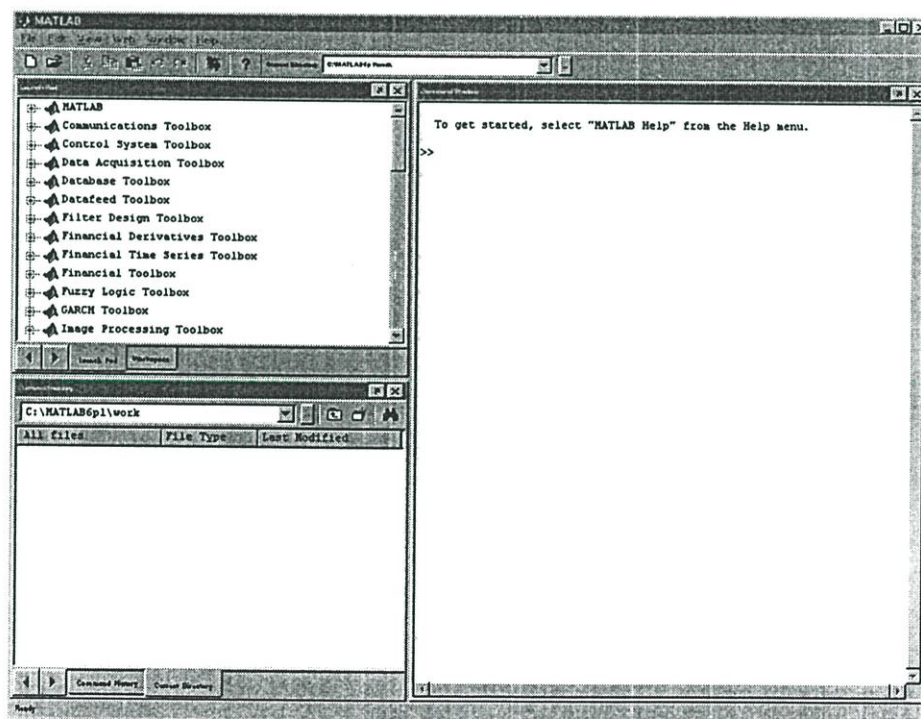
- [14] J.R. Smith, "Response Analysis of A.C. Electrical Machines : Computer Models and Simulation", Research Studies Press LTD, 1990
- [15] คู่มือการอธิบายฟังก์ชันต่างๆ ภายในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เวอร์ชัน 6.1
- [16] ไพสิฐ ภิรมย์ธรรม, อานันท์วัฒน์ คุณากร " แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ " วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 18 ฉบับที่ 4 เดือน ธันวาคม 2544 หน้า 85-90
- [17] ไพสิฐ ภิรมย์ธรรม, อานันท์วัฒน์ คุณากร " การจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ " การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25 (EECON-25) 21-22 พฤศจิกายน 2545 หน้า PW1-PW5

ภาคผนวก ก
โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

ก.1 โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

โดยทั่วไปการแก้ปัญหาด้านวิศวกรรมและงานวิจัยในด้านที่ประกอบด้วยการคำนวณในเชิงตัวเลข และกราฟฟิกที่มีความซับซ้อนที่ใช้การแก้ปัญหาคอมพิวเตอร์จะมีการใช้ภาษาทางคอมพิวเตอร์ช่วยในการแก้ปัญหา เช่น ภาษา C, ภาษา Fortran หรือภาษา Pascal เป็นต้น แต่เนื่องจากการใช้ภาษาต่างๆเหล่านี้จะมีความยุ่งยากอย่างมากในการเขียนเพื่อที่จะนำมาใช้งานในด้านวิศวกรรมและงานวิจัยในด้านที่ประกอบด้วยการคำนวณในเชิงตัวเลข และกราฟฟิกที่มีความซับซ้อนเพราะต้องใช้คำสั่งเป็นจำนวนมาก ทำให้บริษัท MathWorks Inc. ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมขึ้นมาซึ่งมีชื่อว่า โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาในด้านวิศวกรรมและงานวิจัยในด้านที่ประกอบด้วยการคำนวณในเชิงตัวเลข และกราฟฟิกที่มีความซับซ้อนขึ้นมา ซึ่งคำว่า MATLAB ย่อมาจาก Matrix Laboratory เนื่องจากว่าโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ก่อนที่จะมีการพัฒนามาจนถึงปัจจุบันได้มีการเขียนขึ้นมาเพื่อใช้ในการคำนวณทางเมทริกซ์ที่พัฒนามาจาก LINKPACK และ EISPACK ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้มีการใช้งานโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

ก.1.1 หน้าตาการใช้งานของโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

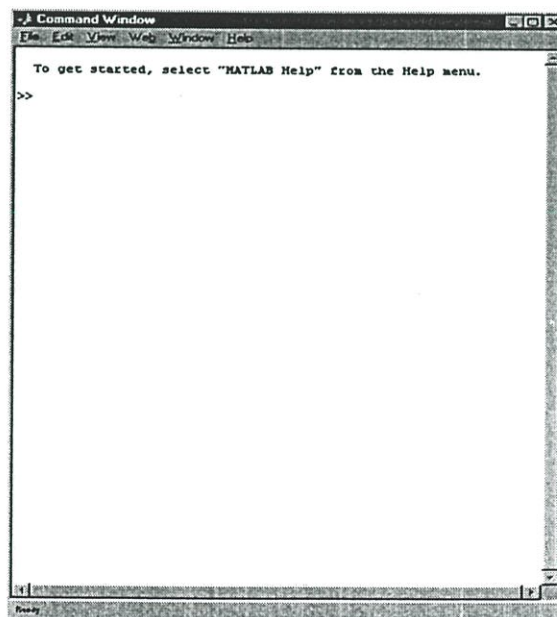


รูปที่ ก1 หน้าตาการใช้งานของโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

หน้าตาการใช้งานของโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เป็นหน้าต่างแรกที่พบเมื่อเปิดโปรแกรม โดยที่หน้าต่างนี้จะเป็นหน้าต่างสำหรับป้อนคำสั่งการใช้งานต่างๆลงบนโปรแกรมเพื่อ

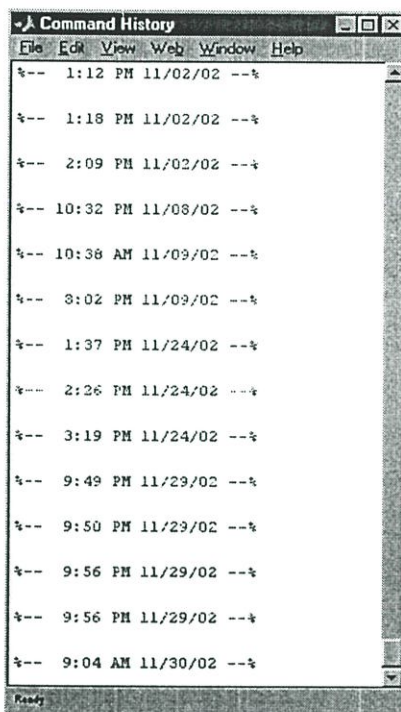
การคำนวณและประมวลผลต่างๆ ในการป้อนคำสั่งสำหรับการคำนวณและประมวลผลของโปรแกรมสามารถป้อนได้ 2 วิธี คือ การป้อนคำสั่งหรือค่าตัวแปรต่างๆบนหน้าต่างคำสั่งทีละคำสั่งตามขั้นตอนของการแก้ปัญหา กับการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ และชุดคำสั่งต่างๆ ที่ใช้ทำการประมวลผลลงในไฟล์ที่จัดเก็บด้วยนามสกุล .m โดยที่จะเรียกชุดตัวแปรและชุดคำสั่งทั้งหมดในลักษณะนี้ว่า M-file หรือเรียกว่า Script-file ซึ่งหมายถึงไฟล์ที่ถูกจัดเก็บในรูปแบบของรหัส ASCII Code โดย M-file หรือ Script-file นี้จะสามารถสร้างได้จาก Editor ภายในโปรแกรม ในการเรียกใช้โปรแกรม M-file สามารถทำได้โดยพิมพ์ชื่อของ M-file ในหน้าต่างคำสั่งโดยไม่ต้องตามด้วยนามสกุล .m แต่มีข้อบังคับว่าไฟล์นามสกุล .m ต้องมีอยู่ในหน้าต่างโคเร็คทอรีที่ใช้งานอยู่ด้วยโปรแกรมจึงจะสามารถทำงานคำสั่งใน M-file นั้นได้ โดยการทำงานจะทำงานทีละบรรทัดจนจบคำสั่งใน M-file เมื่อโปรแกรมทำงานคำสั่งภายใน M-file จนครบแล้ว จะพบเครื่องหมาย Prompt (>>) ซึ่งหมายความว่าโปรแกรมพร้อมที่จะรับคำสั่งต่างๆต่อไป สำหรับการออกจากโปรแกรมทำได้โดยใช้คำสั่ง Quit หรือ Exit และก่อนที่จะออกจากโปรแกรม ถ้าต้องการเก็บค่าต่างๆที่ได้ทำการกำหนดค่าไปแล้วนั้นสามารถทำได้โดยใช้คำสั่ง Save ซึ่งการใช้คำสั่งนี้จะเป็นการเก็บค่าต่างๆที่ได้กำหนดไว้แล้วในไฟล์นามสกุล .mat และเมื่อต้องการเรียกกลับมาใช้งานอีกครั้ง ซึ่งหน้าต่างการใช้งานของโปรแกรม MATLAB/SIMULINK มีการแบ่งเป็นส่วนต่างๆดังต่อไปนี้

ก.1.1.1 หน้าต่างคำสั่ง (Command Windows)



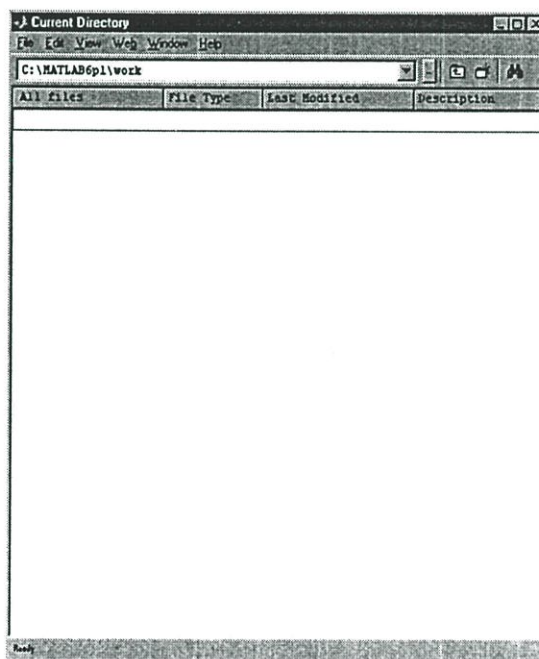
รูปที่ ก2 หน้าต่างคำสั่ง (Command Windows)

ก.1.1.2 หน้าต่างบันทึกข้อมูลคำสั่ง (Command History)



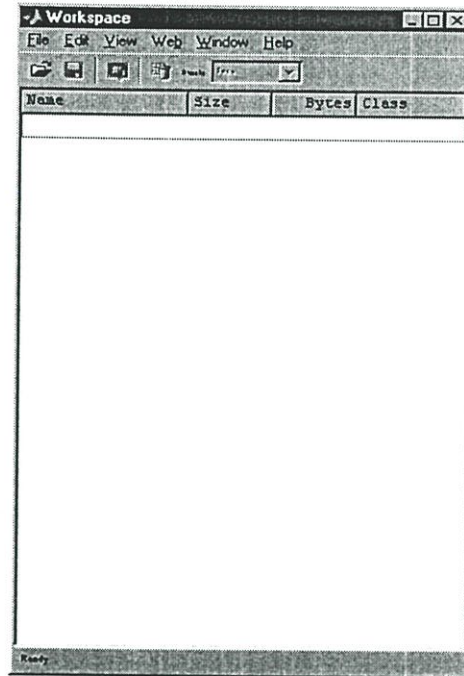
รูปที่ ก3 หน้าต่างบันทึกข้อมูลคำสั่ง (Command History)

ก.1.1.3 หน้าต่างไดเรกทอรีที่ใช้งานอยู่ (Current Directory)



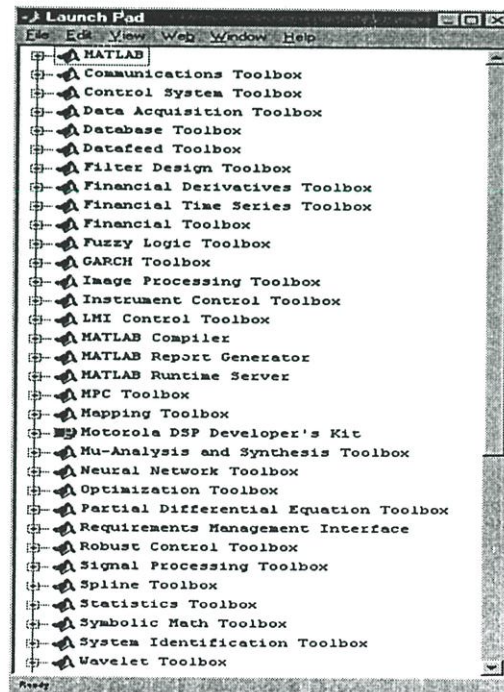
รูปที่ ก4 หน้าต่างไดเรกทอรีที่ใช้งานอยู่ (Current Directory)

