

แบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอรียูนิตสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

PER UNIT AGGREGATION MODEL FOR A GROUP OF
INDUCTION MOTORS

ทีปกร บุญญัตนพรัตน์

TEEPAKORN BUNYATNOPARAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

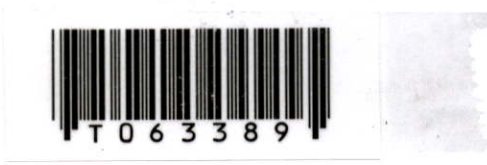
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2202-9

แบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอรฺยูนิตสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

PER UNIT AGGREGATION MODEL FOR A GROUP OF
INDUCTION MOTORS



ทีปกร บัญญัตินพรัตน์
TEEPAKORN BUNYATNOPARAT

ฉพ.
ท5332
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 63389
วัน,เดือน,ปี 28 ส.ค. 2549

b. 11635133
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2202-9

**PER UNIT AGGREGATION MODEL FOR A GROUP OF
INDUCTION MOTORS**

TEEPAKORN BUNYATNOPARAT

**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**

2006

ISBN 974-15-2202-9

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิตสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
นักศึกษา	นายทีปกร บัญญัตินพรัตน์
รหัสประจำตัว	47060217
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. อานันท์วัฒน์ ฤณากร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิตสำหรับแทนภาระไฟฟ้าประเภทกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่เชื่อมต่ออยู่ในบัสเดียวกัน ตัวแปรทั้งหมดของแบบจำลองหาได้โดยอาศัยพื้นฐานการทดสอบขณะไม่มีภาระและการทดสอบชัตโรเตอร์ และพัฒนาให้สามารถใช้ในการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำในรูปแบบทั่วไปทั้งที่มีความเร็วเชิงโคโรนัสเท่ากันและแตกต่างกัน การวิเคราะห์ระบบแกน d-q ภายใต้กรอบอ้างอิงต่าง ๆ ถูกนำมาใช้ในการทำนายผลตอบสนองในสภาวะชั่วขณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการรวมกลุ่มด้วยการนำไปใช้จำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัด จากนั้น นำแบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้ไปใช้จำลองผลตอบสนองพลวัตของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems และโปรแกรม PSCAD/EMTDC พบว่าแบบจำลองการรวมกลุ่มที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องเป็นที่ยอมรับได้ และนำไปใช้ประโยชน์ในการสร้างแบบจำลองภาระไฟฟ้าเพื่อใช้ในการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังได้

Thesis Title	Per Unit Aggregation Model for a Group of Induction Motors
Student	Mr. Teepakorn Bunyatneparat
Student ID.	47060217
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Anantawat Kunakorn

ABSTRACT

This thesis presents a per unit aggregation model for representing a group of three-phase induction motor loads connected at the same bus. All parameters of the model are derived based on no load tests and block rotor tests with the development for a generalized aggregation of induction motors with similar and different synchronous speeds. The d-q axis analysis with various reference frames is used for predicting transient responses of the three-phase induction motors. The validity of the model is verified by simulating the starting current due to a group of induction motors using MATLAB/SIMULINK compared with measurements. The per unit aggregation model, then, is used to analyse dynamic responses due to induction motor loads using MATLAB/SimPowerSystems and PSCAD/EMTDC. It is found that the proposed aggregation model gives acceptably accurate results and will be useful for load modelling techniques in power system studies.

กิติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากความกรุณาของ รศ. ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาของการศึกษา ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่าน ที่ได้ถ่ายทอดและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ. พิชิต ถ้ายอง ที่ให้ความกรุณาในการใช้อุปกรณ์ เครื่องมือทดสอบ และห้องปฏิบัติการในการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ขอขอบคุณ คุณธนาพันธุ์ แสนสุข และคุณประสิทธิ์ภาพ ปัญญาพันธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบวัดกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ขอขอบคุณ คุณอรรถพล เก้าพิทักษ์กุล และคุณพันธิร ชินบุตร ที่คอยให้คำแนะนำต่าง ๆ ตลอดช่วงระยะเวลาของการศึกษา

ขอขอบคุณ คุณเอกภพ โอตาการ เพื่อนที่คอยให้ความช่วยเหลือในการติดต่อส่งแบบฟอร์ม คำร้อง และเอกสารรายงานต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สำหรับคุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่บิดามารดา ซึ่งเป็นที่รัก ครูอาจารย์ที่เคารพ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ทีปกร บัญญัตินพรัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย	4
1.6 ขั้นตอนการศึกษา	5
บทที่ 2 แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	6
2.1 สมการแรงดันของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	6
2.1.1 สมการแรงดันของสเตเตอร์	6
2.1.2 สมการแรงดันของโรเตอร์	7
2.2 แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำบนระบบ 2 แกน (d-q axis).....	7
2.2.1 สมการแรงดัน	8
2.2.1.1 สมการแรงดันของสเตเตอร์	8
2.2.1.2 สมการแรงดันของโรเตอร์	8
2.2.2 เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ	8
2.2.2.1 เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำของสเตเตอร์	8
2.2.2.2 เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำของโรเตอร์	8
2.2.3 ความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์	10
2.2.3.1 ความเหนี่ยวนำตัวเอง	10
2.2.3.2 ความเหนี่ยวนำร่วมของสเตเตอร์และโรเตอร์	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.3.3 ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์	10
2.2.4 การแปลงในระบบ 2 แกนเพื่อให้ค่าคงที่ของความเหนี่ยวนำ.....	11
2.3 การแปลงจาก 3 เฟสเป็น 2 เฟส	13
2.4 แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงอิสระ	15
2.4.1 ความเป็นมาเกี่ยวกับกรอบอ้างอิง	16
2.4.2 แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงอิสระ	17
2.4.3 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า	18
2.5 แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงอื่น ๆ	19
2.5.1 แบบจำลองพลวัตในกรอบอ้างอิงสเตเตอร์	20
2.5.2 แบบจำลองพลวัตในกรอบอ้างอิงโรเตอร์	20
2.5.3 แบบจำลองพลวัตในกรอบอ้างอิงซิงโครนัส	21
2.6 แบบจำลองแบบเปอร์ยูนิตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	21
บทที่ 3 แบบจำลองการรวมกลุ่มสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	25
3.1 บทนำ	25
3.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	25
3.3 การหาตัวแปรต่าง ๆ ของวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	26
3.3.1 การทดสอบขณะไม่มีภาระ (No-Load Test)	26
3.3.2 การทดสอบยึดโรเตอร์ (Block-Rotor Test)	26
3.4 วงจรสมมูลเปอร์ยูนิตของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ	27
3.4.1 กลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะไม่มีภาระ	28
3.4.2 กลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะยึดโรเตอร์	29
3.5 การคำนวณแบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิต	31
3.5.1 ขั้นตอนในการคำนวณแบบจำลองการรวมกลุ่ม	31
3.5.2 ตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองการรวมกลุ่ม	32
3.5.2.1 ความต้านทานเปอร์ยูนิตของสเตเตอร์ ($\bar{R}_{s,ag}$)	32
3.5.2.2 ความต้านทานเปอร์ยูนิตของโรเตอร์ที่ย้ายมาทาง ด้านสเตเตอร์ ($\bar{R}_{r,ag}$)	32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.2.3	รีแอกแตนซ์รั่วไหลเปอร์ยูนิตของสเตเตอร์ ($\bar{X}_{ls,ag}$) และโรเตอร์ ($\bar{X}_{lr,ag}$)	32
3.5.2.4	รีแอกแตนซ์กระตุ้นแม่เหล็กเปอร์ยูนิต ($\bar{X}_{m,ag}$)	33
3.6	สมการอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง	33
3.6.1	สมการกำลังพิกัดของการรวมกลุ่ม	33
3.6.2	สมการจำนวนขั้วแม่เหล็กรวมของการรวมกลุ่ม	33
3.6.3	สมการโมเมนต์ความเฉื่อยของการรวมกลุ่ม	34
3.6.4	สมการค่า slip ของการรวมกลุ่ม	35
3.6.5	เกณฑ์ในการรวมกลุ่ม	37
3.7	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับทดสอบแบบจำลองการรวมกลุ่ม	37
3.7.1	สมการการแปลงแรงดันสามเฟสเป็นแรงดัน qd0	38
3.7.2	สมการกระแส dq	38
3.7.3	สมการกระแสลำดับศูนย์	38
3.7.4	สมการแรงบิด	38
3.7.5	สมการความเร็วรอบ	39
3.7.6	สมการการแปลงกระแส qd0 เป็นกระแสสามเฟส	39
3.7.7	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่สร้างโดยใช้โปรแกรม MATLAB/ SIMULINK	39
บทที่ 4	การทดสอบแบบจำลองการรวมกลุ่ม	40
4.1	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	40
4.1.1	มอเตอร์เหนี่ยวนำ	40
4.1.2	เครื่องมือวัด	41
4.2	ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	41
4.3	วิธีการทดสอบ	42
4.3.1	กรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความเร็วเชิงโรตัสเท่ากัน	42
4.3.2	กรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความเร็วเชิงโรตัสแตกต่างกัน	42
4.4	ผลการทดสอบ	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.1 ผลการทดสอบกรณีที่ 1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase A)	44
4.4.2 ผลการทดสอบกรณีที่ 1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase B)	45
4.4.3 ผลการทดสอบกรณีที่ 1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase C)	46
4.4.4 ผลการทดสอบกรณีที่ 2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase A)	47
4.4.5 ผลการทดสอบกรณีที่ 2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase B)	48
4.4.6 ผลการทดสอบกรณีที่ 2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase C)	49
4.4.7 ผลการทดสอบกรณีที่ 3 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า มีภาระทางกล (Phase A)	50
4.4.8 ผลการทดสอบกรณีที่ 3 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า มีภาระทางกล (Phase B)	51
4.4.9 ผลการทดสอบกรณีที่ 3 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า มีภาระทางกล (Phase C)	52
4.4.10 ผลการทดสอบกรณีที่ 4 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW และ 3.7 kW (Phase A)	53
4.4.11 ผลการทดสอบกรณีที่ 4 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW และ 3.7 kW (Phase B)	54
4.4.12 ผลการทดสอบกรณีที่ 4 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW และ 3.7 kW (Phase C)	55
4.4.13 ผลการทดสอบกรณีที่ 5 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase A)	56
4.4.14 ผลการทดสอบกรณีที่ 5 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase B)	57

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.15 ผลการทดสอบกรณีที่ 5 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase C)	58
4.4.16 ผลการทดสอบกรณีที่ 6 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase A)	59
4.4.17 ผลการทดสอบกรณีที่ 6 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase B)	60
4.4.18 ผลการทดสอบกรณีที่ 6 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase C)	61
4.5 กรณีศึกษาสภาวะพลวัต	62
4.5.1 ผลตอบสนองพลวัตเนื่องจากแรงดันตกทันทีทันใด [9]	63
4.5.2 ผลตอบสนองพลวัตเนื่องจากการเปิดวงจรชั่วขณะ [4]	67
4.6 สรุปผลการทดสอบ	71
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	72
5.1 สรุปผลการวิจัย	72
5.2 ข้อเสนอแนะ	74
เอกสารอ้างอิง	75
ภาคผนวก ก. ส่วนประกอบของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับจำลอง กระแสขณะเริ่มต้นหมุน	77
ภาคผนวก ข. ตัวอย่าง M-File สำหรับคำนวณแบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิต	85
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	88
ประวัติผู้เขียน	101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การกระจายค่ารีแอกแตนต์ชั่วโหลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละชนิด [10]	32
4.1 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ	41
4.2 เปรียบเทียบค่าสูงสุด (peak) ของกระแสขณะเริ่มต้นหมุน	62
4.3 เปรียบเทียบค่ากระแสในสภาวะอยู่ตัว (steady state)	62
4.4 เปรียบเทียบค่าคงที่เวลา (time constant)	62
4.5 ค่าพิกัดและตัวแปรต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรณีศึกษาแรงดันตกทันทีทันใด	63
4.6 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองการรวมกลุ่มในกรณีศึกษาแรงดันตกทันทีทันใด	64
4.7 ค่าพิกัดและตัวแปรต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรณีศึกษาการเปิดวงจรชั่วขณะ	67
4.8 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองการรวมกลุ่มในกรณีศึกษาการเปิดวงจรชั่วขณะ	68