ก.1.1.4 หน้าต่างแสดงพื้นที่การใช้งาน (Workspace)



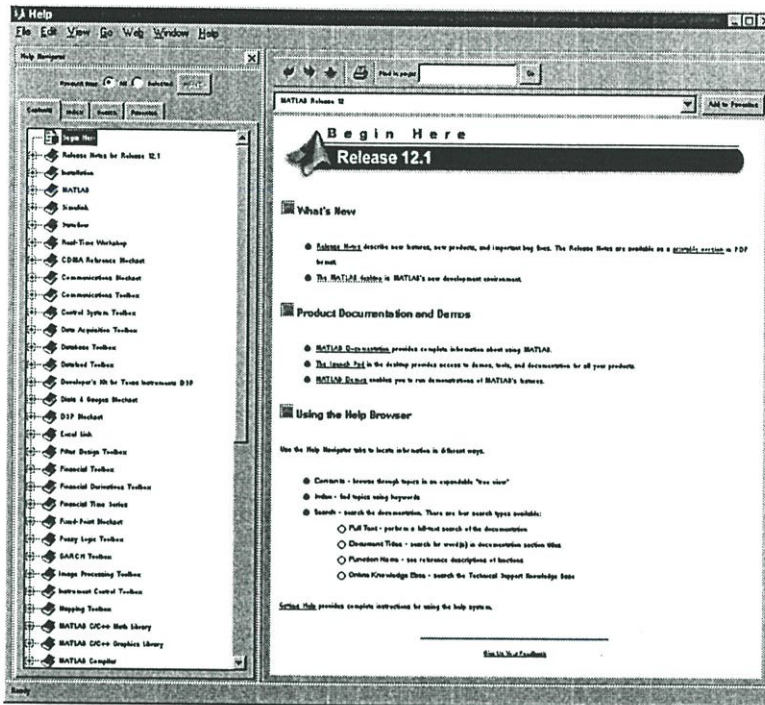
รูปที่ ก5 หน้าต่างแสดงพื้นที่การใช้งาน (Workspace)

ก.1.1.5 หน้าต่างการกล่าวถึงส่วนต่างๆ (Launch Pad)



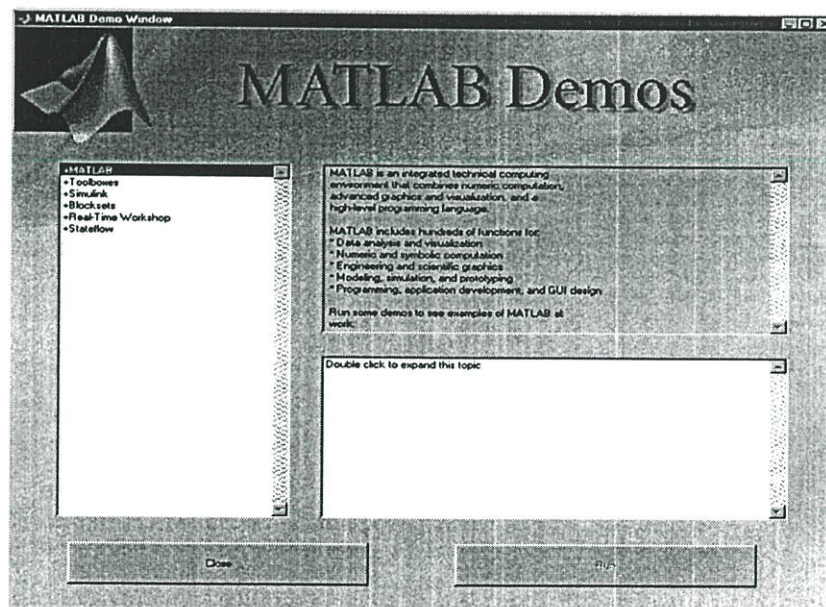
รูปที่ ก6 หน้าต่างการกล่าวถึงส่วนต่างๆ (Launch Pad)

ก.1.1.6 หน้าต่างอธิบายการทำงาน (Help)



รูปที่ ก7 หน้าต่างอธิบายการทำงาน (Help)

ก.1.1.7 หน้าต่างตัวอย่างการใช้งาน (Demos)



รูปที่ ก8 หน้าต่างตัวอย่างการใช้งาน (Demos)

ก.1.2 การกำหนดค่าตัวแปรและคำสั่งต่างๆในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

การแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมและงานวิจัยในด้านต่างๆสิ่งที่มีความสำคัญมากอย่างหนึ่ง คือ การกำหนดข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปัญหา ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถือว่าเป็นค่าตัวแปรค่าหนึ่ง โดยอาจเป็นเมตริกซ์ เวกเตอร์ หรือสเกลาร์ก็ได้ ซึ่งการกำหนดค่าตัวแปรเหล่านี้ของโปรแกรม MATLAB/SIMULINK นั้นจะมีการจัดเก็บที่ M-file ของโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

การป้อนข้อมูลเมตริกซ์ เวกเตอร์ และสเกลาร์ ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK มีดังต่อไปนี้

ก.1.2.1 การป้อนข้อมูลภายในเครื่องหมาย []

การป้อนข้อมูลในรูปแบบของเมตริกซ์ เวกเตอร์ และสเกลาร์ ในเครื่องหมาย [] ก่อนข้างจะเป็นวิธีที่ทำความเข้าใจได้ง่าย โดยวิธีการป้อนจะทำการป้อนข้อมูลเรียงกันไปภายในเครื่องหมาย [] โดยมีข้อกำหนดดังนี้

- ชื่อของตัวแปรจะต้องอยู่ทางซ้ายมือ และตามด้วยเครื่องหมายเท่ากับ (=) ส่วนทางขวามือของเครื่องหมายเท่ากับ (=) จะเป็นข้อมูลซึ่งจะอยู่ในเครื่องหมาย [] เรียงลำดับตามจำนวนแถว

- ชื่อของตัวแปรจะต้องเริ่มต้นด้วยตัวอักษรและมีความยาวได้ทั้งหมด 19 ตัวอักษร ทั้งนี้อาจเป็นตัวเลขหรือสัญลักษณ์ก็ได้

- ชื่อของตัวแปรต้องไม่มีเครื่องหมายบวกหรือลบอยู่ด้านหน้า

- ค่าตัวเลขระหว่างหลักจะถูกแยกด้วยเครื่องหมายคอมม่า (,) หรือช่องว่างก็ได้

- ค่าระหว่างแถวจะถูกแบ่งด้วยเครื่องหมายเซมิโคลอน (;)

- ค่าแต่ละค่าในเครื่องหมาย [] สามารถเป็นค่าบวกหรือลบก็ได้ โดยมีเครื่องหมายบวกหรือลบอยู่ด้านหน้า

ก.1.2.2 การป้อนข้อมูลโดยใช้เครื่องหมาย (:)

การป้อนข้อมูลโดยใช้เครื่องหมาย (:) เป็นเครื่องมือที่สามารถใช้ทำงานได้หลายด้านในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งสามารถจำแนกการทำงานในด้านต่างๆได้ดังนี้

- เครื่องหมาย (:) หากใช้ควบคู่กับเครื่องหมาย () จะเป็นการเลือกข้อมูลทั้งหมดระหว่างข้อมูลในแถวหรือข้อมูลในหลัก โดยมีการแบ่งส่วนด้านหน้าเป็นข้อมูลของแถวด้านหลังเป็นข้อมูลของหลัก (แถว,หลัก) ยกตัวอย่างเช่น การเลือกข้อมูลในตัวแปรชื่อ A

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 5 \\ 2 & 6 \\ 3 & 7 \\ 4 & 8 \end{bmatrix}$$

ถ้าต้องการกำหนดให้ทุกแถวในหลักที่ 1 เป็นตัวแปรใหม่ชื่อ B และทุกแถวในหลักที่ 2 เป็นตัวแปรใหม่ชื่อ C สามารถใช้คำสั่งในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ได้ดังนี้

$$B = A(:,1);$$

$$C = A(:,2);$$

ถ้าต้องการกำหนดให้ทุกหลักในแถวที่ 1 เป็นตัวแปรใหม่ชื่อ D และทุกหลักในแถวที่ 2 เป็นตัวแปรใหม่ชื่อ E สามารถใช้คำสั่งในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ได้ดังนี้

$$D = A(1,:);$$

$$E = A(2,:);$$


- เมื่อใช้เครื่องหมาย (:) วางที่ตำแหน่งระหว่างค่าจริง 2 ค่า โปรแกรม MATLAB/SIMULINK จะทำการสร้างเมตริกซ์ขึ้นมาใหม่ โดยถือค่าจริงที่อยู่ด้านซ้ายของเครื่องหมาย (:) เป็นค่าเริ่มต้นและค่าที่อยู่ด้านขวาของเครื่องหมาย (:) เป็นค่าสุดท้าย ซึ่งจะทำการเพิ่มค่าจากค่าเริ่มต้นทีละ 1 ค่าจนถึงค่าสุดท้าย ยกตัวอย่างเช่น การเพิ่มค่าของตัวแปร A จาก 1 จนถึง 10

$$A = [1 : 10];$$

- เมื่อใช้เครื่องหมาย (:) แยกค่าต่างๆออกเป็น 3 จำนวน ค่าจำนวนจริงที่อยู่ในตำแหน่งกลางจะเป็นตัวกำหนดค่าการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของ ค่าเริ่มต้น(ค่าจำนวนจริงที่ตำแหน่งแรก) กับค่าสุดท้าย(ค่าจำนวนจริงที่ตำแหน่งสุดท้าย) โดยค่าที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงจะใช้เป็นค่าบวกหรือค่าลบก็ได้ ทั้งนี้ถ้าใช้เป็นค่าบวกค่าเริ่มต้นจะต้องน้อยกว่าค่าสุดท้าย และถ้าใช้ค่าเป็นค่าลบ ค่าเริ่มต้นจะต้องมีค่ามากกว่าค่าสุดท้าย ยกตัวอย่างเช่น การเพิ่มค่าของตัวแปร A จาก 1 จนถึง 10 โดยทำการเพิ่มค่าขึ้นทีละ 2 ค่า

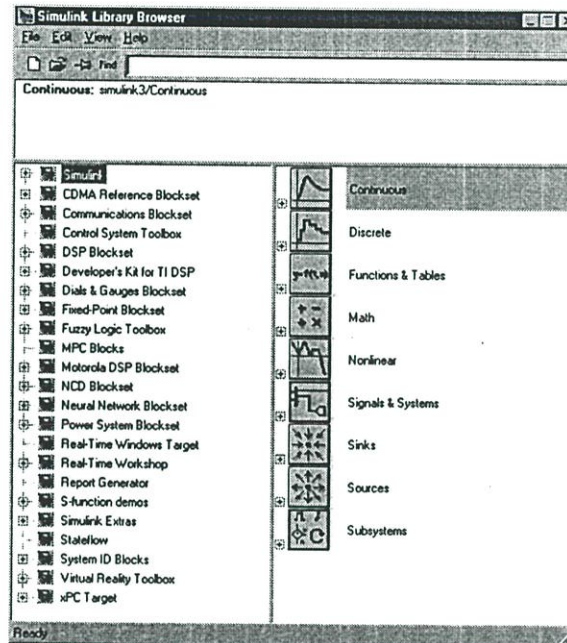
$$A = [1 : 2 : 10];$$

ก.2 การใช้งาน SIMULINK

การใช้งาน SIMULINK ภายในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ทำได้โดยการพิมพ์คำสั่ง SIMULINK บนหน้าต่างคำสั่งหรือคลิกคำสั่งที่  บนหน้าต่างการใช้งานของโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในส่วนของ SIMULINK นั้นจะสามารถจำลองการทดสอบต่างๆ และวิเคราะห์การทำงานของระบบพลศาสตร์ในเชิงเวลาได้ คำว่า SIMULINK ย่อมาจากคำว่า Simulation และ Link การใช้งาน SIMULINK จะสามารถใช้งานได้ก็ต่อเมื่อมีการนำ Block Set ต่างๆในหน้าต่าง Simulink Library Browser มาทำการเชื่อมโยงกันให้เป็นแบบจำลองที่ต้องการ การใช้งาน SIMULINK นั้นเมื่อทำการต่อ Block Set ต่างๆจนเป็นแบบจำลองที่ต้องการแล้วนั้นจะสามารถจำลองระบบได้ทั้งระบบที่เป็นเชิงเส้น ไม่เป็นเชิงเส้น ระบบเวลาต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการเขียนแบบจำลองบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยใช้

SIMULINK เชื่อมโยงกับ M-file เพื่อเป็นการใส่ข้อมูลต่างๆลงในแบบจำลองซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไป

ก.2.1 ส่วนประกอบต่างๆภายใน Simulink Library Browser


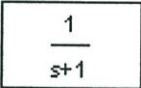




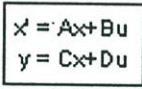
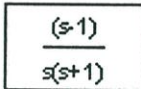