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การวางขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส6
2.2	ขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 เฟส7
2.3	การแปลงตัวแปรของโรเตอร์จริงไปยังโรเตอร์เสมือน11
2.4	ขดลวดสเตเตอร์ 2 เฟสและ 3 เฟส14
2.5	กรอบอ้างอิงสเตเตอร์และกรอบอ้างอิงอิสระ17
3.1	วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ25
3.2	วงจรสมมูลต่อเฟสขณะไม่มีภาระ26
3.3	วงจรสมมูลต่อเฟสขณะยึดโรเตอร์27
3.4	มอเตอร์เหนี่ยวนำ N ตัวต่อขนานบนบัสเดียวกัน27
3.5	วงจรสมมูลเปอร์ยูนิตต่อเฟสของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ N ตัว28
3.6	วงจรสมมูลเปอร์ยูนิตต่อเฟสของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ N ตัวในขณะไม่มีภาระ28
3.7	วงจรสมมูลเปอร์ยูนิตต่อเฟสของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ N ตัวในขณะยึดโรเตอร์30
3.8	วงจรสมมูลเปอร์ยูนิตต่อเฟสโดยใช้ทฤษฎีเทวิน35
3.9	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK39
4.1	มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ40
4.2	Power analyzer รุ่น PZ4000 ที่ใช้ในการทดสอบ41
4.3	การต่ออุปกรณ์ในการทดสอบ43
4.4	กระแสที่ได้จากการวัดจริง [17] กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase A)44
4.5	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase A)44
4.6	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase A)44
4.7	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase A)44
4.8	กระแสที่ได้จากการวัดจริง [17] กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase B)45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.37	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า มีภาระทางกล (Phase C)52
4.38	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า มีภาระทางกล (Phase C)52
4.39	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า มีภาระทางกล (Phase C)52
4.40	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองแยกแต่ละตัว กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW และ 3.7 kW (Phase A)53
4.41	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW และ 3.7 kW (Phase A)53
4.42	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW และ 3.7 kW (Phase A)53
4.43	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW และ 3.7 kW (Phase A)53
4.44	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองแยกแต่ละตัว กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW และ 3.7 kW (Phase B)54
4.45	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW และ 3.7 kW (Phase B)54
4.46	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW และ 3.7 kW (Phase B)54
4.47	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW และ 3.7 kW (Phase B)54
4.48	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองแยกแต่ละตัว กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW และ 3.7 kW (Phase C)55
4.49	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW และ 3.7 kW (Phase C)55
4.50	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW และ 3.7 kW (Phase C)55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.65	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase A)59
4.66	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase A)59
4.67	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase A)59
4.68	กระแสที่ได้จากการวัดจริง กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase B)60
4.69	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase B)60
4.70	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase B)60
4.71	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase B)60
4.72	กระแสที่ได้จากการวัดจริง กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase C)61
4.73	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase C)61
4.74	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase C)61
4.75	กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase C)61
4.76	ระบบทดสอบที่ใช้ศึกษาผลตอบสนองพลวัตเนื่องจากแรงดันตกทันทีทันใด [9]63
4.77	แบบจำลองสถานะแรงดันตกทันทีทันใดโดยใช้โปรแกรม MATLAB/ SimPowerSystems64
4.78	แบบจำลองสถานะแรงดันตกทันทีทันใดโดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC64
4.79	ผลตอบสนอง P,Q ที่ได้จากการวัด [9]65
4.80	ผลตอบสนอง P,Q ที่ได้จากแบบจำลองแบบ third order [9]65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.81	ผลตอบสนอง P,Q ที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดย MATLAB/ SimPowerSystems65
4.82	ผลตอบสนอง P,Q ที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดย PSCAD/EMTDC65
4.83	ผลตอบสนอง P,Q ที่ได้จากการวัด [9] (ขยายในช่วง 0.4 วินาที)66
4.84	ผลตอบสนอง P,Q ที่ได้จากแบบจำลองแบบ third order [9] (ขยายในช่วง 0.4 วินาที)66
4.85	ผลตอบสนอง P,Q ที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดย MATLAB/ SimPowerSystems66
4.86	ผลตอบสนอง P,Q ที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดย PSCAD/EMTDC66
4.87	ระบบทดสอบที่ใช้ศึกษาผลตอบสนองพลวัตเนื่องจากการเปิดวงจรชั่วขณะ67
4.88	แบบจำลองสถานะการเปิดวงจรชั่วขณะ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/ SimPowerSystems68
4.89	แบบจำลองสถานะการเปิดวงจรชั่วขณะ โดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC68
4.90	กระแส phase A ที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มของ [4]69
4.91	กระแส phase A จากแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดย MATLAB/ SimPowerSystems69
4.92	กระแส phase A จากแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดย PSCAD/EMTDC69
4.93	แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มของ [4]70
4.94	แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าจากแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดย MATLAB/SimPowerSystems70
4.95	แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าจากแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดย PSCAD/EMTDC70

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในระบบไฟฟ้ากำลังมีการะไฟฟ้าหลายประเภท การสร้างแบบจำลองของภาระไฟฟ้าเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งในการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมในสถานะชั่วขณะหรือพฤติกรรมพลวัตของระบบ เช่น การคำนวณกระแสลัดวงจร การวิเคราะห์เสถียรภาพ เป็นต้น ในภาคอุตสาหกรรมมีการะไฟฟ้าประเภทมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับภาระไฟฟ้าประเภทอื่น ๆ และผลตอบสนองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำเหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมในสถานะชั่วขณะของทั้งระบบ จึงจำเป็นต้องหาแบบจำลองภาระไฟฟ้าที่มีความถูกต้องสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความเชื่อถือได้ การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ในปัจจุบันมักจะใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งในทางปฏิบัติ การวิเคราะห์ระบบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัวเป็นสิ่งที่ไม่สะดวกและอาจต้องใช้เวลามาก ดังนั้นจึงได้มีแนวความคิดในการสร้างแบบจำลองสมมูลหนึ่งหน่วยขึ้นมาใช้แทนกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานอยู่ด้วยกันในระบบ และแบบจำลองนี้รู้จักกันในชื่อ “แบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ” จนถึงปัจจุบันนี้ นักวิจัยหลายคนได้เสนอวิธีการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายวิธีและแบบจำลองการรวมกลุ่มหลายแบบซึ่งมีความยุ่งยากซับซ้อนและความถูกต้องแตกต่างกัน อย่างเช่น วงจรสมมูล third order [1] , วงจรสมมูลรวมกับ static load [2] , Thevenin Theorem [3] เป็นต้น ซึ่งวิธีการเหล่านี้อยู่ในรูปแบบที่ยุ่งยาก ถึงแม้ว่าในภายหลังได้มีการพัฒนาจนได้วิธีการที่ง่ายขึ้นกว่าเดิมโดยใช้ Transformer-Type model [4] หรือพิจารณาจากการทดสอบขณะไม่มีภาระและขณะชัต โรเตอร์ [5-7] แต่ก็ยังมีข้อจำกัด คือ ตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มเป็นค่าจริงซึ่งไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมักจะแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบเปอร์ยูนิต และสามารถใช้ในการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำได้เฉพาะในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัวมีความเร็วเชิงโคโรนัสเท่ากันเท่านั้น

วิทยานิพนธ์นี้ได้มีการนำเสนอแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจำนวน N ตัวที่ต่อขนานอยู่บนบัสเดียวกัน โดยอาศัยพื้นฐานของการทดสอบขณะไม่มีภาระและการทดสอบชัต โรเตอร์ [5-7] มาใช้ในการสร้างสมการในรูปแบบทั่วไปสำหรับหาตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองการรวมกลุ่มซึ่งทำการวิเคราะห์ในแบบเปอร์ยูนิต ตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มจึงเป็นค่าเปอร์ยูนิตซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน นอกจากนี้ ยังทำการพัฒนาให้แบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิตที่ได้สามารถนำไปใช้ในการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งในกรณีที่มีความเร็วเชิงโคโรนัสเท่ากันและกรณีที่มีความเร็วเชิงโคโรนัสแตกต่างกันได้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาเพื่อสร้างแบบจำลองการรวมกลุ่มซึ่งเป็นแบบจำลองภาวะไฟฟ้าแทนกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษา ดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองภาวะไฟฟ้าประเภทมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวน N ตัวที่ต่อขนานอยู่บนบัสเดียวกันโดยใช้วิธีการรวมกลุ่ม
2. เพื่อศึกษาวิธีการคำนวณหาตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองการรวมกลุ่มและตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง
3. เพื่อศึกษาและพัฒนาแบบจำลองการรวมกลุ่มให้อยู่ในรูปแบบเปอร์ยูนิตที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน
4. เพื่อศึกษาและพัฒนาแบบจำลองการรวมกลุ่มให้สามารถรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรณีที่มีความเร็วเชิงโรตัสแตกต่างกัน
5. เพื่อศึกษาแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK
6. เพื่อทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการรวมกลุ่มโดยนำไปใช้จำลองกระแสขณะเริ่มต้นเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัด
7. เพื่อนำแบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้ไปใช้จำลองพฤติกรรมในสภาวะชั่วขณะของระบบไฟฟ้าที่เป็นกรณีศึกษาโดยการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems และโปรแกรม PSCAD/EMTDC
8. สามารถใช้แบบจำลองการรวมกลุ่มในการศึกษาและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีภาวะไฟฟ้าประเภทกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อขนานอยู่บนบัสเดียวกัน

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การสร้างแบบจำลองการรวมกลุ่มสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้การพิจารณาบนพื้นฐานของการทดสอบขณะไม่มีภาระและการทดสอบชัต โรเตอร์ที่อ้างอิงมาจาก [5-7] ซึ่งเป็นวิธีการในลักษณะเดียวกันกับการหาจรรยาสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และมีการพัฒนาให้กลายเป็นแบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิตและใช้ในการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีความเร็วเชิงโรตัสแตกต่างกันได้ สมมติฐานของการศึกษามีดังต่อไปนี้ คือ

1. แบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้รับการพัฒนาแล้วให้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ออกมาเป็นค่าเปอร์ยูนิตมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ศึกษาและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งโดยทั่วไปมักจะแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบเปอร์ยูนิต

2. แบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้รับการพัฒนาแล้วสามารถนำไปใช้ในการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำในรูปแบบทั่วไปทั้งที่มีความเร็วเชิงโคโรนัสเท่ากันและแตกต่างกัน
3. แบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้รับการพัฒนาแล้วให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบจริงและผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองโดยใช้แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัว

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษาและทำการวิจัยเกี่ยวกับแบบจำลองภาระไฟฟ้าของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำได้รับความสนใจและมีการศึกษามาเป็นเวลานานพอสมควร ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ได้มาจากการศึกษางานวิจัยที่เคยมีการนำเสนอมาก่อนหน้านี้ คือ

ปี พ.ศ. 2519 (ค.ศ. 1976) M.M. Abdel Hakim และ G.J. Berg [1] นำเสนอการแทนกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวน 2 ตัวโดยใช้วงจรสมมูลแบบประมาณที่ไม่คิดความต้านทานของสเตเตอร์หรือ third order model แล้วนำไปศึกษาผลตอบสนองพลวัตของระบบเนื่องจากการรบกวนแรงดันของแหล่งจ่าย

ปี พ.ศ. 2527 (ค.ศ. 1984) Graham J. Rogers, John Di Manno และ Robert T.H. Alden [2] นำเสนอเทคนิคสำหรับสร้างแบบจำลองภาระไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมโดยการแทนกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งหมดและภาระไฟฟ้าอื่น ๆ ด้วยวงจรสมมูลของมอเตอร์เพียงตัวเดียวที่เชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าแบบอิมพีแดนซ์คงที่หรือ static load เพื่อนำไปศึกษาเสถียรภาพในสภาวะชั่วขณะและกำลังไฟฟ้า เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัสและการเกิดฟอลต์

ปี พ.ศ. 2537 (ค.ศ. 1994) M. Taleb, M. Akbaba และ E.A. Abdullah [3] นำเสนอวิธีการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ Thevenin Theorem แล้วนำไปศึกษาผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าเนื่องจากแรงดันของแหล่งจ่ายลดลงชั่วขณะ

ปี พ.ศ. 2540 (ค.ศ. 1997) P. Pillay, S.M.A. Sabur และ M.M. Haq [4] นำเสนอแบบจำลองการรวมกลุ่มสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานกัน โดยพัฒนามาจากวงจรสมมูลแบบ Transformer-type แล้วนำไปศึกษาผลของกระแสและแรงบิดของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวน 5 ตัวเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากผลรวมของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัวและผลที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่ม

ปี พ.ศ. 2543 (ค.ศ. 2000) T. Kataoka, H. Uchida, S. Nishikata, T.Kai และ T. Funabashi [5] นำเสนอวิธีการรวมกลุ่มภาระไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำในกรณีที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 ตัวต่อขนานอยู่บนบัสเดียวกัน แล้วนำไปศึกษาผลของกระแสและกำลังไฟฟ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันของแหล่งจ่าย

ปี พ.ศ. 2545 (ค.ศ. 2002) ไพสิฐ ภิรมย์ธรรม และอนันต์วัฒน์ คุณากร [6] นำเสนอการศึกษากระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้แบบจำลองการรวมกลุ่มเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และผลที่ได้จากการวัดจริง แต่มีข้อจำกัดคือ มอเตอร์เหนี่ยวนำที่นำมารวมกลุ่มจะต้องมีความเร็วเชิงโรตัสเท่ากัน

ปี พ.ศ. 2547 (ค.ศ. 2004) วิมลภ สุวรรณเวช และอนันต์วัฒน์ คุณากร [7] นำเสนอการประมาณค่ากระแสลัดวงจรเนื่องจากกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้แบบจำลองการรวมกลุ่มเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากผลรวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัวและผลที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC แต่มีข้อจำกัดคือ มอเตอร์เหนี่ยวนำที่นำมารวมกลุ่มจะต้องมีความเร็วเชิงโรตัสเท่ากัน

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อหาวิธีการรวมกลุ่มและสร้างแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวน N ตัวที่ต่อขนานอยู่บนบัสเดียวกันให้อยู่ในรูปแบบเปอร์ยูนิต โดยอาศัยแนวความคิดที่พิจารณาเพิ่มเติมมาจาก [5-7] ซึ่งเป็นวิธีการที่อยู่ในรูปแบบที่ง่ายและพัฒนาให้สามารถใช้ในการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำกรณีที่มีความเร็วเชิงโรตัสแตกต่างกันได้ แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการรวมกลุ่มสร้างโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งใช้สมการของแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำจาก [11-13] โดยทำการเปลี่ยนตัวแปรให้อยู่ในรูปแบบเปอร์ยูนิตภายใต้กรอบอ้างอิงต่าง ๆ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองการไฟฟ้าแทนกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานอยู่บนบัสเดียวกัน โดยจะกล่าวถึงวงจรสมมูลของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ วิธีการหาตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองการรวมกลุ่ม สมการที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองการรวมกลุ่มและตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง การทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการรวมกลุ่ม และการนำแบบจำลองการรวมกลุ่มไปใช้ศึกษาสถานะพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลัง

การทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการรวมกลุ่ม ทำโดยการทดสอบหากระแสขณะเริ่มต้นหมุนด้วยวิธี direct-on-line ของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีพิกัด 380 V, 50 Hz ขนาด 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า ที่มีขั้วแม่เหล็ก 4 poles และมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ที่มีขั้วแม่เหล็ก 6 poles และสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ทำการจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรณีต่าง ๆ โดยพิจารณาที่กรอบอ้างอิงแตกต่างกัน เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลอง

การนำแบบจำลองการรวมกลุ่มไปใช้ศึกษาสถานะพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลัง ทำโดยเลือกกรณีศึกษาที่เกี่ยวข้องกับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ใน IEEE และ

Electric Power System Research ทำการจำลองโดยใช้แบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้จากการศึกษาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนั้น และเปรียบเทียบระหว่างการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems และโปรแกรม PSCAD/EMTDC

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้มีการดำเนินการวิจัยโดยมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. ศึกษาวิธีการรวมกลุ่มและแบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้มีการนำเสนอก่อนหน้านี้
2. สร้างสมการที่ใช้คำนวณหาตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองการรวมกลุ่มในแบบเปอร์ยูนิต
3. พัฒนาแบบจำลองการรวมกลุ่มให้ใช้ได้กับกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีความเร็วเชิง โครนัสแตกต่างกัน
4. สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อใช้จำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุน
5. ทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิตโดยพิจารณาที่กรอบอ้างอิงแบบต่าง ๆ
6. นำแบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิตที่ได้ไปใช้ในกรณีศึกษาสถานะพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลัง

วิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งรายละเอียดออกเป็น 5 บท ดังต่อไปนี้ คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมตริกซ์การแปลงระหว่าง 2 เฟส และ 3 เฟส สมการของแบบจำลองพลวัตแบบเปอร์ยูนิตของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงต่าง ๆ ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองการรวมกลุ่ม รวมทั้งสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับการทดสอบ

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะมีรายละเอียดของวิธีการวิเคราะห์กลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวน N ตัวที่ต่อขนานอยู่บนบัสเดียวกัน การสร้างสมการที่ใช้ในการหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองการรวมกลุ่ม และการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับทดสอบแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการรวมกลุ่มโดยการนำไปจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนด้วยวิธีการ direct on line เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดจริง และการนำแบบจำลองการรวมกลุ่มไปใช้ในตัวอย่างกรณีศึกษาที่เกี่ยวข้องกับสถานะพลวัต

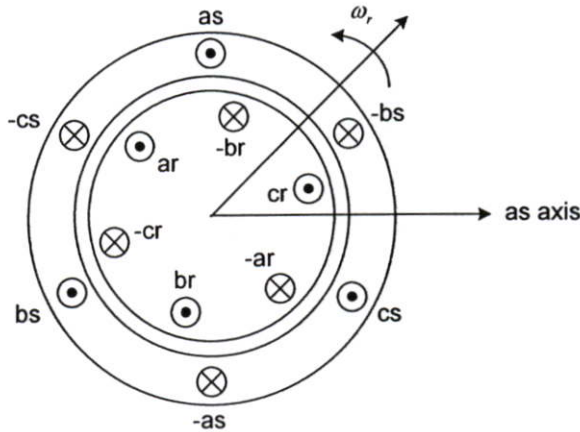
บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะชั่วขณะที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน กระแส ความถี่ และแรงบิดสามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ วิธีการที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์สถานะพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟสคือ การใช้แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบ 2 แกน คือ แกน direct (แกน d) และแกน quadrature (แกน q) โดยทำการแปลงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสให้ไปอยู่ในระบบ 2 แกน แล้วทำการวิเคราะห์บนพิกัดแกน d-q จากนั้นจึงแปลงกลับมาให้อยู่ในรูปมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเช่นเดิม การศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำในวิทยานิพนธ์นี้ นำไปใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ รวมทั้งการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการทดสอบด้วย

2.1 สมการแรงดันของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.1 การวางขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส [11]

พิจารณารูปที่ 2.1 ขดลวดสเตเตอร์แต่ละชุดและขดลวดโรเตอร์แต่ละชุดวางห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า สามารถเขียนสมการแรงดันของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ดังนี้

2.1.1 สมการแรงดันของสเตเตอร์

$$v_{as} = R_s i_{as} + p \lambda_{as} \quad (2.1)$$

$$v_{bs} = R_s i_{bs} + p \lambda_{bs} \quad (2.2)$$

$$v_{cs} = R_s i_{cs} + p \lambda_{cs} \quad (2.3)$$

2.1.2 สมการแรงดันของโรเตอร์

$$v_{ar} = R_r i_{ar} + p\lambda_{ar} \quad (2.4)$$

$$v_{br} = R_r i_{br} + p\lambda_{br} \quad (2.5)$$

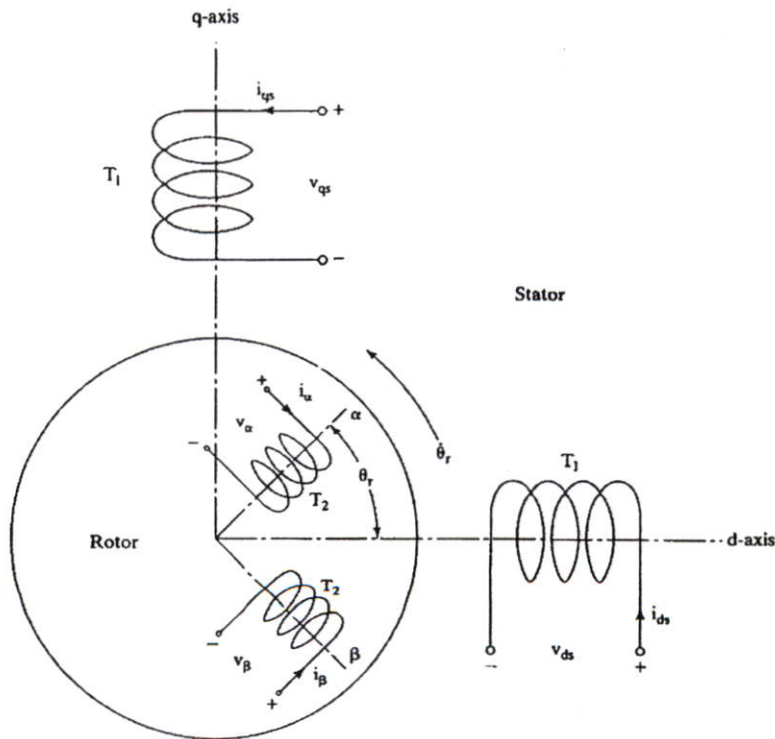
$$v_{cr} = R_r i_{cr} + p\lambda_{cr} \quad (2.6)$$

2.2 แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบ 2 แกน (d-q axis)

การหาแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบ 2 แกน ต้องกำหนดสมมติฐานดังนี้

- 1) ช่องอากาศเป็นแบบสม่ำเสมอ (uniform)
- 2) ขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์เป็นแบบสมดุและมีความถี่แม่เหล็กกระจายเป็นไซน์ (sinusoidal)
- 3) ความเหนี่ยวนำและตำแหน่งของโรเตอร์มีลักษณะเป็นฟังก์ชันไซน์
- 4) ไม่คิดผลของการอิ่มตัวและการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่าง ๆ

พิจารณามอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบ 2 แกนที่มีขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.2 ขดลวดแต่ละขดวางห่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้า ขดลวดสเตเตอร์อยู่บนแกน d และแกน q โดยแกน d นำหน้าแกน q และมีลำดับเฟสเป็น dq ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ขดลวดโรเตอร์ α อยู่ห่างจากขดลวดสเตเตอร์แกน d เป็นมุม θ_r ที่เวลาใด ๆ มีสนามแม่เหล็กหมุนที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากับความเร็วของแหล่งจ่าย และโรเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา จำนวนรอบต่อเฟสของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์เท่ากับ T_1 และ T_2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 ขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบ 2 แกน [12]

2.2.1 สมการแรงดัน

แรงดันที่ขั้วของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์เท่ากับผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน และอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำซึ่งกันเป็นผลคูณของกระแสและความเหนี่ยวนำ

2.2.1.1 สมการแรงดันของสเตเตอร์

$$v_{qs} = R_q i_{qs} + p \lambda_{qs} \quad (2.7)$$

$$v_{ds} = R_d i_{ds} + p \lambda_{ds} \quad (2.8)$$

2.2.1.2 สมการแรงดันของโรเตอร์

$$v_\alpha = R_\alpha i_\alpha + p \lambda_\alpha \quad (2.9)$$

$$v_\beta = R_\beta i_\beta + p \lambda_\beta \quad (2.10)$$

2.2.2 เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ

เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำเป็นผลคูณของกระแสและความเหนี่ยวนำ

2.2.2.1 เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำของสเตเตอร์

$$\lambda_{qs} = L_{qq} i_{qs} + L_{qd} i_{ds} + L_{q\alpha} i_\alpha + L_{q\beta} i_\beta \quad (2.11)$$

$$\lambda_{ds} = L_{dq} i_{qs} + L_{dd} i_{ds} + L_{d\alpha} i_\alpha + L_{d\beta} i_\beta \quad (2.12)$$

2.2.2.2 เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำของโรเตอร์

$$\lambda_\alpha = L_{\alpha q} i_{qs} + L_{\alpha d} i_{ds} + L_{\alpha\alpha} i_\alpha + L_{\alpha\beta} i_\beta \quad (2.13)$$

$$\lambda_\beta = L_{\beta q} i_{qs} + L_{\beta d} i_{ds} + L_{\beta\alpha} i_\alpha + L_{\beta\beta} i_\beta \quad (2.14)$$