รูปที่ ก9 ส่วนประกอบต่างๆภายใน Simulink Library Browser

เนื่องจากการใช้งาน Simulink Library Browser จะมีอยู่ด้วยกันหลายส่วน แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการใช้ Block Set ต่างๆภายใน Simulink Library Browser เพียงบางส่วนเท่านั้น ทำให้การอธิบาย Block Set ต่างๆภายในวิทยานิพนธ์จะอธิบายเฉพาะบางส่วนที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ซึ่งก็คือ Block Set ในส่วนของ Simulink เท่านั้น

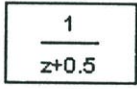

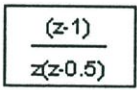

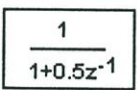

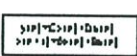

ก.2.1.1 Simulink ประกอบด้วยกลุ่มการทำงานดังนี้

1) กลุ่มการทำงานแบบ Continuous มี Block Set ดังนี้

	Derivative		Transfer Fcn
	Integrator		Transport Delay
	Memory		Variable Transport Delay
	State-Space		Zero-Pole

รูปที่ ก10 กลุ่มการทำงานแบบ Continuous

2) กลุ่มการทำงานแบบ Discrete มี Block Set ดังนี้

	Discrete Transfer Fcn		Discrete-Time Integrator
	Discrete Zero-Pole		First-Order Hold
	Discrete Filter		Unit Delay
	Discrete State-Space		Zero-Order Hold

รูปที่ ก11 กลุ่มการทำงานแบบ Discrete

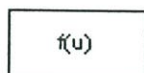
3) กลุ่มการทำงานแบบ Functions & Tables มี Block Set ดังนี้



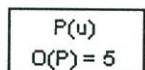
Direct Look-Up Table (n-D)



MATLAB Fcn



Fcn



Polynomial



Interpolation (n-D) using
PreLook-Up



PreLook-Up Index Search



Look-Up Table



S-Function



Look-Up Table (2-D)



S-Function Builder



Look-Up Table (n-D)

รูปที่ 12 กลุ่มการทำงานแบบ Functions & Tables

4) กลุ่มการทำงานแบบ Math มี Block Set ดังนี้

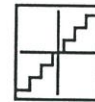
	Abs		Matrix Gain
	Algebraic Constraint		MinMax
	Bitwise Logical Operator		Product
	Combinatorial Logic		Real-Imag to Complex
	Complex to Magnitude-Angle		Relational Operator
	Complex to Real-Imag		Rounding Function
	Dot Product		Sign
	Gain		Slider Gain
	Logical Operator		Sum
	Magnitude-Angle to Complex		Trigonometric Function
	Math Function		

รูปที่ ก13 กลุ่มการทำงานแบบ Math

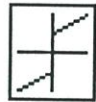
5) กลุ่มการทำงานแบบ Nonlinear มี Block Set ดังนี้



Backlash



Quantizer



Coulomb & Viscous Friction



Rate Limiter



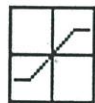
Dead Zone



Relay



Manual Switch



Saturation



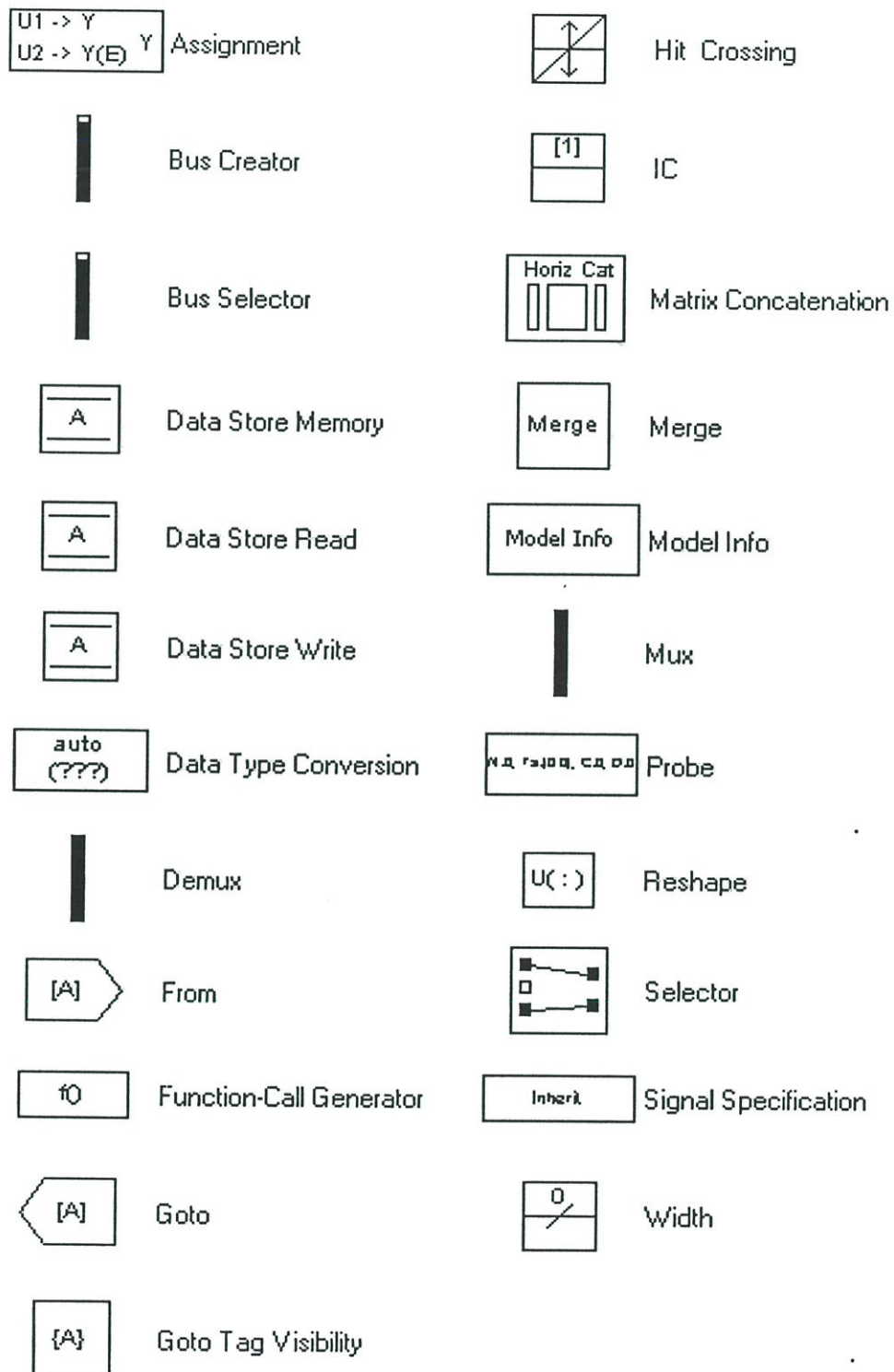
Multipoint Switch



Switch

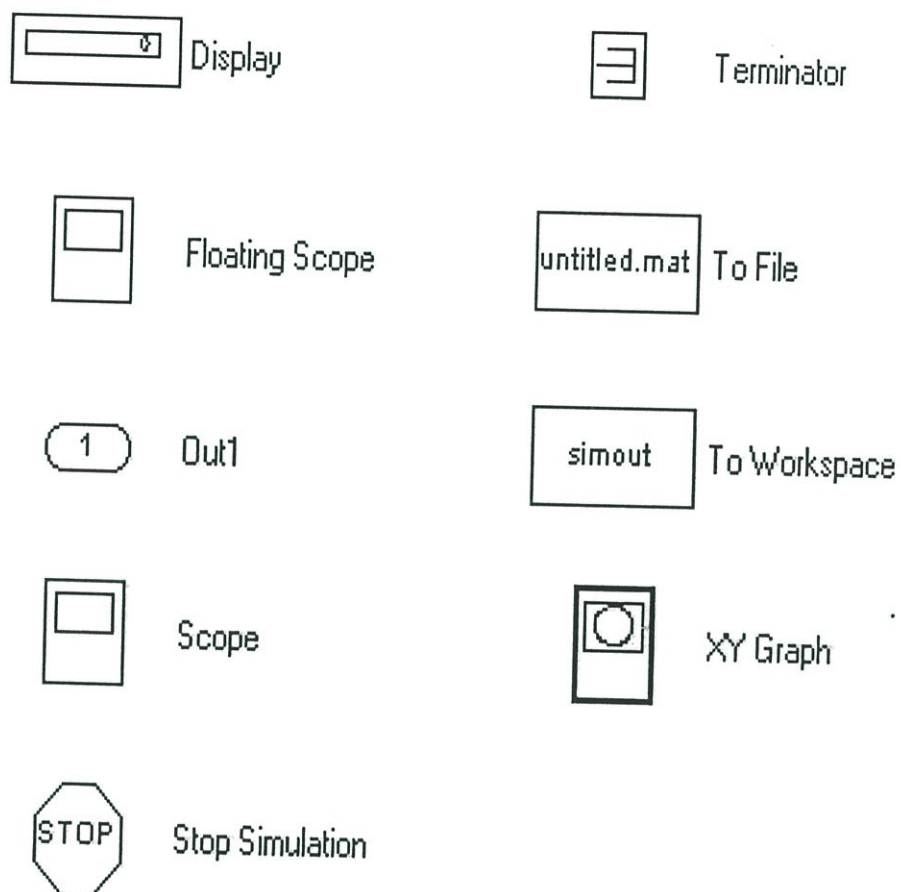
รูปที่ ก14 กลุ่มการทำงานแบบ Nonlinear

6) กลุ่มการทำงานแบบ Signals & Systems มี Block Set ดังนี้











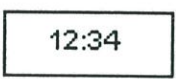

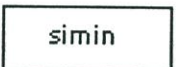






รูปที่ 15 กลุ่มการทำงานแบบ Signals & Systems

7) กลุ่มการทำงานแบบ Sinks มี Block Set ดังนี้



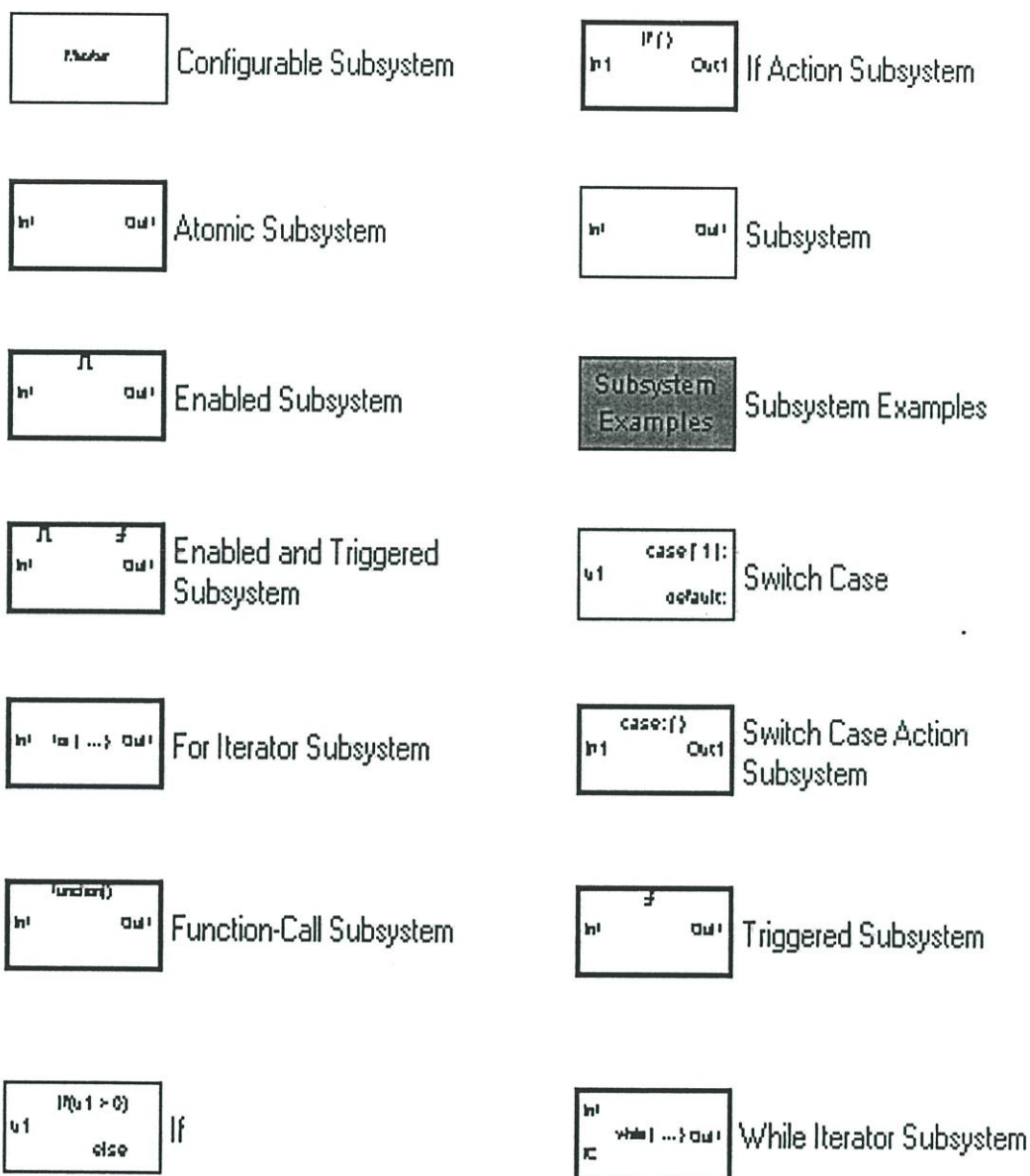
รูปที่ ก16 กลุ่มการทำงานแบบ Sinks

8) กลุ่มการทำงานแบบ Sources มี Block Set ดังนี้

	Band-Limited White Noise		Pulse Generator
	Chirp Signal		Ramp
	Clock		Random Number
	Constant		Repeating Sequence
	Digital Clock		Signal Generator
	From Workspace		Sine Wave
	From File		Step
	Ground		Uniform Random Number
	In1		