นำสมการ (2.11) ถึง (2.14) แทนค่าลงในสมการแรงดันของสเตเตอร์และโรเตอร์ จะได้

$$v_{qs} = R_q i_{qs} + p(L_{qq} i_{qs}) + p(L_{qd} i_{ds}) + p(L_{q\alpha} i_\alpha) + p(L_{q\beta} i_\beta) \quad (2.15)$$

$$v_{ds} = p(L_{dq} i_{qs}) + R_d i_{ds} + p(L_{dd} i_{ds}) + p(L_{d\alpha} i_\alpha) + p(L_{d\beta} i_\beta) \quad (2.16)$$

$$v_\alpha = p(L_{\alpha q} i_{qs}) + p(L_{\alpha d} i_{ds}) + R_\alpha i_\alpha + p(L_{\alpha\alpha} i_\alpha) + p(L_{\alpha\beta} i_\beta) \quad (2.17)$$

$$v_\beta = p(L_{\beta q} i_{qs}) + p(L_{\beta d} i_{ds}) + p(L_{\beta\alpha} i_\alpha) + R_\beta i_\beta + p(L_{\beta\beta} i_\beta) \quad (2.18)$$

เมื่อ

$$p = \text{ตัวดำเนินการอนุพันธ์ } d/dt$$

$$v_{qs} = \text{แรงดันที่ขั้ว (terminal voltage) ของขดลวดสเตเตอร์แกน } q$$

$$v_{ds} = \text{แรงดันที่ขั้ว (terminal voltage) ของขดลวดสเตเตอร์แกน } d$$

$$v_\alpha = \text{แรงดันที่ขั้ว (terminal voltage) ของขดลวดโรเตอร์ } \alpha$$

- v_β = แรงดันที่ขั้ว (terminal voltage) ของขดลวดโรเตอร์ β
 i_{qs} = กระแสของขดลวดสเตเตอร์แกน q
 i_{ds} = กระแสของขดลวดสเตเตอร์แกน d
 i_α = กระแสของขดลวดโรเตอร์ α
 i_β = กระแสของขดลวดโรเตอร์ β
 L_{qq} = ความเหนี่ยวนำตัวเอง (self inductance) ของขดลวดสเตเตอร์แกน q
 L_{dd} = ความเหนี่ยวนำตัวเอง (self inductance) ของขดลวดสเตเตอร์แกน d
 $L_{\alpha\alpha}$ = ความเหนี่ยวนำตัวเอง (self inductance) ของขดลวดโรเตอร์ α
 $L_{\beta\beta}$ = ความเหนี่ยวนำตัวเอง (self inductance) ของขดลวดโรเตอร์ β
 L_{qd} = ความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance) ระหว่างขดลวดสเตเตอร์แกน q และแกน d
 L_{dq} = ความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance) ระหว่างขดลวดสเตเตอร์แกน d และแกน q
 $L_{\alpha\beta}$ = ความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance) ระหว่างขดลวดโรเตอร์ α และ β
 $L_{\beta\alpha}$ = ความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance) ระหว่างขดลวดโรเตอร์ β และ α
 $L_{q\alpha}$ = ความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance) ระหว่างขดลวดสเตเตอร์แกน q และ
 ขดลวดโรเตอร์ α
 $L_{q\beta}$ = ความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance) ระหว่างขดลวดสเตเตอร์แกน q และ
 ขดลวดโรเตอร์ β
 $L_{d\alpha}$ = ความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance) ระหว่างขดลวดสเตเตอร์แกน d และ
 ขดลวดโรเตอร์ α
 $L_{d\beta}$ = ความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance) ระหว่างขดลวดสเตเตอร์แกน d และ
 ขดลวดโรเตอร์ β
 $L_{\alpha q}$ = ความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance) ระหว่างขดลวดโรเตอร์ α และขดลวด
 สเตเตอร์แกน q
 $L_{\alpha d}$ = ความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance) ระหว่างขดลวดโรเตอร์ α และขดลวด
 สเตเตอร์แกน d
 $L_{\beta q}$ = ความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance) ระหว่างขดลวดโรเตอร์ β และขดลวด
 สเตเตอร์แกน q
 $L_{\beta d}$ = ความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance) ระหว่างขดลวดโรเตอร์ β และขดลวด
 สเตเตอร์แกน d

2.2.3 ความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์

2.2.3.1 ความเหนี่ยวนำตัวเอง

ภายใต้สมมติฐานที่กำหนดให้ช่องอากาศเป็นแบบสม่ำเสมอ ความเหนี่ยวนำตัวเองจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งเชิงมุม นั่นคือ ความเหนี่ยวนำตัวเองเป็นค่าคงที่

$$L_{qq} = L_{dd} = L_s$$

$$L_{\alpha\alpha} = L_{\beta\beta} = L_{rr}$$

2.2.3.2 ความเหนี่ยวนำร่วมของสเตเตอร์และโรเตอร์

ความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดสเตเตอร์และความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดโรเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในขดลวดใดขดลวดหนึ่งจะไม่เกี่ยวข้องกับขดลวดขดอื่นที่วางห่างกัน 90 องศา

$$L_{qd} = L_{dq} = 0$$

$$L_{\alpha\beta} = L_{\beta\alpha} = 0$$

2.2.3.3 ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์

ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งโรเตอร์ θ_r โดยเป็นฟังก์ชันไซน์ เนื่องจากสมมติฐานที่กำหนดให้การกระจายของแรงเคลื่อนแม่เหล็กในขดลวดเป็นฟังก์ชันไซน์ โครงสร้างของขดลวดที่สมมาตรกันทำให้ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสเตเตอร์ขดหนึ่งและขดลวดโรเตอร์ขดหนึ่งมีค่าเท่ากันไม่ว่าจะพิจารณาจากสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์หรือจากโรเตอร์ไปยังสเตเตอร์

$$L_{q\alpha} = L_{\alpha q} = L_{sr} \sin \theta_r$$

$$L_{d\alpha} = L_{\alpha d} = L_{sr} \cos \theta_r$$

$$L_{q\beta} = L_{\beta q} = -L_{sr} \cos \theta_r$$

$$L_{d\beta} = L_{\beta d} = L_{sr} \sin \theta_r$$

เมื่อ L_{sr} เป็นค่าสูงสุด (peak) ของความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

แทนค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ลงในสมการ (2.15) ถึง (2.18) ได้ผลลัพธ์เป็นระบบสมการที่มีความเหนี่ยวนำเป็นตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา คือ

$$v_{qs} = (R_s + L_s p)i_{qs} + L_{sr} p(i_\alpha \sin \theta_r) - L_{sr} p(i_\beta \cos \theta_r) \quad (2.19)$$

$$v_{ds} = (R_s + L_s p)i_{ds} + L_{sr} p(i_\alpha \cos \theta_r) + L_{sr} p(i_\beta \sin \theta_r) \quad (2.20)$$

$$v_\alpha = L_{sr} p(i_{qs} \sin \theta_r) + L_{sr} p(i_{ds} \cos \theta_r) + (R_{rr} + L_{rr} p)i_\alpha \quad (2.21)$$

$$v_\beta = -L_{sr} p(i_{qs} \cos \theta_r) + L_{sr} p(i_{ds} \sin \theta_r) + (R_{rr} + L_{rr} p)i_\beta \quad (2.22)$$

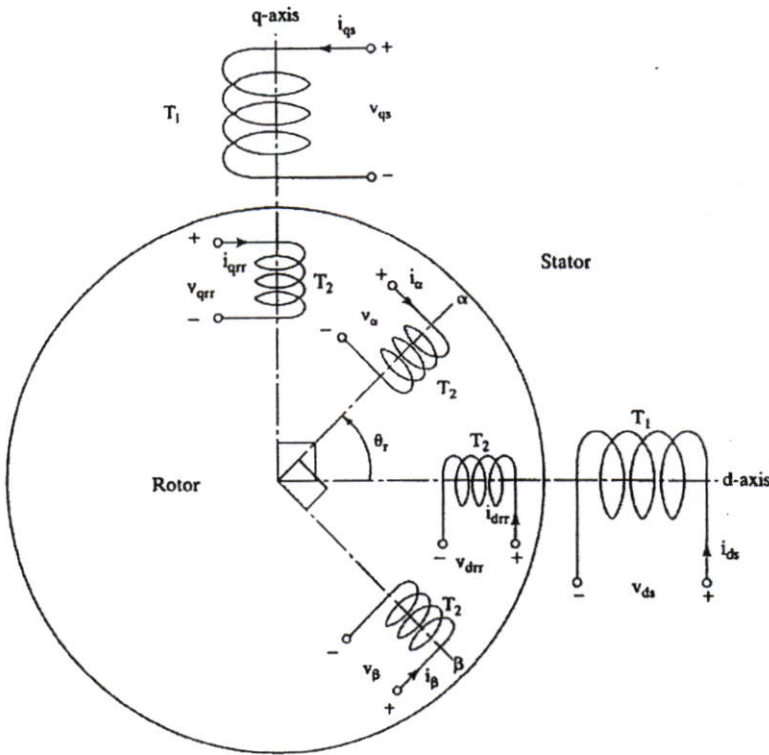
เมื่อ

$$R_s = R_q = R_d$$

$$R_{rr} = R_\alpha = R_\beta$$

เนื่องจากสมการที่ได้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่มีความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งโรเตอร์ ทำให้สมการมีความซับซ้อนยุ่งยากและการหาคำตอบต้องใช้เวลามาก ดังนั้น จึงต้องทำให้สมการอยู่ในรูปที่สามารถหาคำตอบได้ง่ายขึ้น โดยการใช้การแปลง (transformation)

2.2.4 การแปลง (transformation) ในระบบ 2 แกนเพื่อให้ค่าคงที่ของความเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.3 การแปลงตัวแปรของโรเตอร์จริงไปยังโรเตอร์เสมือน [12]

การแปลงให้ความเหนี่ยวนำเป็นค่าคงที่ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งโรเตอร์ ทำได้โดยแทนโรเตอร์จริงด้วยโรเตอร์เสมือนที่อยู่บนแกน d และแกน q ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โรเตอร์เสมือนและโรเตอร์จริงจะต้องมีจำนวนรอบของขดลวดแต่ละเฟสเท่ากันและสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่มีขนาดเท่ากัน นั่นคือ

$$T_2 i_{qrr} = T_2 i_\alpha \sin \theta_r - T_2 i_\beta \cos \theta_r \tag{2.25}$$

$$T_2 i_{drr} = T_2 i_\alpha \cos \theta_r + T_2 i_\beta \sin \theta_r \tag{2.26}$$

เนื่องจากจำนวนรอบของขดลวดแต่ละเฟสเท่ากัน ทำให้สามารถตัดออกจกทั้งสองข้างของสมการได้ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโรเตอร์จริงและกระแสโรเตอร์เสมือน คือ กระแสโรเตอร์เสมือน i_{qrr} และ i_{drr} เท่ากับผลรวมของกระแสโรเตอร์จริง i_α และ i_β ที่ฉายไปยังแกน d และแกน q

$$i_{qrr} = i_\alpha \sin \theta_r - i_\beta \cos \theta_r \quad (2.27)$$

$$i_{drr} = i_\alpha \cos \theta_r + i_\beta \sin \theta_r \quad (2.28)$$

เขียนในรูปเมตริกซ์เป็น

$$\begin{bmatrix} i_{qrr} \\ i_{drr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_r & -\cos \theta_r \\ \cos \theta_r & \sin \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายเป็น

$$i_{qdr} = T_{\alpha\beta} i_{\alpha\beta} \quad (2.30)$$

เมื่อ

$$i_{qdr} = \begin{bmatrix} i_{qrr} & i_{drr} \end{bmatrix}'$$

$$i_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \end{bmatrix}'$$

และ $T_{\alpha\beta}$ เป็นเมตริกซ์การแปลงจากขดลวดโรเตอร์จริง α และ β ไปยังขดลวดโรเตอร์เสมือนที่อยู่บนแกน d และแกน q

$$T_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \sin \theta_r & -\cos \theta_r \\ \cos \theta_r & \sin \theta_r \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

และการแปลงจากขดลวดโรเตอร์เสมือนที่อยู่บนแกน d และแกน q กลับไปยังขดลวดโรเตอร์ α และ β ก็สามารทำได้เช่นเดียวกันโดยใช้ $T_{\alpha\beta}^{-1}$

$$T_{\alpha\beta}^{-1} = T_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \sin \theta_r & -\cos \theta_r \\ \cos \theta_r & \sin \theta_r \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

นำเมตริกซ์การแปลงไปใช้กับกระแสของขดลวด α และ β และแรงดันของโรเตอร์ในสมการ (2.19) ถึง (2.22) จะได้เมตริกซ์ของสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qrr} \\ v_{drr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & 0 & L_{sr} p & 0 \\ 0 & R_s + L_s p & 0 & L_{sr} p \\ L_{sr} p & -L_{sr} \omega_r & R_{rr} + L_{rr} p & -L_{rr} \omega_r \\ L_{sr} \omega_r & L_{sr} p & L_{rr} \omega_r & R_{rr} + L_{rr} p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qrr} \\ i_{drr} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

เมื่อ $\omega_r = d\theta_r / dt$ เป็นอนุพันธ์เทียบกับเวลาของ θ_r

จากนั้น ทำการอ้างอิงสมการของโรเตอร์มายังสเตเตอร์เช่นเดียวกับในกรณีวงจรมวลของหม้อแปลงไฟฟ้า ขั้นตอนนี้ทำให้ขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ในแกน d และแกน q มีการเชื่อมต่อกัน การอ้างอิงพารามิเตอร์และตัวแปรต่าง ๆ ของโรเตอร์ไปยังสเตเตอร์ทำได้ดังนี้

$$R_r = a^2 R_{rr} \quad (2.34)$$

$$L_r = a^2 L_{rr} \quad (2.35)$$

$$i_{qr} = \frac{i_{qrr}}{a} \quad (2.36)$$

$$i_{dr} = \frac{i_{drr}}{a} \quad (2.37)$$

$$v_{qr} = av_{qrr} \quad (2.38)$$

$$v_{dr} = av_{drr} \quad (2.39)$$

$$L_m = aL_{sr} \quad (2.40)$$

เมื่อ a เป็นอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์ต่อขดลวดโรเตอร์

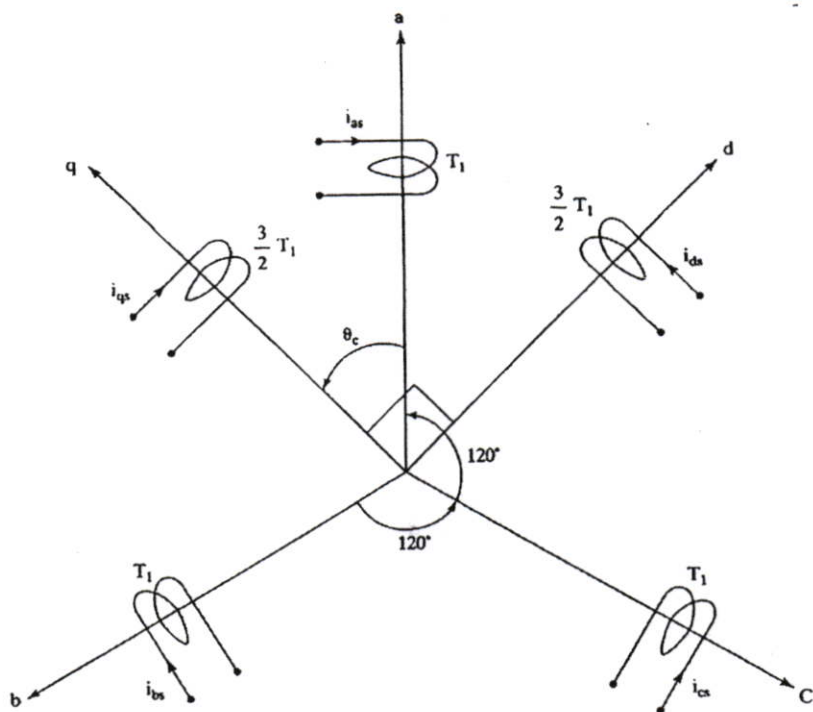
แทนค่าสมการ (2.34) ถึง (2.40) ลงในสมการ (2.33) จะได้สมการของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบ 2 แกนที่อ้างอิงไปยังสเตเตอร์ คือ

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & 0 & L_m p & 0 \\ 0 & R_s + L_s p & 0 & L_m p \\ L_m p & -L_m \omega_r & R_r + L_r p & -L_r \omega_r \\ L_m \omega_r & L_m p & L_r \omega_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

สมการนี้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์แรงดันเท่ากับผลคูณของเมตริกซ์อิมพีแดนซ์กับเมตริกซ์กระแส และสังเกตได้ว่าเมตริกซ์อิมพีแดนซ์มีความเหนี่ยวนำเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งโรเตอร์

2.3 การแปลงจาก 3 เฟสเป็น 2 เฟส

แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสสามารถเปลี่ยนให้เป็นแบบจำลองพลวัตที่อยู่ในพิกัดแกน d - q ได้ด้วยการแปลงจาก 3 เฟสเป็น 2 เฟส ข้อกำหนดสำหรับการแปลงนี้ คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สร้างขึ้นในขดลวด 3 เฟสและขดลวด 2 เฟสต้องมีขนาดเท่ากัน และกระแสมีขนาดเท่ากัน



รูปที่ 2.4 ขดลวดสเตเตอร์ 2 เฟสและ 3 เฟส [12]

พิจารณารูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงขดลวด 3 เฟสและขดลวด 2 เฟส กำหนดให้ขดลวด 3 เฟสมีจำนวน T_1 รอบต่อเฟส และมีกระแสแต่ละเฟสเท่ากัน ขดลวด 2 เฟสจะต้องมีจำนวน $3T_1/2$ รอบต่อเฟส เพื่อให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวดทั้งสองชุดเท่ากัน จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส $dq0$ และ abc ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \cos \left(\theta_c - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_c + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta_c & \sin \left(\theta_c - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta_c + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

เมื่อ i_0 เป็นองค์ประกอบลำดับศูนย์ (zero-sequence component) ซึ่งกำหนดขึ้นมาเพื่อให้เกิดความสมมาตรในการแปลงระหว่าง abc กับ $dq0$

สมการ (2.42) เขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้เป็น

$$i_{qd0} = T_{abc} i_{abc} \quad (2.43)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} i_{qd0} &= [i_{qs} \quad i_{ds} \quad i_0]^t \\ i_{abc} &= [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]^t \end{aligned}$$

และ T_{abc} เป็นเมตริกซ์การแปลงจาก abc ไป $dq0$ นั่นคือ

$$T_{abc} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \cos\left(\theta_c - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_c + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta_c & \sin\left(\theta_c - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_c + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

และการแปลงจาก $dq0$ กลับไป abc ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกันโดยใช้

$$i_{abc} = T_{abc}^{-1} i_{dq0} \quad (2.45)$$

เมื่อ

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

2.4 แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงอิสระ

กรอบอ้างอิง (reference frame) เปรียบเสมือนตำแหน่งของการสังเกต ซึ่งในแต่ละตำแหน่งก็จะให้มุมมองเฉพาะของระบบที่แตกต่างกันช่วยทำให้สมการของระบบอยู่ในรูปแบบที่ง่าย ตัวอย่างเช่น การทำให้ตัวแปรที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันไซน์อยู่ในรูปปริมาณกระแสตรง (dc quantity) เพื่อจุดประสงค์ในการควบคุม ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้กรอบอ้างอิงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากับความเร็วเชิงมุมของแหล่งจ่าย กล่าวคือ ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างกรอบอ้างอิงและแหล่งจ่ายมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่งผลให้สัญญาณที่เป็นฟังก์ชันไซน์เปรียบเสมือนเป็นปริมาณกระแสตรงเมื่อมองจากกรอบอ้างอิง และสามารถระบุจุดดำเนินการได้ด้วยปริมาณกระแสตรงซึ่งนำไปสู่ระบบที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้นรอบ ๆ จุดดำเนินการ ในทำนองเดียวกัน การวิเคราะห์สภาวะพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส การกำหนดกรอบอ้างอิงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากับความเร็วของโรเตอร์ ทำให้ความเหนี่ยวนำที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโรเตอร์กลายเป็นค่าคงที่ ส่งผลให้สมการของระบบจะมีความง่ายและกระชับ

จะเห็นได้ว่า การกำหนดกรอบอ้างอิงมีประโยชน์หลายอย่าง โดยกรอบอ้างอิงจะถูกกำหนดในลักษณะกรอบอ้างอิงอิสระ (arbitrary reference frame) และแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงเฉพาะกรณีสามารถหาได้จากการกำหนดความเร็วของกรอบอ้างอิงอิสระที่เหมาะสมสำหรับกรณีนั้น ๆ โดยเฉพาะ

2.4.1 ความเป็นมาเกี่ยวกับกรอบอ้างอิง [14]

ในช่วงปลายทศวรรษ 1920 R.H. Park ได้เสนอวิธีการรูปแบบใหม่สำหรับการวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยใช้การเปลี่ยนตัวแปร ทำการแทนตัวแปร (แรงดัน, กระแส และเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อย) ที่เกี่ยวข้องกับขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัสด้วยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับขดลวดเสมือนซึ่งหมุนไปพร้อมกับโรเตอร์ หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่า เขาทำการแปลงหรือย้ายตัวแปรของสเตเตอร์ไปยังกรอบที่ยึดติดอยู่กับโรเตอร์ การแปลงของ Park ซึ่งปฏิบัติกรวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้ามีคุณสมบัติเฉพาะในการกำจัดความเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาออกจากสมการแรงดันของเครื่องจักรกลซิงโครนัส

ในช่วงปลายทศวรรษ 1930 H.C. Stanley ใช้การเปลี่ยนตัวแปรในการวิเคราะห์เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ เขาแสดงให้เห็นว่าความเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในสมการแรงดันของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำสามารถกำจัดออกไปได้โดยการเปลี่ยนตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับขดลวดโรเตอร์ (ตัวแปรของโรเตอร์) ให้เป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับขดลวดเสมือนที่อยู่นิ่ง ในกรณีนี้ตัวแปรของโรเตอร์ถูกแปลงไปยังกรอบที่ยึดติดอยู่กับสเตเตอร์

G. Kron ได้เสนอการเปลี่ยนตัวแปรซึ่งกำจัดความเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำแบบสมมาตรด้วยการแปลงทั้งตัวแปรของสเตเตอร์และตัวแปรของโรเตอร์ไปยังกรอบอ้างอิงที่หมุนไปพร้อมกับสนามแม่เหล็กหมุน กรอบอ้างอิงนี้ถูกเรียกว่ากรอบอ้างอิงความเร็วซิงโครนัส

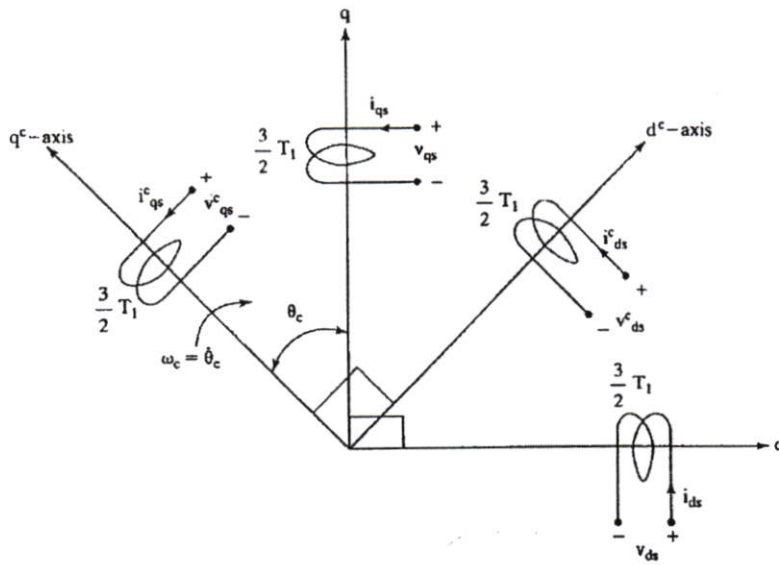
D.S. Brereton และคณะ ใช้การเปลี่ยนตัวแปรกำจัดความเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำแบบสมมาตรด้วยการแปลงตัวแปรของสเตเตอร์ไปยังกรอบอ้างอิงที่ยึดติดอยู่กับโรเตอร์ ซึ่งเป็นการนำการแปลงของ Park มาใช้กับเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ

Park, Stanley, Kron และ Brereton พัฒนาการเปลี่ยนตัวแปรแต่ละแบบให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานเฉพาะแต่ละอย่าง และนำเสนอแยกกันในบทความต่าง ๆ จนกระทั่งปี 1965 มีการบันทึกไว้ว่าการแปลงที่ใช้ในการวิเคราะห์เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำเป็นการแปลงรูปแบบหนึ่งซึ่งกำจัดความเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยการย้ายตัวแปรของสเตเตอร์และโรเตอร์ไปยังกรอบอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมใด ๆ หรือหยุดนิ่งอยู่กับที่ หลังจากนั้นพบว่า การแปลงทั้งหมดสามารถหาได้จากการกำหนดความเร็วในการหมุนที่เหมาะสมของกรอบอ้างอิง ซึ่งถูกเรียกว่า กรอบอ้างอิงอิสระ (arbitrary reference frame) ในภายหลัง มีการนำกรอบอ้างอิงอิสระไปใช้