รูปที่ ๑17 กลุ่มการทำงานแบบ Sources

9) กลุ่มการทำงานแบบ Subsystems มี Block Set ดังนี้



รูปที่ 18 กลุ่มการทำงานแบบ Subsystems

ภาคผนวก ข
การหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

ข.1 การหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

นิยามของโมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia, J) ของวัตถุแข็งเกร็งรอบแกนคือ ผลรวมของผลคูณของมวลอนุภาค (m_i) กับกำลังสองของระยะที่อนุภาคอยู่ห่างจากแกนหมุน (R_i^2) แสดงดังสมการที่ ข1

$$J = \sum_{i=1}^n m_i R_i^2 \quad (\text{ข1})$$

เนื่องจากวัตถุแข็งเกร็งประกอบด้วยอนุภาคจำนวนมาก หากวัตถุแข็งเกร็งมีความหนาแน่น ρ เมื่อปริมาตรน้อยยิ่ง (infinitesimal volume, dV) จะมีมวลน้อยยิ่ง (infinitesimal mass, dm) จะได้ดังสมการที่ ข2

$$dm = \rho dV \quad (\text{ข2})$$

เมื่อนำสมการที่ ข2 มาพิจารณาความสัมพันธ์เมื่อ infinitesimal mass อยู่ห่างจากแกนหมุนเท่ากับ r จะเป็นดังสมการที่ ข3

$$J = \sum_{i=1}^n m_i R_i^2 = \int r^2 dm = \int \rho r^2 dV \quad (\text{ข3})$$

โดยที่วิธีการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีดังนี้

ข.1.1 โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุทรงกระบอกตัน

$$J = \frac{1}{8} m \cdot d^2 \quad (\text{ข4})$$

โดยที่ J = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

m = มวลของวัตถุทรงกระบอก

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุทรงกระบอก

ข.1.2 วิธีรันเอาท์

$$J = \frac{-m_L(\omega)}{\frac{d\omega(\omega)}{dt}} \quad (ข5)$$

โดยที่ J = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

m_L = แรงบิดภายในมอเตอร์หรือแรงบิดไฟฟ้า

ω = ความเร็วเชิงมุม

ข.1.3 วิธีรีทาเคชั่น

$$J = \frac{9.55 \times t_b \times M_{BR}}{n} \quad (ข6)$$

โดยที่ J = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

t_b = เวลาในการหน่วง หน่วยเป็นวินาที

M_{BR} = โหลดเบรก หน่วยเป็น Nm

n = การเปลี่ยนแปลงความเร็วระหว่างเวลา t_b หน่วยเป็นรอบต่อนาที

โดยวิธีรีทาเคชั่นจะเป็นวิธีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ซึ่งทำการเพิ่ม โหลดเบรกขึ้นทีละน้อยๆ ยิ่งค่า โหลดเบรกมีความถี่มากข้อมูลที่ได้จะมีความถูกต้องมากและช่วงที่เพิ่ม โหลดเบรกขึ้นนี้ก็ทำการวัด ความเร็ว โดยทำการวัดในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานและวัดระยะเวลาที่ความเร็วโรเตอร์ลดลง จากความเร็วสูงสุดในขณะโหลดเบรคนั้นๆ จนความเร็วเป็นศูนย์

ภาคผนวก ก

M-FILE ของแบบจำลองการรวมกลุ่ม

ค.1 M-FILE ของแบบจำลองการรวมกลุ่ม

การป้อนข้อมูลลงสู่แบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้วิธีป้อนข้อมูลจาก M-FILE เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมากในวิทยานิพนธ์นี้ เนื่องจากการที่จะทำการเขียนข้อมูลในแบบจำลองโดยตรงจะเป็นเรื่องที่ยุ่งยากอย่างมาก ทำให้ต้องใช้วิธีการป้อนข้อมูลจาก M-FILE แทน ซึ่งจะทำให้การป้อนข้อมูลมีความสะดวก รวดเร็ว มากขึ้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

% AGGREGATION MODELS

Vrated = 380;

Vm = Vrated*sqrt(2/3);

frated = 50;

P = 4;

ws = 2*pi*frated;

rs = ใส่ค่า stator resistance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ;

rr = ใส่ค่า rotor resistance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ;

lls = ใส่ค่า stator leakage inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ /ws;

llr = ใส่ค่า rotor leakage inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ /ws;

lm = ใส่ค่า magnetizing inductance ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ /ws;

ls = lm+lls;

lr = lm+llr;

J = ใส่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ;

ภาคผนวก ง
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

ISSN 0125-1724

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

ฉบับวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 18 ฉบับที่ 4

เดือนพฤษภาคม 2544

1	การออกแบบระบบควบคุมแบบกระจายในสถานีผลิตกระแสไฟฟ้า	
	ศ. นพรัตน์พร นพรัตน์ บรรณาธิการ, นพรัตน์ นพรัตน์	
2	การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของยานยนต์ในกรณีเริ่มต้นด้วยแรงขับเคลื่อนของเครื่องยนต์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	123
	สมศักดิ์ นิลนิลนิต, บรรณาธิการ, วิศวกรรม	
3	ผลของการลดขนาดของขดลวดและขั้วต่อมอเตอร์มอเตอร์	128
	นพิตานนท์ ศรีนิเวศ, บรรณาธิการ, วิศวกรรม	
4	โครงการบริหารผลิตภัณฑ์ในโรงงานอุตสาหกรรม	134
	นพพร นพนิเวศน์, บรรณาธิการ, วิศวกรรม, บรรณาธิการ, วิศวกรรม	
5	ผลของระบบการควบคุมในระบบควบคุมอัตโนมัติ	139
	นพรัตน์ นพรัตน์, บรรณาธิการ, วิศวกรรม, บรรณาธิการ, วิศวกรรม	
6	Rossum Smith Predictor	144
	Munykol Jaisookom, Prasa Jaisookom, Kiti Tinsathit	
7	การพัฒนาระบบการควบคุมอัตโนมัติของเครื่องจักร MCS-51 โดยใช้เทคนิคพีซี	149
	นพรัตน์ นพรัตน์, บรรณาธิการ, วิศวกรรม	
8	การออกแบบและสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องจักร	154
	สมศักดิ์ นิลนิลนิต, บรรณาธิการ, วิศวกรรม, บรรณาธิการ, วิศวกรรม, บรรณาธิการ, วิศวกรรม, บรรณาธิการ, วิศวกรรม	
9	การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องจักร	159
	นพรัตน์ นพรัตน์, บรรณาธิการ, วิศวกรรม, บรรณาธิการ, วิศวกรรม	
10	การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องจักร	164
	นพรัตน์ นพรัตน์, บรรณาธิการ, วิศวกรรม, บรรณาธิการ, วิศวกรรม	
11	การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องจักร	169
	นพรัตน์ นพรัตน์, บรรณาธิการ, วิศวกรรม, บรรณาธิการ, วิศวกรรม	
12	การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องจักร	174
	นพรัตน์ นพรัตน์, บรรณาธิการ, วิศวกรรม, บรรณาธิการ, วิศวกรรม	
13	การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องจักร	179
	นพรัตน์ นพรัตน์, บรรณาธิการ, วิศวกรรม, บรรณาธิการ, วิศวกรรม	
14	การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องจักร	184
	นพรัตน์ นพรัตน์, บรรณาธิการ, วิศวกรรม, บรรณาธิการ, วิศวกรรม	
15	การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องจักร	189
	นพรัตน์ นพรัตน์, บรรณาธิการ, วิศวกรรม, บรรณาธิการ, วิศวกรรม	
16	การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องจักร	194
	นพรัตน์ นพรัตน์, บรรณาธิการ, วิศวกรรม, บรรณาธิการ, วิศวกรรม	
17	การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องจักร	199
	นพรัตน์ นพรัตน์, บรรณาธิการ, วิศวกรรม, บรรณาธิการ, วิศวกรรม	
18	การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องจักร	204
	นพรัตน์ นพรัตน์, บรรณาธิการ, วิศวกรรม, บรรณาธิการ, วิศวกรรม	
19	การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องจักร	209
	นพรัตน์ นพรัตน์, บรรณาธิการ, วิศวกรรม, บรรณาธิการ, วิศวกรรม	
20	การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องจักร	214
	นพรัตน์ นพรัตน์, บรรณาธิการ, วิศวกรรม, บรรณาธิการ, วิศวกรรม	

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

A Computer Model for a Group of Induction Motors

ไพสิฐ ภิรมย์ธรรม อานันท์วัฒน์ คุณากร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยได้ทำการศึกษากระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ของการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและเปรียบเทียบกับผลการพิจารณาทางด้านของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในสภาวะที่ยังไม่รวมกลุ่มกันเพื่อเป็นการยืนยันผลที่ได้ของแบบจำลองสภาวะการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และในบทความนี้ยังได้มีการนำเสนอถึงการแสดงขั้นตอนสำหรับการหาค่าตัวแปรต่างๆ ในส่วนของวงจรสมมูลของการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเพื่อนำไปใช้ในแบบจำลอง

Abstract

This paper presents a computer model for a group of induction motors. The simulated stator current waveforms obtained from a group of induction motors and those obtained from a single induction motor are compared so that the model can be verified. The determination of parameters used in an equivalent circuit representing the group of induction motors is also illustrated.

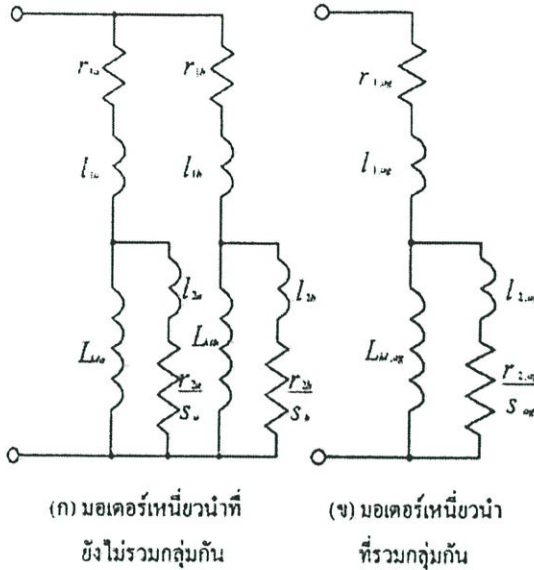
1. บทนำ

ในปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดเหนี่ยวนำได้รับความนิยมมากในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากมีคุณสมบัติของโครงสร้างที่แข็งแรง ทนทาน ง่ายต่อการใช้งาน ราคาถูก ไม่จำเป็นต้องดูแลรักษามากนัก และเนื่องจากการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นจำนวนมากทำให้ได้มีการศึกษาแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสซึ่งเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังและเมื่อในความเป็นจริงจะมีมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นจำนวนมากที่ต่อขนานรวมกันอยู่ที่บัสหนึ่งๆของระบบไฟฟ้ากำลังดังนั้นจึงจะไม่ใช้การวิเคราะห์ระบบกับแบบจำลองแต่ละตัวของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแต่จะใช้การวิเคราะห์แบบจำลองสภาวะการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแทนซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สามเฟสที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าโดยวิธีการสำหรับวิเคราะห์สภาวะการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีผู้เสนอหลายแบบดังเช่น[1,2]โดยวิธีวิเคราะห์ที่ใช้กับวิธีการต่างๆที่นำเสนอกันนั้นจะแตกต่างกันที่ความซับซ้อนและความถูกต้องแม่นยำ

บทความฉบับนี้นำเสนอแบบจำลองของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้วงจรสมมูลของ Kataoka et al [2] มาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์และเขียนเป็นแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์บน MATLAB/SIMULINK และอาศัยแบบจำลองนี้ในการศึกษาการทำงานในสภาวะ steady state ของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ผลลัพธ์จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์จากแบบจำลองที่นำเสนอจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากการจำลองโดยอาศัยแบบจำลองที่นำเสนอ โดย [3,4]ซึ่งถือได้ว่าเป็นแบบจำลองมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2. การหาค่าตัวแปรวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [2]



รูปที่ 1 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [2]

กระบวนการสำหรับการหาค่าตัวแปรวงจรสมมูลการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้แสดงในส่วนของการต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 2 ตัว ขนานกันคือมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส IMa และ IMb เมื่อรวมกันจะได้วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่รวมกลุ่มกัน IMag ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1(ข) ในส่วนของรูปที่ 1(ก) แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 2 ตัว ในรูปต่างๆเหล่านี้ตัวแปร r_{1a}, r_{1b}, r_{1ag} คือ stator resistance ตัวแปร $l_{1a}, l_{1b}, l_{1,ag}$ คือ stator leakage inductance ตัวแปร $r_{2a}, r_{2b}, r_{2,ag}$ คือ rotor resistance ที่ย้ายมาทางด้านสเตเตอร์ตัวแปร $l_{2a}, l_{2b}, l_{2,ag}$ คือ rotor leakage inductance ที่ย้ายมาทางด้านสเตเตอร์ตัวแปร L_{Ma}, L_{Mb}, L_{Mag} คือ magnetizing inductance ตัวแปร S_a, S_b, S_{ag} คือ ค่า Slip และตัวอักษร a, b, ag คือการแสดงถึงมอเตอร์ IMa, IMb, IMag ตามลำดับ ในการวิเคราะห์เราจะสมมติว่าค่าของตัวแปรของวงจรสมมูลในรูปที่ 1(ก) ได้มาจากข้อมูลจากการทดสอบหรือข้อมูลจากการออกแบบโดยได้มาจากมอเตอร์ ค่าของตัวแปรวงจรสมมูลใน

รูปที่ 1(ข) สามารถกำหนดได้โดยการเปรียบเทียบกับผลรวมของค่าความต้านทานของวงจรสมมูลนี้กับในรูปที่ 1(ก)โดยพิจารณาเงื่อนไขการทำงาน 2 เงื่อนไขนั่นคือ no-load และ locked-rotor

ที่สภาวะการทำงานแบบ no-load ค่า Slip ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส IMa, IMb และ IMag จะประมาณว่าเท่ากับ 0 นั่นคือ $S_a \approx 0, S_b \approx 0$ และ $S_{ag} \approx 0$ ภายใต้เงื่อนไขนี้ผลรวมของค่าความต้านทานเมื่อมองจากทางด้านเข้าของวงจรในรูปที่ 1(ก) จะได้

$$Z_{a,n} = \frac{(r_{1a} + j\omega L_{1a})(r_{1a} + j\omega L_{1a})}{(r_{1a} + r_{1a}) + j\omega(L_{1a} + L_{1a})} \quad (1)$$

ที่ซึ่ง ω คือแหล่งจ่ายความถี่เชิงมุมและ

$$L_{1a} = l_{1a} + L_{Ma} \quad (2)$$

$$L_{1b} = l_{1b} + L_{Mb} \quad (3)$$

จะได้ผลรวมค่าความต้านทานของวงจรในรูปที่ 1(ข) เป็น

$$Z_{a,n} = r_{1,n} + j\omega L_{1,n} \quad (4)$$

ที่ซึ่ง

$$L_{1,n} = l_{1,n} + L_{M,n} \quad (5)$$

เนื่องจาก $Z_{a,n}$ ในสมการที่ (4) ควรจะมีค่าเท่ากับ $Z_{ab,n}$ ในสมการที่(1)จะได้

$$r_{1,n} = \frac{r_{1a}(r_{1a} + \omega^2 L_{1a}^2) + r_{1b}(r_{1b} + \omega^2 L_{1b}^2)}{(r_{1a} + r_{1b}) + \omega^2(L_{1a} + L_{1b})} \quad (6)$$

$$L_{1,n} = \frac{L_{1a}(r_{1a} + \omega^2 L_{1a}^2) + L_{1b}(r_{1b} + \omega^2 L_{1b}^2)}{(r_{1a} + r_{1b}) + \omega^2(L_{1a} + L_{1b})} \quad (7)$$

ที่สภาวะการทำงานแบบ locked-rotor ค่า Slip ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส IMa, IMb และ IMag จะมีค่าที่เท่ากันนั่นคือ $S_a = S_b = S_{ag} = 1$ ภายใต้เงื่อนไขนี้ทำให้ค่า rotor impedance ของมอเตอร์ที่แสดงในรูปที่ 1(ก) และรูปที่ 1(ข) จะมีค่าน้อยกว่าค่า magnetizing reactance ดังนั้นผลรวมของค่าความต้านทานของวงจรในรูปที่ 1(ก) จะเป็น

$$Z_{a,m} = \frac{(r_s + j\omega L_s)(r_s + j\omega L_s)}{r_s + r_s + j\omega(L_s + L_s)} \quad (8)$$

ที่ซึ่ง

$$r_s = r_{1a} + r_{2a} \quad (9)$$

$$r_s = r_{1b} + r_{2b} \quad (10)$$

$$L_s = l_{1a} + l_{2a} \quad (11)$$

$$L_s = l_{1b} + l_{2b} \quad (12)$$

ผลรวมค่าความต้านทานของวงจรในรูปที่ 1(ข) จะเป็น

$$Z_{eq,lock} = r_{eq} + j\omega L_{eq} \quad (13)$$

ที่ซึ่ง

$$r_{eq} = r_{1,eq} + r_{2,eq} \quad (14)$$

$$L_{eq} = L_{1,eq} + L_{2,eq} \quad (15)$$

เนื่องจาก $Z_{ab,lock}$ ในสมการที่ (13) ควรจะมีค่าเท่ากับ $Z_{ab,lock}$ ในสมการที่ (8) จะได้

$$r_{eq} = \frac{r_1(r_2' + \omega' L_2') + r_2(r_1' + \omega' L_1')}{(r_1 + r_2)' + \omega'(L_1 + L_2)} \quad (16)$$

$$L_{eq} = \frac{L_1(r_2' + \omega' L_2') + L_2(r_1' + \omega' L_1')}{(r_1 + r_2)' + \omega'(L_1 + L_2)} \quad (17)$$

ค่า rotor resistance $r_{2,eq}$ ของการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะได้มาจากสมการที่ (6) และสมการที่ (16) ดังนี้

$$r_{2,eq} = r_{eq} - r_{1,eq} \quad (18)$$

การหาค่า leakage inductance $L_{1,eq}$ และ $L_{2,eq}$ ของการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะใช้การประมาณว่า $L_{1a} \approx L_{2a}$ และ $L_{1b} \approx L_{2b}$ เช่นเดียวกันคือจะสมมุติว่า $L_{1,eq}$ มีค่า

ประมาณว่าเท่ากับ $L_{2,eq}$ นั่นคือ $L_{1,eq} \approx L_{2,eq}$ ภายใต้เงื่อนไขนี้ เราจะสามารถแยกผลรวมของค่าความเหนี่ยวนำ $L_{1,eq}$ ในสมการที่ (17) ให้เป็น $L_{1,eq}$ และ $L_{2,eq}$ ได้ดังนี้

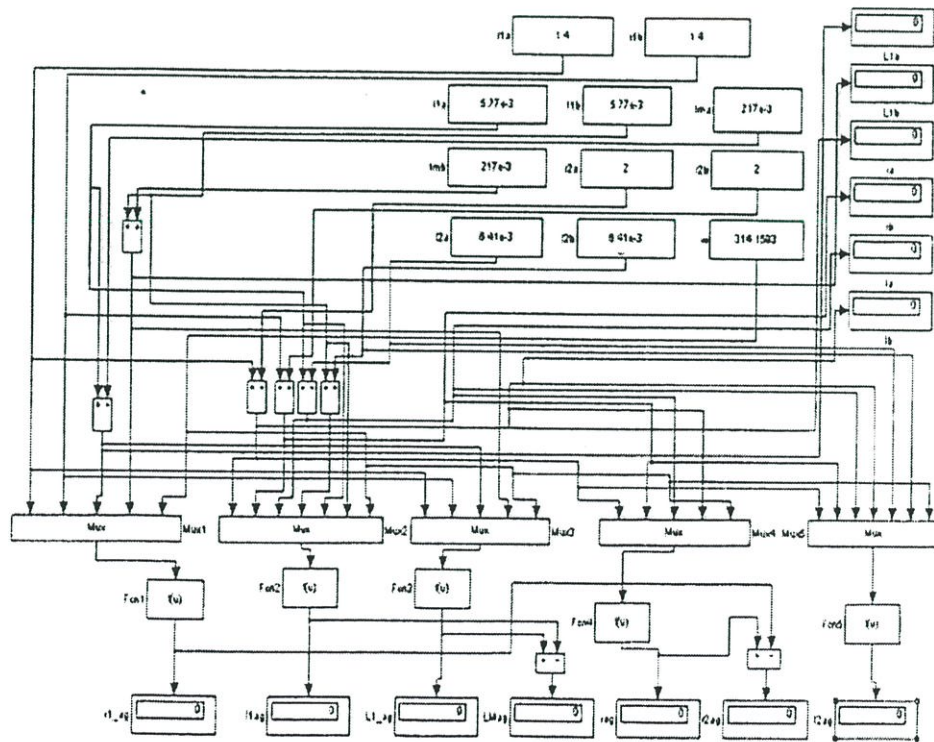
$$L_{1,eq} = \frac{L_1(r_2' + \omega' L_2') + L_2(r_1' + \omega' L_1')}{(r_1 + r_2)' + \omega'(L_1 + L_2)} \quad (19)$$

$$L_{2,eq} = \frac{L_2(r_1' + \omega' L_1') + L_1(r_2' + \omega' L_2')}{(r_1 + r_2)' + \omega'(L_1 + L_2)} \quad (20)$$

ค่า magnetizing inductance $L_{M,eq}$ ของการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้มาจากการนำค่า $L_{1,eq}$ ในสมการที่ (7) มาทำการลบออกด้วยค่า $L_{1,eq}$ ในสมการที่ (19)

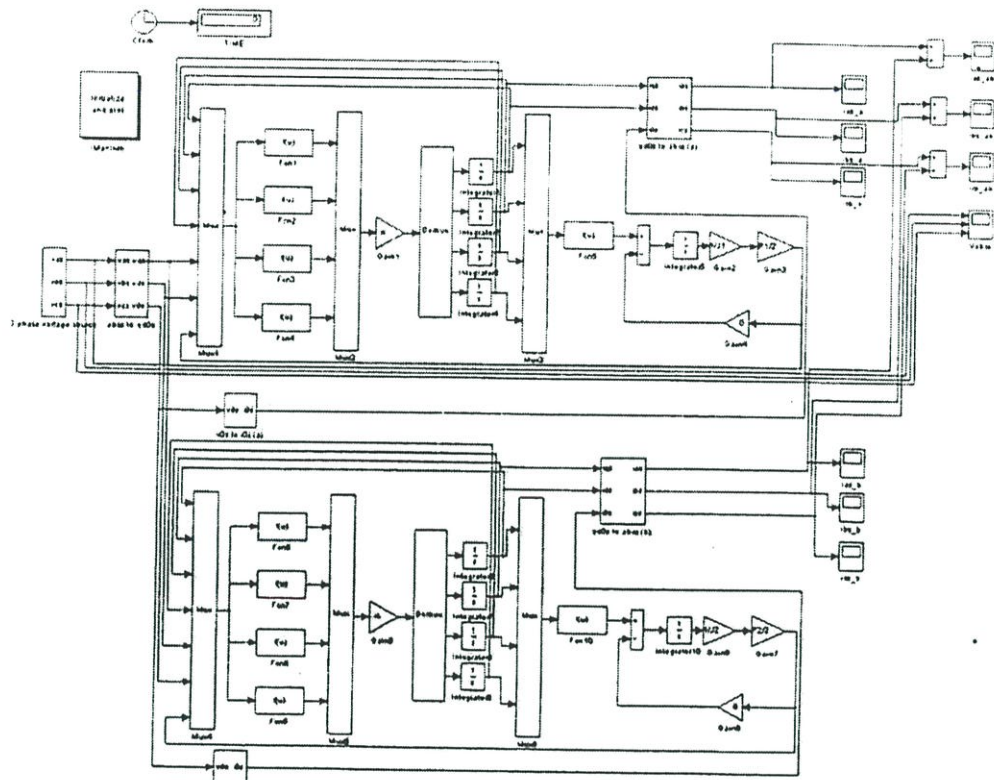
$$L_{M,eq} = L_{1,eq} - L_{1,eq} \quad (21)$$

จากสมการที่ (6), (18), (19), (20) และ (21) จะได้ค่าตัวแปรของวงจรสมมูลย์ในรูปที่ 1(ข) และจะสามารถคำนวณหาค่าต่างๆของการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้เมื่อมีคุณลักษณะการทำงานในสภาวะ steady-state ซึ่งเมื่อนำมาเขียนเป็นแบบจำลองโดยอาศัย MATLAB/SIMULINK จะได้ดังรูปที่ 2 และ 3