กับการวิเคราะห์เครื่องจักรกลเชิง โครน์ส แต่อย่างไรก็ตามได้มีการค้นพบว่า ความเหนียวหน้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของเครื่องจักรกลเชิง โครน์สจะถูกกำจัดออกไปถ้ากรอบอ้างอิงถูกยึดติดอยู่กับโรเตอร์เท่านั้น (นั่นคือ การแปลงของ Park) ในที่สุดกรอบอ้างอิงอิสระก็ไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์เครื่องจักรกลเชิง โครน์ส

2.4.2 แบบจำลองของมอเตอร์เหนียวในกรอบอ้างอิงอิสระ

กรอบอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วใด ๆ เรียกว่า กรอบอ้างอิงอิสระ (arbitrary reference frame) กรอบอ้างอิงอื่น ๆ เป็นกรณีเฉพาะของกรอบอ้างอิงอิสระ ความสัมพันธ์ระหว่างกรอบอ้างอิงสเตเตอร์บนแกน d และ q กับกรอบอ้างอิงอิสระบนแกน d^c และ q^c แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กรอบอ้างอิงสเตเตอร์และกรอบอ้างอิงอิสระ [12]

กำหนดให้กรอบอ้างอิงที่อยู่บนสเตเตอร์และกรอบอ้างอิงอิสระมีจำนวนรอบของขดลวดเท่ากัน ความสัมพันธ์ของกระแสในกรอบอ้างอิงทั้งสองแสดงได้ดังนี้

$$i_{qds} = T^c i_{qds}^c \tag{2.47}$$

เมื่อ

$$i_{qds} = \begin{bmatrix} i_{qs} & i_{ds} \end{bmatrix}^t$$

$$i_{qds}^c = \begin{bmatrix} i_{qs}^c & i_{ds}^c \end{bmatrix}^t$$

และ

$$T^c = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c \end{bmatrix} \tag{2.48}$$

ในทำนองเดียวกัน กระแสของโรเตอร์เสมือนก็ถูกแปลงไปยังกรอบอ้างอิงอิสระด้วยโดยใช้ T^c และสามารถแสดงได้ดังนี้

$$i_{qdr} = T^c i_{qdr}^c \quad (2.49)$$

เมื่อ

$$i_{qdr} = \begin{bmatrix} i_{qr} & i_{dr} \end{bmatrix}^t$$

$$i_{qdr}^c = \begin{bmatrix} i_{qr}^c & i_{dr}^c \end{bmatrix}^t$$

เช่นเดียวกัน ความสัมพันธ์ของแรงดัน คือ

$$v_{qds} = T^c v_{qds}^c \quad (2.50)$$

$$v_{qdr} = T^c v_{qdr}^c \quad (2.51)$$

เมื่อ

$$v_{qds} = \begin{bmatrix} v_{qs} & v_{ds} \end{bmatrix}^t$$

$$v_{qds}^c = \begin{bmatrix} v_{qs}^c & v_{ds}^c \end{bmatrix}^t$$

$$v_{qdr} = \begin{bmatrix} v_{qr} & v_{dr} \end{bmatrix}^t$$

$$v_{qdr}^c = \begin{bmatrix} v_{qr}^c & v_{dr}^c \end{bmatrix}^t$$

แทนค่าสมการ (2.47) ถึง (2.51) ลงในสมการ (2.41) จะได้สมการของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงอิสระ คือ

$$\begin{bmatrix} v_{qs}^c \\ v_{ds}^c \\ v_{qr}^c \\ v_{dr}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & \omega_c L_s & L_m p & \omega_c L_m \\ -\omega_c L_s & R_s + L_s p & -\omega_c L_m & L_m p \\ L_m p & (\omega_c - \omega_r) L_m & R_r + L_r p & (\omega_c - \omega_r) L_r \\ -(\omega_c - \omega_r) L_m & L_m p & -(\omega_c - \omega_r) L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^c \\ i_{ds}^c \\ i_{qr}^c \\ i_{dr}^c \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

เมื่อ $\omega_c = d\theta_c/dt$ เป็นความเร็วของกรอบอ้างอิงอิสระ และ ω_r เป็นความเร็วของโรเตอร์มีหน่วยเป็นเรเดียนทางไฟฟ้าต่อวินาที

2.4.3 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า

จากสมการ (2.52) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$V = [R]i + [L]pi + [G]\omega_r i + [F]\omega_c i \quad (2.53)$$

นำทราโนสโพสของเมตริกซ์กระแสคูณสมการ (2.53) จะได้กำลังไฟฟ้าอินพุต คือ

$$P_i = i^t V = i^t [R]i + i^t [L]pi + i^t [G]\omega_r i + i^t [F]\omega_c i \quad (2.54)$$

- เมื่อ $[R]$ = เมตริกซ์ความต้านทาน
 $[L]$ = เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของตัวดำเนินการอนุพันธ์ p
 $[G]$ = เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของความเร็วทางไฟฟ้าของโรเตอร์ ω_r
 $[F]$ = เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของความเร็วของกรอบอ้างอิง ω_c

พจน์ $i'[R]i$ เป็นความสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ พจน์ $i'[F]\omega_c i$ เป็นกำลังไฟฟ้าของกรอบอ้างอิงและมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากองค์ประกอบเสมือนที่กำหนดขึ้นเพื่อให้เกิดความง่ายในการวิเคราะห์แบบจำลองจะไม่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้า พจน์ $i'[L]pi$ เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานแม่เหล็กสะสม ดังนั้น ส่วนประกอบที่เหลือก็ต้องเป็นกำลังที่ช่องอากาศ นั่นคือ พจน์ $i'[G]\omega_r i$ จากหลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ คือ กำลังที่ช่องอากาศเป็นผลคูณของความเร็วทางกลของโรเตอร์และแรงบิดที่ช่องอากาศหรือแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้น แรงบิดที่ช่องอากาศ T_e หาได้จาก

$$\omega_m T_e = P_a = i'[G]i \cdot \omega_r \quad (2.55)$$

เมื่อ ω_m เป็นความเร็วทางกลของโรเตอร์ มีหน่วยเป็นเรเดียนทางกลต่อวินาที แทนค่า ω_r ในรูปของ ω_m จะได้

$$T_e = \frac{P}{2} i'[G]i \quad (2.56)$$

แทนค่า $[G]$ ลงในสมการ (2.56) จะได้แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับ

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{qs}^c i_{dr}^c - i_{ds}^c i_{qr}^c) \quad (2.57)$$

ตัวเลข $\frac{3}{2}$ ที่ปรากฏทางด้านขวาของสมการ (2.57) เพื่อให้เกิดสถานะสมมูลของกำลังไฟฟาระหว่างมอเตอร์เหนี่ยวนำบนระบบ 2 แกนและมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

2.5 แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงอื่น ๆ

การกำหนดกรอบอ้างอิงสำหรับแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ก็คือ การกำหนดความเร็วเชิงมุมในการหมุนของขดลวดโรเตอร์เสมือนที่อยู่บนแกน d และแกน q มีอยู่หลายแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน กรอบอ้างอิงที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่

1. กรอบอ้างอิงสเตเตอร์
2. กรอบอ้างอิงโรเตอร์
3. กรอบอ้างอิงซิงโครนัส

2.5.1 แบบจำลองพลวัตในกรอบอ้างอิงสเตเตอร์

ความเร็วของกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ คือ ความเร็วของสเตเตอร์ ซึ่งเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\omega_c = 0$$

แทนลงในสมการ 5.115 จะได้

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & 0 & L_m p & 0 \\ 0 & R_s + L_s p & 0 & L_m p \\ L_m p & -\omega_r L_m & R_r + L_r p & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_m & L_m p & \omega_r L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

และ

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (2.59)$$

แบบจำลองนี้นำมาใช้ในการจำลองการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมสเตเตอร์ (stator-controlled drives) เช่น การขับเคลื่อนแบบควบคุมเฟส (phase-controlled) และการขับเคลื่อนแบบควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ (inverter controlled)

2.5.2 แบบจำลองพลวัตในกรอบอ้างอิงโรเตอร์

ความเร็วของกรอบอ้างอิงโรเตอร์ คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ ดังนั้น

$$\omega_c = \omega_r$$

แทนลงในสมการ 5.115 จะได้

$$\begin{bmatrix} v_{qs}^r \\ v_{ds}^r \\ v_{qr}^r \\ v_{dr}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & \omega_r L_s & L_m p & \omega_r L_m \\ -\omega_r L_s & R_s + L_s p & -\omega_r L_m & L_m p \\ L_m p & 0 & R_r + L_r p & 0 \\ 0 & L_m p & 0 & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^r \\ i_{ds}^r \\ i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

และ

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{qs}^r i_{dr}^r - i_{ds}^r i_{qr}^r) \quad (2.61)$$

แบบจำลองนี้นำมาใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าและส่วนประกอบสวิตชิงโดยควบคุมจากทางด้านโรเตอร์ เช่น การจำลองการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบคืนพลังงานสลลิป (slip-power recovery)

2.5.3 แบบจำลองพลวัตในกรอบอ้างอิงซิงโครนัส

ความเร็วของกรอบอ้างอิงซิงโครนัส คือ ความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส ดังนั้น

$$\omega_c = \omega_s$$

แทนลงในสมการ 5.115 จะได้

$$\begin{bmatrix} v_{qs}^e \\ v_{ds}^e \\ v_{qr}^e \\ v_{dr}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & \omega_s L_s & L_m p & \omega_s L_m \\ -\omega_s L_s & R_s + L_s p & -\omega_s L_m & L_m p \\ L_m p & (\omega_s - \omega_r) L_m & R_r + L_r p & (\omega_s - \omega_r) L_r \\ -(\omega_s - \omega_r) L_m & L_m p & -(\omega_s - \omega_r) L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^e \\ i_{ds}^e \\ i_{qr}^e \\ i_{dr}^e \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

และ

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{qs}^e i_{dr}^e - i_{ds}^e i_{qr}^e) \quad (2.63)$$

แบบจำลองนี้นำมาใช้ในการเปลี่ยนตัวแปรในสถานะอยู่ตัวให้กลายเป็นปริมาณกระแสตรง เช่น การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบควบคุมเวกเตอร์ (vector control) ซึ่งเป็นการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแนวใหม่ด้วยการควบคุมแบบแยกแรงบิดและเส้นแรงแม่เหล็กในลักษณะเดียวกับการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (separately excited)

2.6 แบบจำลองแบบเปอร์ยูนิตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [12-13]

แบบจำลองเปอร์ยูนิตของมอเตอร์เหนี่ยวนำหาได้จากการกำหนดค่าฐานทั้งในระบบพิกัดแกน abc และ $dq0$ ในระบบ abc ใช้ค่า rms ของแรงดันและกระแสเฟสที่พิกัดสร้างค่าฐาน ดังนี้

$$P_b = 3V_{b3}I_{b3} \quad (2.64)$$

เมื่อ V_{b3} และ I_{b3} เป็นค่าฐาน 3 เฟสของแรงดันและกระแส ตามลำดับ การเลือกค่าฐานในระบบ dq กำหนดให้ V_b และ I_b เป็นค่าสูงสุดของแรงดันและกระแสเฟสในระบบ abc จะได้

$$V_b = \sqrt{2}V_{b3} \quad (2.65)$$

$$I_b = \sqrt{2}I_{b3} \quad (2.66)$$

ดังนั้น ค่าฐานของกำลังไฟฟ้ากำหนดด้วย

$$P_b = 3V_{b3}I_{b3} = 3 \frac{V_b}{\sqrt{2}} \frac{I_b}{\sqrt{2}} = \frac{3}{2} V_b I_b \quad (2.67)$$

พิจารณาสมการของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงอิสระ แรงดันของสเตเตอร์แกน q ดังต่อไปนี้

$$v_{qs}^c = R_s i_{qs}^c + L_s p i_{qs}^c + \omega_c L_s i_{ds}^c + L_m p i_{qr}^c + \omega_c L_m i_{dr}^c \quad (2.68)$$

เปลี่ยนสมการในรูปความเหนี่ยวนำให้อยู่ในรูปของรีแอกแตนซ์โดยใช้ค่าฐานของความถี่ ω_b

$$v_{qs}^c = R_s i_{qs}^c + \frac{X_s}{\omega_b} p i_{qs}^c + \frac{\omega_c X_s}{\omega_b} i_{ds}^c + \frac{X_m}{\omega_b} p i_{qr}^c + \frac{\omega_c X_m}{\omega_b} i_{dr}^c \quad (2.69)$$