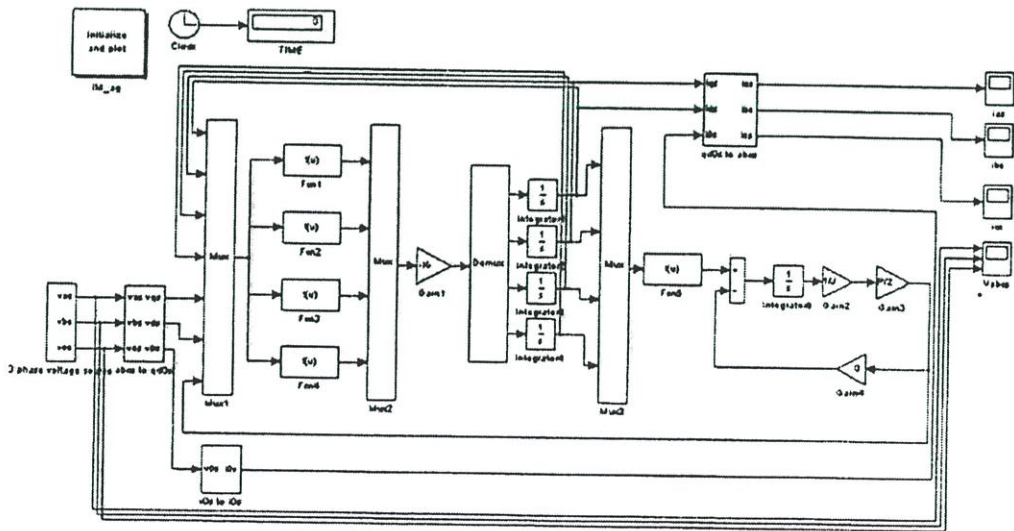


รูปที่ 2 แบบจำลองการหาค่าตัวแปรวงจรสมมูลย์การรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

3. แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

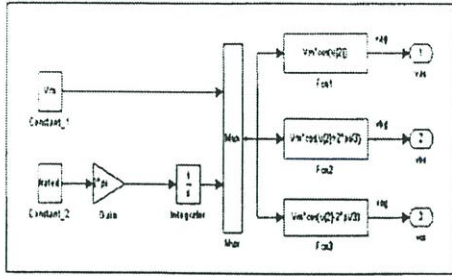


(ก) แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ยังไม่รวมกลุ่มกัน

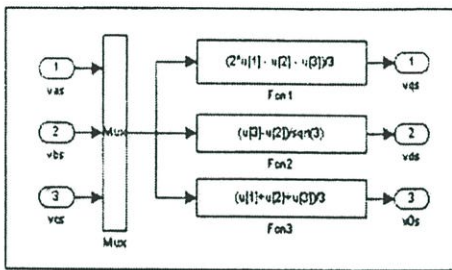


(ข) แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำที่รวมกลุ่มกัน

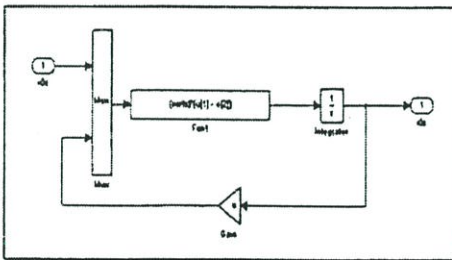
รูปที่ 3 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ยังไม่รวมกลุ่มกัน และแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำที่รวมกลุ่มกัน



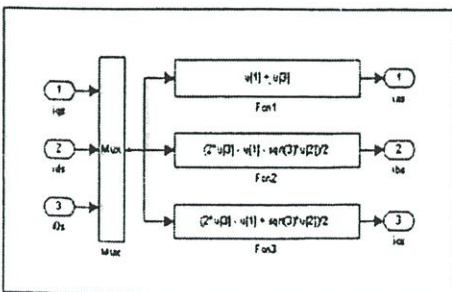
รูปที่ 4 แบบจำลองสำหรับแหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส



รูปที่ 5 แบบจำลองสำหรับการแปลงจากแรงดันสามเฟสเป็นแรงดัน qd0



รูปที่ 6 แบบจำลองสำหรับกระแส 0 ค้านสเตเตอร์



รูปที่ 7 แบบจำลองสำหรับการแปลงจากกระแส qd0 เป็นกระแสสามเฟสด้านสเตเตอร์

สมการที่ใช้เขียนแบบจำลอง

$$i_{ds} = \frac{R_r L_m i_{ds} - \omega_r L_m i_{qs} - R_r L_m i_{dr} - \omega_r L_m i_{qr} - L_r v_{ds}}{a_p}$$

$$i_{qs} = \frac{\omega_r L_m i_{ds} + R_r L_m i_{qs} + \omega_r L_m i_{dr} - R_r L_m i_{qr} - L_r v_{qs}}{a_p}$$

$$i_{dr} = \frac{R_r L_m i_{ds} - \omega_r L_m i_{qs} - R_r L_m i_{dr} - \omega_r L_m i_{qr} - L_r v_{dr}}{a_p}$$

$$i_{qr} = \frac{\omega_r L_m i_{ds} + R_r L_m i_{qs} + \omega_r L_m i_{dr} - R_r L_m i_{qr} - L_r v_{qr}}{a_p}$$

$$a_p = L_m^2 - L_r L_s$$

$$T_s = \frac{3}{2} (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr})$$

ตารางที่ 1 ค่าต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการวิเคราะห์ [2]

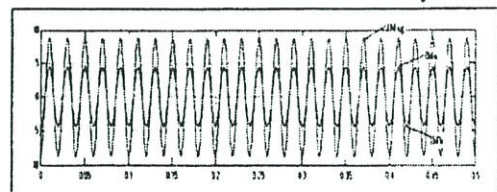
		IM _a	IM _b	IM _{ag}
Ratings:				
OutputPower	P _n [Kw]	3.7	3.7	7.4
Voltage	V _l [V]	380	380	380
Frequency	f [Hz]	50	50	50
Number of Poles	p	6	6	6
Parameters:				
Resistances	r ₁ [Ω]	1.40	1.40	0.70
	r ₂ [Ω]	2.00	2.00	1.00
Inductances	l ₁ [mH]	5.77	5.77	2.885
	l ₂ [mH]	6.41	6.41	3.205
	L _M [mH]	217	217	108.5
Inertia Constant	H [S]	1.23	1.23	1.23

IMa คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสตัวที่ 1

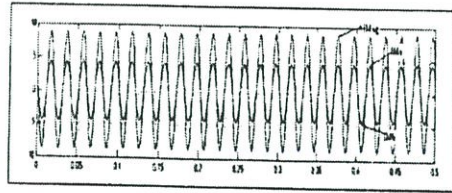
IMb คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสตัวที่ 2

IMag คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่รวมกลุ่มกัน

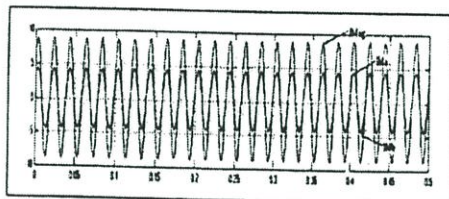
4. ผลลัพธ์จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์



(ก) กระแส ไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์เฟส a

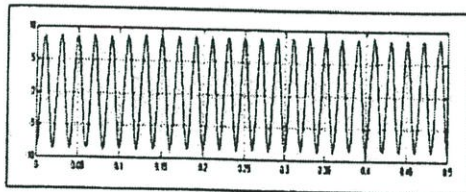


(ข) กระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์เฟส b

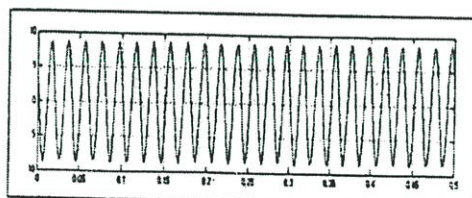


(ค) กระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์เฟส c

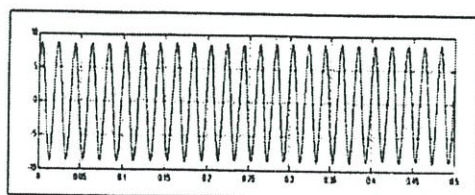
รูปที่ 8 กระแสไฟฟ้าสามเฟสทางด้านสเตเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ยังไม่รวมกลุ่มกัน



(ก) กระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์เฟส a



(ข) กระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์เฟส b



(ค) กระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์เฟส c

รูปที่ 9 กระแสไฟฟ้าสามเฟสทางด้านสเตเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำที่รวมกลุ่มกัน

5. สรุป

ในส่วนของงานวิจัยที่ได้นำเสนอในครั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่กลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้แบบจำลองที่ยังไม่รวมกลุ่มกันกับแบบจำลองการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งการวิเคราะห์แบบจำลองที่ยังไม่รวมกลุ่มกันกับทางด้านแบบจำลองการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสของงานวิจัยที่นำเสนอในครั้งนี้ได้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์ ทั้งนี้การทดสอบต่างๆเหล่านี้จะสมมุติว่าอยู่ในสภาวะ steady-state

จากรูปกราฟที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่ารูปกราฟกระแสไฟฟ้าสามเฟสทางด้านสเตเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ยังไม่รวมกลุ่มกันกับรูปกราฟกระแสไฟฟ้าสามเฟสทางด้านสเตเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำที่รวมกลุ่มกันมีความใกล้เคียงกัน (เปรียบเทียบจาก รูปที่ 8 กับรูปที่ 9) เป็นผลให้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่นำเสนอมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ในการศึกษาการทำงานของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อรวมกันอยู่ได้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P.Pillay, S.M.A. Sabur and M.M. Haq, "A model for induction motor aggregation for power system studies", Electric Power Systems Research 42, 1997 pp. 225-228
- [2] T.Kataoka, H. Uchida, S. Nishikata, T.Kai and T.Funabashi, "A Method for Aggregation of a Group of Induction Motor Loads" POWERCON, 2000 Proceedings Perth Australia, pp. 1683-1688
- [3] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab / Simulink", Prentice Hall, 1998
- [4] Scott Wade, Matthew W. Dunnigan, and Barry W. Williams, "Modeling and Simulation of Induction Machine Vector Control with Rotor Resistance Identification", IEEE TRANSACTION ON POWER ELECTRONICS, VOL. 12, NO. 3, MAY 1997, pp. 495-506



การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25

25th Electrical Engineering Conference (EECON - 25)



21-22 พฤศจิกายน 2545

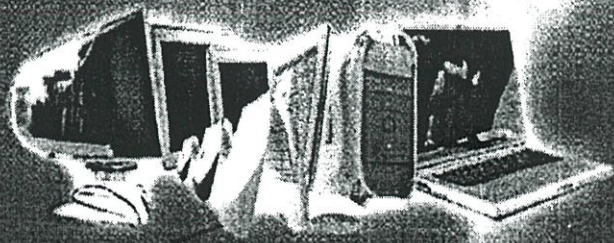
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

สาขาความ

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)

ดำเนินการจัดการประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



สาขาไฟฟ้ากำลัง

รหัสบทความ	ชื่อบทความ	หน้า
PW01	การจำลองกระแสขณะเริ่มหมุนสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ Simulation of Starting Current for a Group of Induction Motors ไพสิฐ ภีรมย์ธรรม อานันท์วัฒน์ คุณากร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	1
PW02	เทคนิคการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยไม่ต้องจับยึดโรเตอร์ A Technique of Three-Phase Induction Motors Parameter Test without Blocking the Rotor เปรมศักดิ์ ปรีชา พิษิต สายธง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	6
PW03	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไม่สมดุล Analysis of the Efficiency of Induction Motor Under Abnormal Voltage Conditions. วิชุด มั่งมีชัย พิษิต สายธง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	11
PW04	การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากการวัดแรงดันและกระแสลาร์ท Identification of Induction Motor Parameters from Starting Voltages and Currents ธรรมาฤทธิ์ สิงห์วิสัย พนวกฤกษ์ เศรษฐกุล สมชาย ฉัตรรัตน์ มหาวิทยาลัยมหิดล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	16
PW05	การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริทึม Optimal Design of Small Transformers Using Genetic Algorithms ธีรพล โพธิ์หงษ์วิวัฒน์ วีระศักดิ์ วงศ์วิวัติ ชัยวุฒิ ฉัตรฤกษ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	21
PW06	การทำนายคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งานจริง โดยใช้วิธีอัลกอริทึมพันธุ Prediction of Induction Motor Field Operating Performances Using Genetic Algorithm ต่อพงษ์ ภูมิภาค สุนัน หนองเหล็ก ชัยวุฒิ ฉัตรฤกษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	26

การจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ Simulation of Starting Current for a Group of Induction Motors

ไพสิฐ ภริมย์ธรรม อานันท์วัฒน์ คุณากร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนน จลนกรุง แขวง ลาดกระบัง เขต ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร. (02)9146800-6 ต่อ 1902 E-mail: pp_paisit@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นกรนำเสนอการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อใช้สำหรับการหาค่ากระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ การจำลองจะใช้แบบจำลองการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในบทความจะแสดงรายละเอียดของสมการต่างๆที่ใช้ในแบบจำลอง และแบบจำลองจะถูกสร้างขึ้นบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK การทดสอบในบทความนี้ทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในหลายขนาดด้วยกัน โดยที่ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองมีความแม่นยำเป็นที่น่าพอใจเมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้มาจากการวัด

Abstract

This paper presents computer simulations for determining the starting current of a group of induction motors. The simulations are based on an aggregation model for induction motors. Equations used in the model are detailed. The model is implemented using MATLAB/SIMULINK. Tests are performed on various sizes of induction motors. It is found that the simulations give satisfactory results, compared with those obtained from measurements.