ทำให้เป็นเปอร์ยูนิตโดยหารด้วยค่าฐานของแรงดัน V_b

$$\bar{v}_{qs}^{-c} = \frac{v_{qs}^c}{V_b} = \frac{R_s}{V_b} i_{qs}^c + \frac{X_s}{\omega_b V_b} p i_{qs}^c + \frac{\omega_c X_s}{\omega_b V_b} i_{ds}^c + \frac{X_m}{\omega_b V_b} p i_{qr}^c + \frac{\omega_c X_m}{\omega_b V_b} i_{dr}^c \quad (2.70)$$

(เครื่องหมาย “-” ที่อยู่ด้านบน แทนค่าเปอร์ยูนิต)

แทนค่าฐานของแรงดันในรูปค่าฐานของกระแส I_b และค่าฐานของอิมพีแดนซ์ Z_b ดังนี้

$$V_b = I_b Z_b \quad (2.71)$$

จะได้

$$\begin{aligned} \bar{v}_{qs}^{-c} = & \left(\frac{R_s}{Z_b} \right) \left(\frac{i_{qs}^c}{I_b} \right) + \frac{1}{\omega_b} \left(\frac{X_s}{Z_b} \right) p \left(\frac{i_{qs}^c}{I_b} \right) + \left(\frac{\omega_c}{\omega_b} \right) \left(\frac{X_s}{Z_b} \right) \left(\frac{i_{ds}^c}{I_b} \right) \\ & + \frac{1}{\omega_b} \left(\frac{X_m}{Z_b} \right) p \left(\frac{i_{qr}^c}{I_b} \right) + \left(\frac{\omega_c}{\omega_b} \right) \left(\frac{X_m}{Z_b} \right) \left(\frac{i_{dr}^c}{I_b} \right) \end{aligned} \quad (2.72)$$

กำหนดค่าเปอร์ยูนิตของตัวแปรต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

$$\bar{R}_s = \frac{R_s}{Z_b} \text{ p.u.}, \quad \bar{R}_r = \frac{R_r}{Z_b} \text{ p.u.}, \quad \bar{X}_s = \frac{X_s}{Z_b} \text{ p.u.}, \quad \bar{X}_r = \frac{X_r}{Z_b} \text{ p.u.}, \quad \bar{X}_m = \frac{X_m}{Z_b} \text{ p.u.}$$

$$\bar{v}_{qs}^{-c} = \frac{v_{qs}^c}{V_b} \text{ p.u.}, \quad \bar{v}_{ds}^{-c} = \frac{v_{ds}^c}{V_b} \text{ p.u.}, \quad \bar{v}_{qr}^{-c} = \frac{v_{qr}^c}{V_b} \text{ p.u.}, \quad \bar{v}_{dr}^{-c} = \frac{v_{dr}^c}{V_b} \text{ p.u.}, \quad \bar{\omega}_r = \frac{\omega_r}{\omega_b} \text{ p.u.}$$

$$\bar{i}_{qs}^{-c} = \frac{i_{qs}^c}{I_b} \text{ p.u.}, \quad \bar{i}_{ds}^{-c} = \frac{i_{ds}^c}{I_b} \text{ p.u.}, \quad \bar{i}_{qr}^{-c} = \frac{i_{qr}^c}{I_b} \text{ p.u.}, \quad \bar{i}_{dr}^{-c} = \frac{i_{dr}^c}{I_b} \text{ p.u.}, \quad \bar{\omega}_c = \frac{\omega_c}{\omega_b} \text{ p.u.}$$

แทนค่าลงในสมการ (2.72) จะได้แรงดันเปอร์ยูนิตของสเตเตอร์แกน q เท่ากับ

$$\bar{v}_{qs}^{-c} = \bar{R}_s \bar{i}_{qs}^{-c} + \frac{\bar{X}_s}{\omega_b} p \bar{i}_{qs}^{-c} + \bar{\omega}_c \bar{X}_s \bar{i}_{ds}^{-c} + \frac{\bar{X}_m}{\omega_b} p \bar{i}_{qr}^{-c} + \bar{\omega}_c \bar{X}_m \bar{i}_{dr}^{-c} \quad (2.73)$$

ในการทำงานเดียวกัน สมการอื่น ๆ ก็สามารทำให้เป็นเปอร์ยูนิตและจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_{qs}^c \\ \bar{v}_{ds}^c \\ \bar{v}_{qr}^c \\ \bar{v}_{dr}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{R}_s + \frac{\bar{X}_s}{\omega_b} p & \bar{\omega}_c \bar{X}_s & \frac{\bar{X}_m}{\omega_b} p & \bar{\omega}_c \bar{X}_m \\ -\bar{\omega}_c \bar{X}_s & \bar{R}_s + \frac{\bar{X}_s}{\omega_b} p & -\bar{\omega}_c \bar{X}_m & \frac{\bar{X}_m}{\omega_b} p \\ \frac{\bar{X}_m}{\omega_b} p & (\bar{\omega}_c - \bar{\omega}_r) \bar{X}_m & \bar{R}_r + \frac{\bar{X}_r}{\omega_b} p & (\bar{\omega}_c - \bar{\omega}_r) \bar{X}_m \\ -(\bar{\omega}_c - \bar{\omega}_r) & \frac{\bar{X}_m}{\omega_b} p & -(\bar{\omega}_c - \bar{\omega}_r) \bar{X}_r & \bar{R}_r + \frac{\bar{X}_r}{\omega_b} p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_{qs}^c \\ \bar{i}_{ds}^c \\ \bar{i}_{qr}^c \\ \bar{i}_{dr}^c \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

สมการแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า คือ

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{X_m}{\omega_b} (i_{qs}^c i_{dr}^c - i_{ds}^c i_{qr}^c) \quad (2.75)$$

และค่าฐานของแรงบิด เท่ากับ

$$T_b = \frac{P_b}{\omega_b} = \frac{P}{2} \frac{P_b}{\omega_b} \quad (2.76)$$

แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าเปอร์ยูนิต หาได้จาก

$$\begin{aligned} \bar{T}_e &= \frac{T_e}{T_b} = \frac{\frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{X_m}{\omega_b} (i_{qs}^c i_{dr}^c - i_{ds}^c i_{qr}^c)}{\frac{P}{2} \frac{P_b}{\omega_b}} = \frac{3}{2} \frac{X_m}{P_b} (i_{qs}^c i_{dr}^c - i_{ds}^c i_{qr}^c) = \frac{3}{2} \frac{X_m}{(3/2) V_b I_b} (i_{qs}^c i_{dr}^c - i_{ds}^c i_{qr}^c) \\ &= \frac{X_m}{Z_b} \left[\left(\frac{i_{qs}^c}{I_b} \right) \left(\frac{i_{dr}^c}{I_b} \right) - \left(\frac{i_{ds}^c}{I_b} \right) \left(\frac{i_{qr}^c}{I_b} \right) \right] = \bar{X}_m (\bar{i}_{qs}^c \bar{i}_{dr}^c - \bar{i}_{ds}^c \bar{i}_{qr}^c) \end{aligned}$$

จะได้

$$\bar{T}_e = \bar{X}_m (\bar{i}_{qs}^c \bar{i}_{dr}^c - \bar{i}_{ds}^c \bar{i}_{qr}^c) \quad (2.77)$$

สมการแรงบิดไฟฟ้ากล คือ

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + T_l \quad (2.78)$$

เมื่อ $J =$ โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์และภาระทางกล

$T_l =$ แรงบิดของภาระทางกล

$\omega_m =$ ความเร็วทางกลของโรเตอร์

ทำให้อยู่ในรูปเปอร์ยูนิตโดยหารด้วยค่าฐานของแรงบิด

$$\begin{aligned}\bar{T}_e = \frac{T_e}{T_b} &= \frac{J \frac{d\omega_m}{dt}}{\frac{P}{2} \frac{P_b}{\omega_b}} + \frac{T_l}{T_b} = \frac{J \left(\frac{2}{P}\right) \frac{d\omega_r}{dt}}{\frac{P}{2} \frac{P_b}{\omega_b}} + \frac{T_l}{T_b} = \frac{J \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_r}{\omega_b}\right)}{\left(\frac{P}{2}\right)^2 \frac{P_b}{\omega_b^2}} + \frac{T_l}{T_b} \\ &= \frac{J\omega_b^2 \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_r}{\omega_b}\right)}{\left(\frac{P}{2}\right)^2 P_b} + \frac{T_l}{T_b} = 2Hp\bar{\omega}_r + \bar{T}_l\end{aligned}$$

จะได้

$$\bar{T}_e = 2Hp\bar{\omega}_r + \bar{T}_l \quad (2.79)$$

เมื่อ

$$H = \frac{1}{2} \frac{J\omega_b^2}{P_b(P/2)^2} \quad (2.80)$$

สมการเปอร์ยูนิตของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงอิสระสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.74), (2.77) และ (2.79)

บทที่ 3

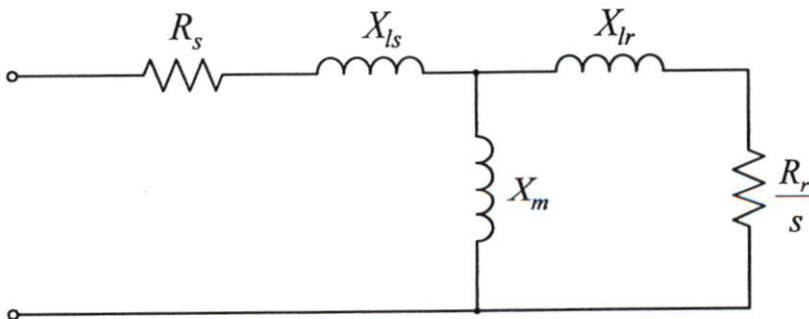
แบบจำลองการรวมกลุ่มสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.1 บทนำ

แนวความคิดในการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวน N ตัวที่ต่อขนานอยู่ในบัสเดียวกัน คือ การหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของวงจรสมมูลหนึ่งหน่วยซึ่งเป็นตัวแทนของการรวมกลุ่ม ได้แก่ ความต้านทานของสเตเตอร์ (stator resistance) ความต้านทานของโรเตอร์ (rotor resistance) รีแอกแตนซ์รั่วไหลของสเตเตอร์ (stator leakage reactance) รีแอกแตนซ์รั่วไหลของโรเตอร์ (rotor leakage reactance) และรีแอกแตนซ์กระตุ้นแม่เหล็ก (magnetizing reactance) การหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของวงจรสมมูลของการรวมกลุ่มใช้หลักการเดียวกันกับวิธีการรวมกลุ่มของ [5-7] ซึ่งเป็นการพิจารณาบนพื้นฐานของการทดสอบขณะไม่มีภาระ (No-Load test) และการทดสอบยึดโรเตอร์ (Block-Rotor test) โดยพัฒนาแบบจำลองการรวมกลุ่มให้เป็นแบบเปอร์ยูนิต และการพัฒนาให้แบบจำลองการรวมกลุ่มสามารถนำไปใช้ในการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรณีที่มีความเร็วเชิงโคโรนัสต่างกัน จะต้องทำการหาความเร็วเชิงโคโรนัสหรือจำนวนขั้วแม่เหล็กของการรวมกลุ่ม นอกจากนั้นยังต้องทำการหาค่ากำลังพิคของการรวมกลุ่ม โมเมนต์ความเฉื่อยของการรวมกลุ่ม และค่าสลิปของการรวมกลุ่มด้วย

3.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีลักษณะคล้ายกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีด้านปฐมภูมิ (สเตเตอร์) อยู่กับที่ และด้านทุติยภูมิ (โรเตอร์) เคลื่อนที่ได้ วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ตัวแปรของโรเตอร์ย้ายมาทางด้านสเตเตอร์ ซึ่งพิจารณาให้ค่าการสูญเสียที่แกนเหล็กหรือ core loss มีค่าน้อยมาก แสดงได้ดังรูปที่ 3.1



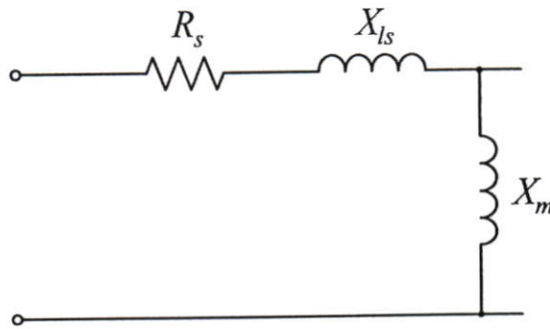
รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.3 การหาตัวแปรต่าง ๆ ของวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [15]