Keyword: Induction motors, Aggregation models, Starting current

1. คำนำ

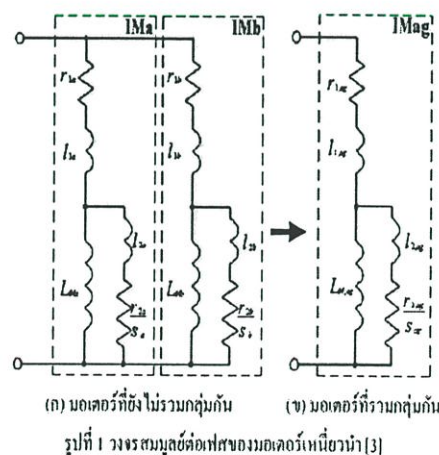
กระแสขณะเริ่มต้นหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดเหนี่ยวนำโดยทั่วไปจะมีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่ปกติ [1] จึงทำให้ได้มีการศึกษาการจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อนำไปใช้ในการตั้งค่านำส่วนของระบบป้องกันต่างๆในระบบไฟฟ้าเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหาย และเนื่องจากการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นจำนวนมากทำให้ได้มีการศึกษาแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังและเมื่อในความเป็นจริงจะมีมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นจำนวนมากที่ค่อนข้างรวมกันอยู่ที่บัสหนึ่งๆของระบบไฟฟ้ากำลังดังนั้นจึงจะไม่ใช่การวิเคราะห์ระบบกับแบบจำลองแต่

ละตัวของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่จะใช้การวิเคราะห์แบบจำลองสภาวะการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำแทนซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าโดยวิธีการสำหรับวิเคราะห์สภาวะการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีผู้นำเสนอหลายแบบดังเช่น [2, 3] โดยแต่ละบทความจะแตกต่างกันที่สมการที่นำมาวิเคราะห์

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองใช้คอมพิวเตอร์และการวัดจริง เพื่อพิจารณาถึงกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอาศัยแบบจำลองการรวมกลุ่ม การทดสอบจะทดสอบด้วยวิธี Direct on Line Starting ในส่วนของค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองของการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้นำเสนอในบทความนี้สามารถหาค่ามาได้จากการทดสอบและสมการต่างๆ [3] โดยที่ในบทความนี้จะเป็นการพิจารณาเฉพาะกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวน 2 ตัวที่ต่ออยู่ในบัสเดียวกันแบบจำลองที่นำเสนอจะอ้างอิงมาจาก [4, 5] ซึ่งถือได้ว่าเป็นแบบจำลองมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการตั้งค่าของระบบป้องกันสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในโรงงานอุตสาหกรรม

2. ตัวแปรต่างๆของการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [3]

2.1 การหาค่าตัวแปรวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



PW

- r_{1a}, r_{1b}, r_{1ag} คือ stator resistance
- l_{1a}, l_{1b}, l_{1ag} คือ stator leakage inductance
- r_{2a}, r_{2b}, r_{2ag} คือ rotor resistance ที่ย้ายมาทางด้านสเตเตอร์
- l_{2a}, l_{2b}, l_{2ag} คือ rotor leakage inductance ที่ย้ายมาทางด้านสเตเตอร์
- L_{Ma}, L_{Mb}, L_{Mag} คือ magnetizing inductance
- S_a, S_b, S_{ag} คือ ค่าสลิป
- ตัวห้อย a, b, ag คือ การแสดงถึงมอเตอร์ IMa, IMb, IMag

วิธีการหาค่าตัวแปรต่างๆของวงจร สมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่รวมกลุ่มกันในรูปที่ 1(ข) สามารถทำได้โดยการพิจารณาเงื่อนไขการทำงาน 2 เงื่อนไขนั่นคือ no-load unblocked-rotor ซึ่งเมื่อพิจารณาเงื่อนไขการทำงาน 2 เงื่อนไขนี้แล้ว จะทำให้ได้สมการที่สามารถหาค่าตัวแปรต่างๆของวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่รวมกลุ่มกันได้ดังนี้

$$r_s = r_{1a} + r_{2a} \tag{1}$$

$$r_b = r_{1b} + r_{2b} \tag{2}$$

$$l_s = l_{1a} + l_{2a} \tag{3}$$

$$l_b = l_{1b} + l_{2b} \tag{4}$$

$$L_{1a} \quad l_{1a} \quad L_{Ma} \tag{5}$$

$$L_{1b} \quad l_{1b} \quad L_{Mb} \tag{6}$$

$$r_{1ag} = \frac{r_{1a}(r_{1b}^2 + \omega^2 L_{1b}^2) + r_{1b}(r_{1a}^2 + \omega^2 L_{1a}^2)}{(r_{1a} + r_{1b})^2 + \omega^2 (L_{1a} + L_{1b})^2} \tag{7}$$

$$l_{1ag} = \frac{l_{1a}(r_{1b}^2 + \omega^2 L_{1b}^2) + l_{1b}(r_{1a}^2 + \omega^2 L_{1a}^2)}{(r_{1a} + r_{1b})^2 + \omega^2 (L_{1a} + L_{1b})^2} \tag{8}$$

$$r_{2ag} = \frac{r_{2a}(r_{2b}^2 + \omega^2 L_{2b}^2) + r_{2b}(r_{2a}^2 + \omega^2 L_{2a}^2)}{(r_{2a} + r_{2b})^2 + \omega^2 (L_{2a} + L_{2b})^2} - r_{1ag} \tag{9}$$

$$l_{2ag} = \frac{l_{2a}(r_{2b}^2 + \omega^2 L_{2b}^2) + l_{2b}(r_{2a}^2 + \omega^2 L_{2a}^2)}{(r_{2a} + r_{2b})^2 + \omega^2 (L_{2a} + L_{2b})^2} \tag{10}$$

$$L_{Mag} = \frac{L_{1a}(r_{1b}^2 + \omega^2 L_{1b}^2) + L_{1b}(r_{1a}^2 + \omega^2 L_{1a}^2)}{(r_{1a} + r_{1b})^2 + \omega^2 (L_{1a} + L_{1b})^2} - l_{1ag} \tag{11}$$

2.2 การหาค่าสลิป

กระบวนการที่ใช้สำหรับการหาค่าสลิป ของวงจรสมมูลการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากรูปที่ 1 (ข) นั้นจะหาได้จากเงื่อนไขของกำลังเอาต์พุตของการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งเมื่อใช้พื้นฐานบนความเท่าเทียมกันของกำลังเอาต์พุตแล้ว จะทำให้ได้สมการการหาค่าสลิป ของวงจรสมมูลการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังนี้

$$P_{ob} = P_{oa} = P_{ab} \tag{12}$$

$$L_{2ag} = l_{2ag} + L_{Mag} \tag{13}$$

$$\alpha = 3\omega^2 r_{2ag}^2 L_{Mag}^2 I_1^2 + \omega^2 \{r_{1ag}^2 L_{2ag}^2 + \omega^2 (L_{1ag} L_{2ag} + L_{Mag}^2)\} P_{ob} \tag{14}$$

$$\beta = -\omega^3 r_{2ag} L_{Mag}^2 (3I_1^2 - 2r_{1ag} P_{ob}) \tag{15}$$

$$\gamma = r_{2ag}^2 L_{Mag}^2 I_1^2 + \omega^2 L_{1ag}^2 P_{ob} \tag{16}$$

$$S_{ag} = \frac{-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha} \tag{17}$$

- ที่ซึ่ง
- P_{oa} คือ กำลังเอาต์พุตของ IMa
- P_{ob} คือ กำลังเอาต์พุตของ IMb
- V_1 คือ แหล่งจ่ายแรงดันเฟส (มีค่าเป็น r.m.s)
- ω คือ แหล่งจ่ายความถี่เชิงมุม

2.3 การหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมากสำหรับการสร้างแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะสามารถหาได้จากกรทดสอบ ซึ่งเมื่อได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัวมาแล้ว ก็จะทำให้สามารถหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ได้โดยใช้สมการดังนี้

$$H_a = \frac{J_a \omega_{no}^2}{2P_{oa}} \tag{18}$$

$$H_b = \frac{J_b \omega_{no}^2}{2P_{ob}} \tag{19}$$

$$H_{ag} = \frac{H_a P_{oa} + H_b P_{ob}}{P_{oa} + P_{ob}} \tag{20}$$

$$P_{oa} \quad P_{ob} \quad P_{ab} \tag{21}$$

$$J_{ag} = \frac{2H_{ag} P_{ag}}{\omega_{no}^2} \tag{22}$$

- ที่ซึ่ง
- P_{oa} คือ พิกัดกำลังเอาต์พุตของ IMa
- P_{ob} คือ พิกัดกำลังเอาต์พุตของ IMb
- J_a คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของ IMa
- J_b คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของ IMb
- J_{ag} คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของ IMag
- ω_{no} คือ ความเร็วเชิงมุมขง โครนัทของโรเตอร์

3. สมการที่ใช้เขียนแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ [4, 5]

แบบจำลองของการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น ถูกสร้างขึ้นบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งวิธีการสร้างแบบจำลองของการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะถูกเขียนขึ้นมาจากสมการต่างๆซึ่งอ้างอิงมาจาก [4, 5] ซึ่งถือได้ว่าเป็นสมการมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.1 สมการแหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส

$$V_m = V_m \cos(\omega_c t) \tag{23}$$

$$V_n = V_m \cos(\omega_c t - \frac{2\pi}{3}) \tag{24}$$

$$V_o = V_m \cos(\omega_c t - \frac{4\pi}{3}) \tag{25}$$

3.2 สมการการแปลงแรงดันสามเฟสเป็นแรงดัน qd0

$$V_q' = \frac{2}{3} V_m - \frac{1}{3} V_n - \frac{1}{3} V_o \tag{26}$$

$$V_d' = \frac{1}{\sqrt{3}} (V_o - V_n) \tag{27}$$

$$V_o = \frac{1}{3} (V_m + V_n + V_o) \tag{28}$$

3.3 สมการการแปลงกระแส qd0 เป็นกระแสสามเฟส

$$i_m = i_q' + i_o \tag{29}$$

$$i_n = -\frac{1}{2} i_q' - \frac{\sqrt{3}}{2} i_d' + i_o \tag{30}$$

$$i_o = -\frac{1}{2} i_q' + \frac{\sqrt{3}}{2} i_d' + i_o \tag{31}$$

3.4 สมการกระแส zero sequence

$$i_o = \frac{\omega_s}{X_n} \int (V_o - i_o r_s) dt \tag{32}$$

3.5 สมการแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$i_d = \frac{R_r L_r i_d - \omega_r L_m i_q - R_r L_m i_d - \omega_r L_r L_m i_q - L_r V_d}{a_0} \tag{33}$$

$$i_q = \frac{\omega_r L_m^2 i_d + R_r L_r i_q + \omega_r L_r L_m i_d - R_r L_m i_q - L_r V_q}{a_0} \tag{34}$$

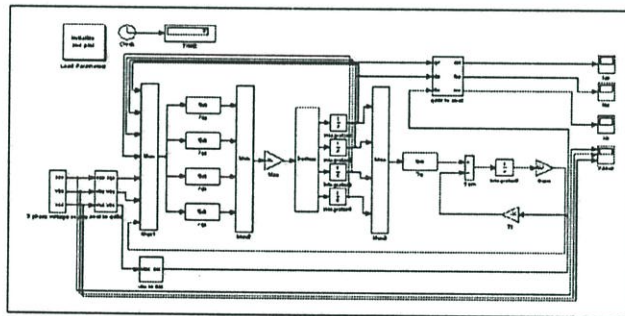
$$i_d = \frac{-R_r L_m i_d - \omega_r L_m L_r i_q - R_r L_r i_d - \omega_r L_r L_m i_q - L_m V_d}{a_0} \tag{35}$$

$$i_q = \frac{\omega_r L_m L_r i_d + R_r L_m i_q + \omega_r L_r L_m i_d - R_r L_r i_q - L_m V_q}{a_0} \tag{36}$$

$$a_0 = L_m^2 - L_r L_r \tag{37}$$

$$T_r = 1.5 p L_m (i_q i_d + i_d i_q) \tag{38}$$

4. แบบจำลองการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [4, 5]

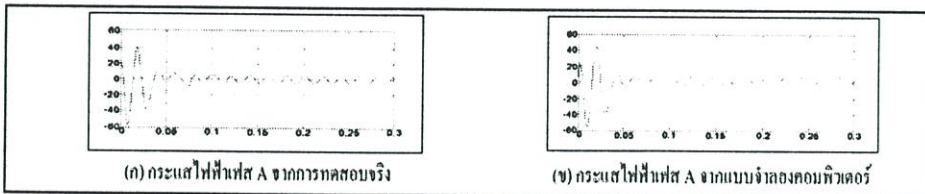


รูปที่ 2 แบบจำลองการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

5. กรณีศึกษา

การทดสอบได้ทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายขนาดด้วยกัน โดยจะได้ทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ติดตั้งอยู่ในปั๊มเสียวิ่งซึ่งในบทความนี้จะแบ่งออกเป็น 3 กรณี โดยค่าข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบจะแสดงในภาคผนวก เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบคือ ANALYZING RECORDER ของ YOKOGAWA รุ่น AR1100A

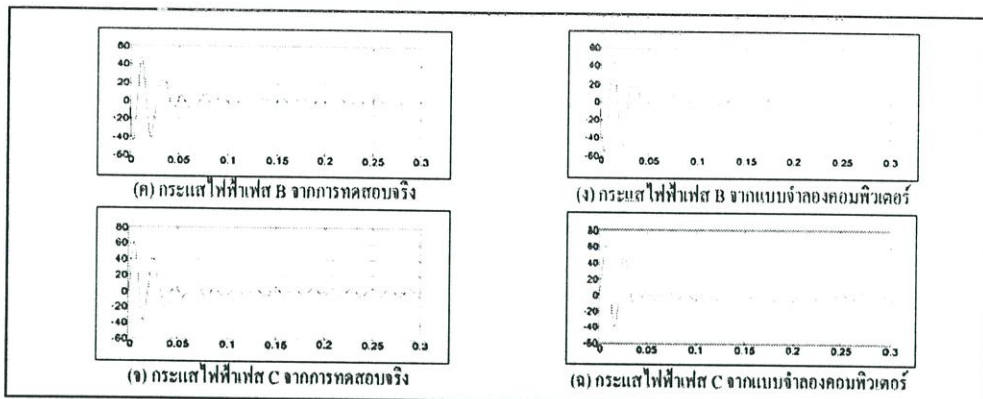
5.1 กรณีที่ 1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 HP และ 1 HP



(ก) กระแสไฟฟ้เฟส A จากกรทดสอบจริง

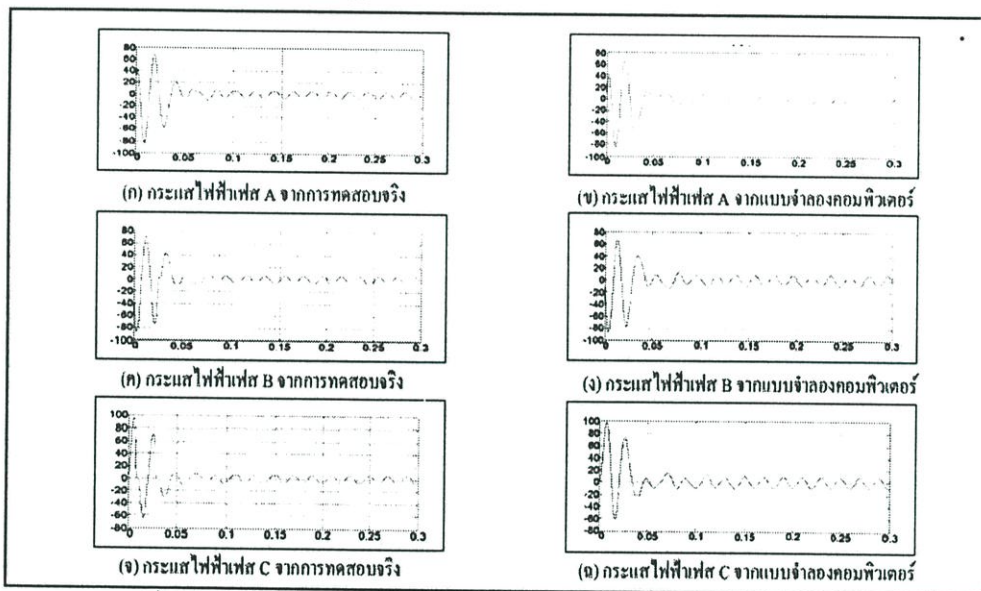
(ข) กระแสไฟฟ้เฟส A จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์





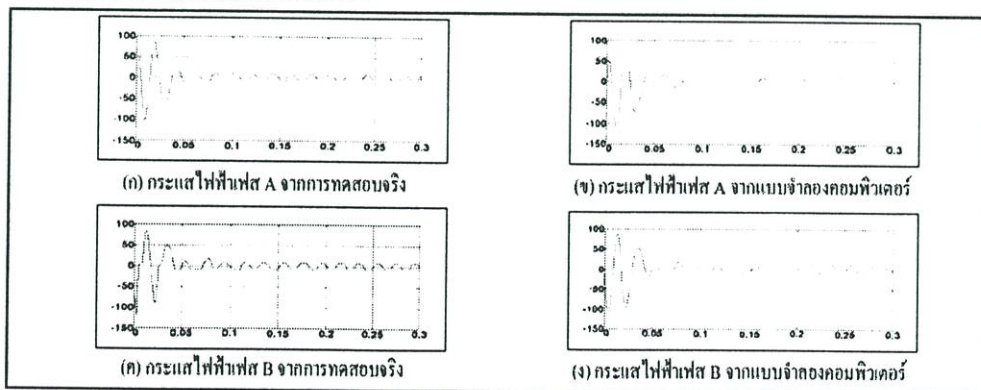
รูปที่ 3 กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุนสามเฟสทางด้านสแตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่รวมกลุ่มกันกรณีที่ 1 (3hp+1hp)

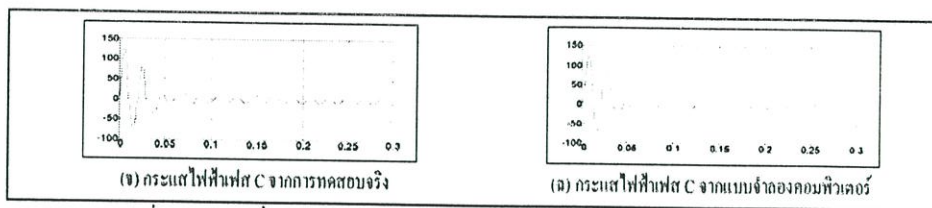
5.2 กรณีที่ 2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 HP และ 1 HP



รูปที่ 4 กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุนสามเฟสทางด้านสแตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่รวมกลุ่มกันกรณีที่ 2 (5hp+1hp)

5.3 กรณีที่ 3 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 HP และ 3 HP





รูปที่ 5 กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุนสามเฟสทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่รวมกลุ่มกันกรณี 3 (5hp+3hp)

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเสมือนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากนั้นทำการเปรียบเทียบลักษณะของกระแสไฟฟ้าขณะเริ่มต้นหมุนที่ไหลเข้าสู่กลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการทดสอบจริงกับผลจากแบบจำลองการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งถูกใช้เขียนโปรแกรม MATLAB-SIMULINK หลักๆ ในบทความจะเป็นกรณีการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะที่ยังไม่ได้รับการต่อโหลดและกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นการต่อขนานกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวที่มีสเกลต่างกัน

จากการพิจารณาผลการจำลองจะเห็นว่ารูปกราฟกระแสไฟฟ้าขณะเริ่มต้นหมุนทั้งสามเฟสทางด้านสเตเตอร์ของแบบจำลองการรวมกลุ่มกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำกับรูปกราฟที่ได้จากการทดสอบจริงมีความใกล้เคียงกัน โดยที่ผลจากการจำลองที่ได้จากบทความนี้จะมีความแตกต่างกับผลที่ได้จากการทดสอบจริงประมาณ 1% - 7% (เปรียบเทียบจาก รูปที่ 3, 4 แลระ) เป็นผลให้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่น่าเสนอมีความน่าเชื่อถือพอที่จะสามารถนำไปใช้ในการทำงานวิชาการในช่วงขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อรวมกันอยู่ได้

ในการพัฒนางานวิจัยลำดับต่อไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทความนี้จะถูกพัฒนาต่อไปเพื่อนำไปใช้ในการศึกษากระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวนมากว่า 2 ตัวบนขั้วเดียวกัน และใช้ในการศึกษาผลกระทบของโหลดและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่มีต่อกระแสขณะเริ่มต้นหมุนจากกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ภาคผนวก

มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1hp : 220/380 V, 3.4/2.0 A, 4 Pole, 50Hz, 1400 rpm
 $R_s = 10.5 \text{ ohms}$, $R_r = 10.1312 \text{ ohms}$, $X_s = 9.8056 \text{ ohms}$,
 $X_r = 9.8056 \text{ ohms}$, $X_M = 216.6351 \text{ ohms}$, $J = 0.0028 \text{ [kg-m}^2\text{]}$
- 3hp : 220/380 V, 8.7/5.0 A, 4 Pole, 50Hz, 1420 rpm
 $R_s = 3.780 \text{ ohms}$, $R_r = 3.2899 \text{ ohms}$, $X_s = 3.8575 \text{ ohms}$,
 $X_r = 3.8575 \text{ ohms}$, $X_M = 81.1024 \text{ ohms}$, $J = 0.0056 \text{ [kg-m}^2\text{]}$
- 5hp : 220/380 V, 13.7/7.9 A, 4 Pole, 50Hz, 1420 rpm
 $R_s = 2.054 \text{ ohms}$, $R_r = 1.9645 \text{ ohms}$, $X_s = 2.0896 \text{ ohms}$,
 $X_r = 2.0896 \text{ ohms}$, $X_M = 55.2515 \text{ ohms}$, $J = 0.0101 \text{ [kg-m}^2\text{]}$
- 3hp+1hp : $R_s = 2.78 \text{ ohms}$, $R_r = 2.506 \text{ ohms}$, $X_s = 2.768 \text{ ohms}$,
 $X_r = 2.768 \text{ ohms}$, $X_M = 59.01 \text{ ohms}$, $J = 0.0084 \text{ [kg-m}^2\text{]}$
- 5hp+1hp : $R_s = 1.736 \text{ ohms}$, $R_r = 1.631 \text{ ohms}$, $X_s = 1.723 \text{ ohms}$,
 $X_r = 1.723 \text{ ohms}$, $X_M = 44.03 \text{ ohms}$, $J = 0.0129 \text{ [kg-m}^2\text{]}$
- 5hp+3hp : $R_s = 1.346 \text{ ohms}$, $R_r = 1.218 \text{ ohms}$, $X_s = 1.355 \text{ ohms}$,
 $X_r = 1.355 \text{ ohms}$, $X_M = 32.88 \text{ ohms}$, $J = 0.0157 \text{ [kg-m}^2\text{]}$

เอกสารอ้างอิง

- [1] S.J. Chapman, "Electric Machinery Fundamentals", McGraw-Hill, 1999
- [2] P.Pillay, S.M.A. Sabur and M.M. Haq, "A model for induction motor aggregation for power system studies", Electric Power Systems Research, November 1996, pp 225-228
- [3] T. Kataoka, H. Uchida, S. Nishikata, T.Kai and T. Funabashi, "A Method for Aggregation of a Group of Induction Motor Loads" POWERCON 2000, Perth, Australia, pp 1683-1688
- [4] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab / Simulink", Prentice Hall, 1998
- [5] S.Wade, M.W.Dunnigan and B.W.Williams, "Modeling and Simulation of Induction Machine Vector Control with Rotor Resistance Identification", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.12, No.3, MAY 1997, pp. 495-506

ประวัติผู้เขียน



ไทธิวุฒิ วิรุธธรรม สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยม) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



อนันท์วัฒน์ คุณากร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยม) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, M.Sc (Electrical Power Engineering) จาก University of Manchester Institute of Science and Technology, และ Ph.D (Electrical Engineering) จาก Heriot-Watt University ปัจจุบันรับราชการในตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ประวัติผู้เขียน

นายไพสิฐ ภิรมย์ธรรม เกิดเมื่อวันที่ 26 ตุลาคม 2522 ที่จังหวัดอ่างทอง แต่มีภูมิลำเนาที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยาและจังหวัดสระบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (เกียรตินิยม อันดับ 2) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปีการศึกษา 2543 และในปีการศึกษา 2544 ได้เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีผลงานวิจัยทางวิชาการทางด้านการศึกษากลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ และได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ผลงานวิจัยทางวิชาการขณะกำลังศึกษามีดังนี้

1. ไพสิฐ ภิรมย์ธรรม, อานันท์วัฒน์ คุณากร “แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ” วิศวกรรมลาดกระบังปีที่ 18 ฉบับที่ 4 เดือน ธันวาคม 2544 หน้า 85-90
2. ไพสิฐ ภิรมย์ธรรม, อานันท์วัฒน์ คุณากร “การจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25 (EECON-25) 21-22 พฤศจิกายน 2545 หน้า PW1-PW5

ประสบการณ์ทำงาน เริ่มทำงานที่การไฟฟ้านครหลวง ตั้งแต่ พ.ศ. 2545 จนถึงปัจจุบัน ในตำแหน่ง วิศวกรไฟฟ้า แผนกบำรุงรักษาระบบจำหน่าย กองบริการการจำหน่าย การไฟฟ้านครหลวงเขตบางใหญ่