ข้อมูลที่สำคัญซึ่งสามารถใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟสได้มาจากการทดสอบขณะไม่มีภาระ (No-Load Test) และการทดสอบยึดโรเตอร์ (Block-Rotor Test) ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเหล่านี้นำมาใช้สร้างวงจรสมมูลเพื่อใช้ทำนายประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้สถานะดำเนินการที่แตกต่างกัน เงื่อนไขในการทดสอบได้กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEEE standard 112 “Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators”

3.3.1 การทดสอบขณะไม่มีภาระ (No-Load Test)

การทดสอบขณะไม่มีภาระถูกออกแบบมาเพื่อใช้หาค่ากำลังสูญเสียที่เกิดจากการหมุนและความเหนี่ยวนำกระตุ้นแม่เหล็ก ทำการทดสอบโดยป้อนแรงดันที่พิกัดให้มอเตอร์หมุนโดยไม่มีภาระที่ความถี่พิกัด ภายใต้สถานะไม่มีภาระ ค่า slip จะมีค่าน้อยมาก หรือ $s \approx 0$ ส่งผลให้ $\frac{R_r}{s}$ มีค่ามาก โรเตอร์สามารถถูกพิจารณาได้ว่าเปิดวงจร ดังนั้น วงจรสมมูลในสถานะไม่มีภาระแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลต่อเฟสขณะไม่มีภาระ

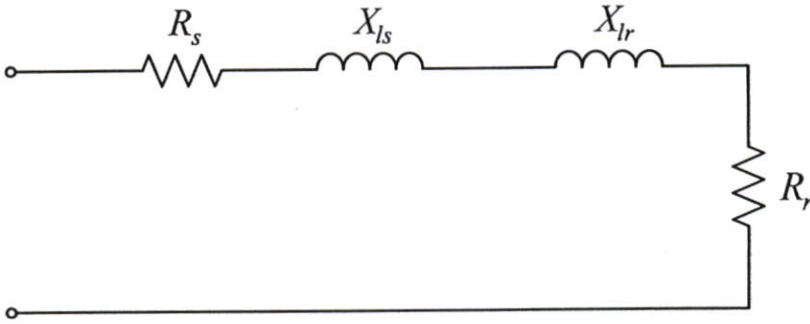
อิมพีแดนซ์ขณะไม่มีภาระของมอเตอร์เหนี่ยวนำ คือ

$$Z_n = R_s + j(X_{ls} + X_M) \quad (3.1)$$

3.3.2 การทดสอบยึดโรเตอร์ (Block-Rotor Test)

การทดสอบยึดโรเตอร์มีความหมายตามชื่อเรียกก็คือ โรเตอร์ถูกยึดไว้ไม่ให้หมุน ทำการทดสอบโดยยึดโรเตอร์แล้วป้อนแรงดันให้ได้กระแสที่ไหลมีขนาดเท่ากับกระแสที่พิกัด ภายใต้สถานะยึดโรเตอร์ ค่า slip มีค่าเท่ากับ 1 หรือ $s = 1$ เนื่องจากกระแสขณะยึดโรเตอร์มีขนาด 6 – 7 เท่าของกระแสที่พิกัด ดังนั้นเมื่อต้องการให้กระแสที่ไหลมีขนาดเท่ากับกระแสที่พิกัดจึงต้องทำการลดแรงดันที่จะป้อนให้กับสเตเตอร์ โดยปกติ แรงดันที่ป้อนมีค่าประมาณ 10 – 20 % ของแรงดันที่พิกัด

ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องอากาศลดลงไปด้วย ส่งผลให้รีแอกแตนซ์กระตุ้นแม่เหล็กเปรียบเสมือนว่ามีค่ามากกว่าปกติ ดังนั้น วงจรสมมูลในสถานะยึดโรเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.3



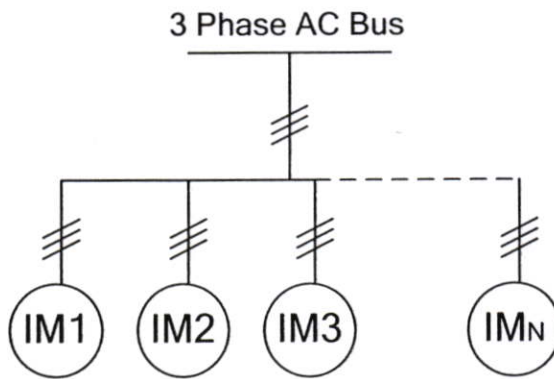
รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลต่อเฟสขณะยึดโรเตอร์

อิมพีแดนซ์ขณะยึดโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ คือ

$$Z_b = (R_s + R_r) + j(X_{ls} + X_{lr}) \quad (3.2)$$

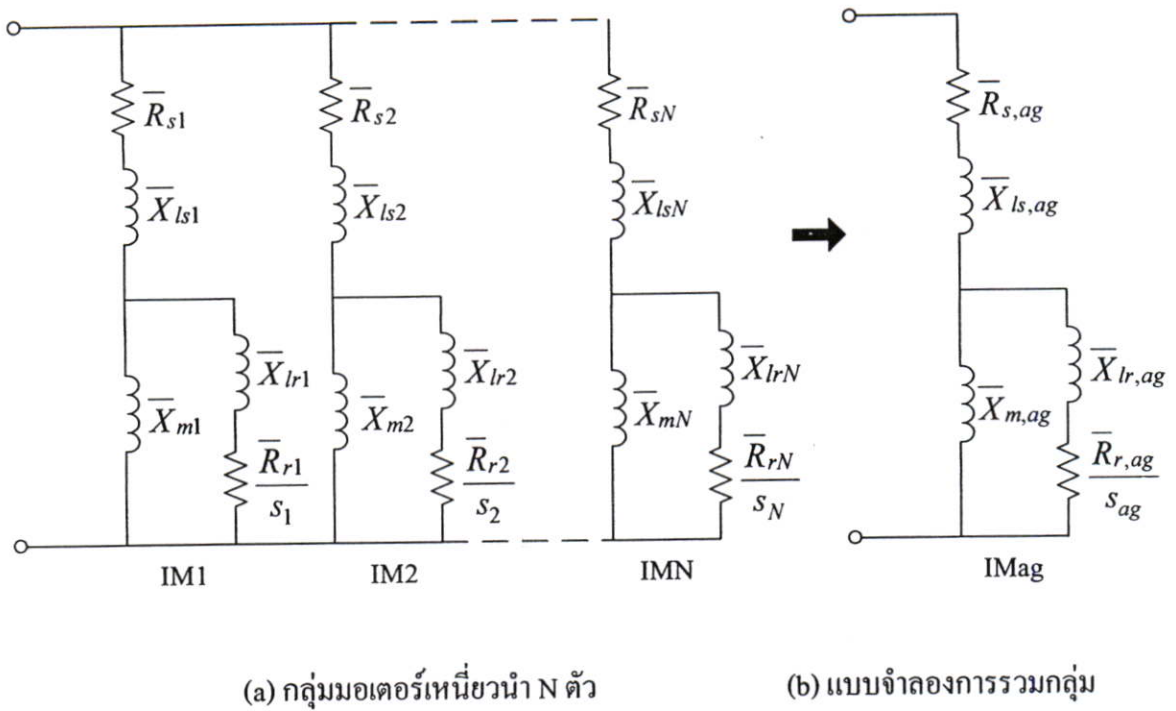
3.4 วงจรสมมูลเปอร์ยูนิตของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ

พิจารณากลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวน N ตัวที่ต่อขนานอยู่บนบัสเดียวกัน ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำ N ตัวต่อขนานบนบัสเดียวกัน

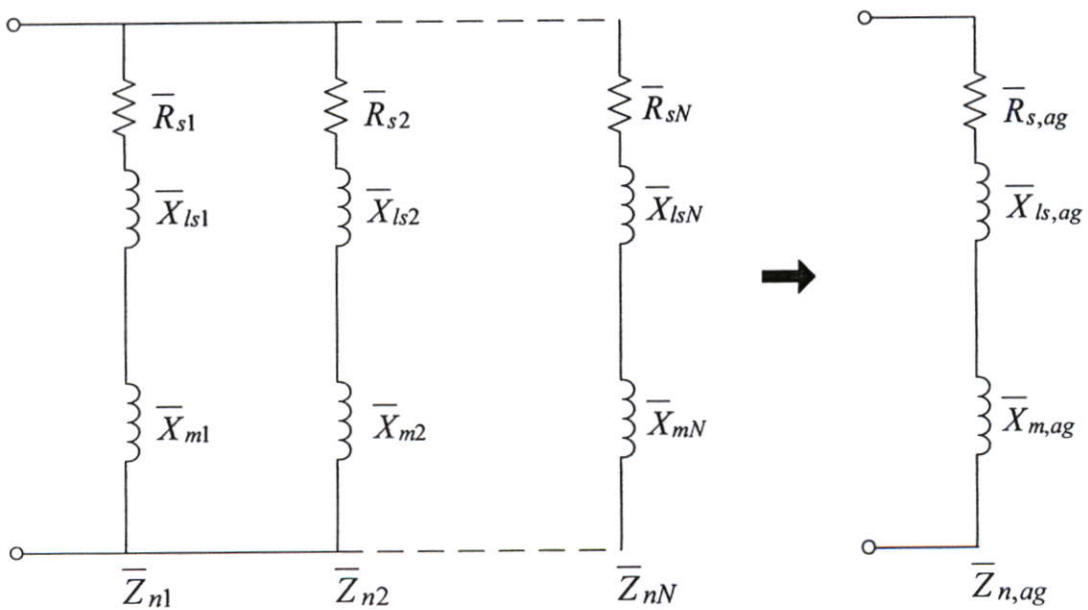
สามารถเขียนวงจรสมมูลเปอร์ยูนิตต่อเฟสของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวน N ตัวเหล่านี้ และแบบจำลองการรวมกลุ่มหรือวงจรสมมูลหนึ่งหน่วยเปอร์ยูนิตได้ดังรูปที่ 3.5 การหาตัวแปรต่างๆ ของวงจรสมมูลหนึ่งหน่วยเปอร์ยูนิตพัฒนามาจากวิธีการของ [5-7] โดยการพิจารณากลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำใน 2 สถานะ คือ สถานะไม่มีภาระ และสถานะยึดโรเตอร์



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลเปอร์ยูนิตต่อเฟสของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ N ตัว

3.4.1 กลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะไม่มีภาระ

อาศัยพื้นฐานของการทดสอบขณะไม่มีภาระ สามารถเขียนวงจรสมมูลเปอร์ยูนิตต่อเฟสของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ N ตัวในสถานะไม่มีภาระได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลเปอร์ยูนิตต่อเฟสของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ N ตัวในขณะไม่มีภาระ

อิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิตขณะไม่มีภาระของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัว คือ

$$\bar{Z}_{n,i} = \bar{R}_{s,i} + j(\bar{X}_{ls,i} + \bar{X}_{m,i}) \quad (3.3)$$

ทำการหาค่าอิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิตขณะไม่มีภาระของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้วิธีการรวมอิมพีแดนซ์แบบขนาน

$$\frac{1}{\bar{Z}_{n,ag}} = \frac{1}{\bar{Z}_{n1}} + \frac{1}{\bar{Z}_{n2}} + \frac{1}{\bar{Z}_{n3}} + \dots + \frac{1}{\bar{Z}_{nN}} \quad (3.4)$$

จะได้

$$\bar{Z}_{n,ag} = \frac{\prod_{i=1}^N \bar{Z}_{ni}}{\sum_{i=1}^N \left[\prod_{k=1, k \neq i}^N \bar{Z}_{nk} \right]} \quad (3.5)$$

ผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในรูป

$$\bar{Z}_{n,ag} = \bar{R}_{s,ag} + j(\bar{X}_{ls,ag} + \bar{X}_{m,ag}) \quad (3.6)$$

เมื่อ

$$i = 1, 2, 3, \dots, N$$

N = จำนวนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$\bar{R}_{s,i}$ = ความต้านทานเปอร์ยูนิตของสเตเตอร์ของมอเตอร์ตัวที่ i

$\bar{X}_{ls,i}$ = รีแอกแตนซ์รั่วไหลเปอร์ยูนิตของสเตเตอร์ของมอเตอร์ตัวที่ i

$\bar{X}_{m,i}$ = รีแอกแตนซ์กระตุ้นแม่เหล็กเปอร์ยูนิตของมอเตอร์ตัวที่ i

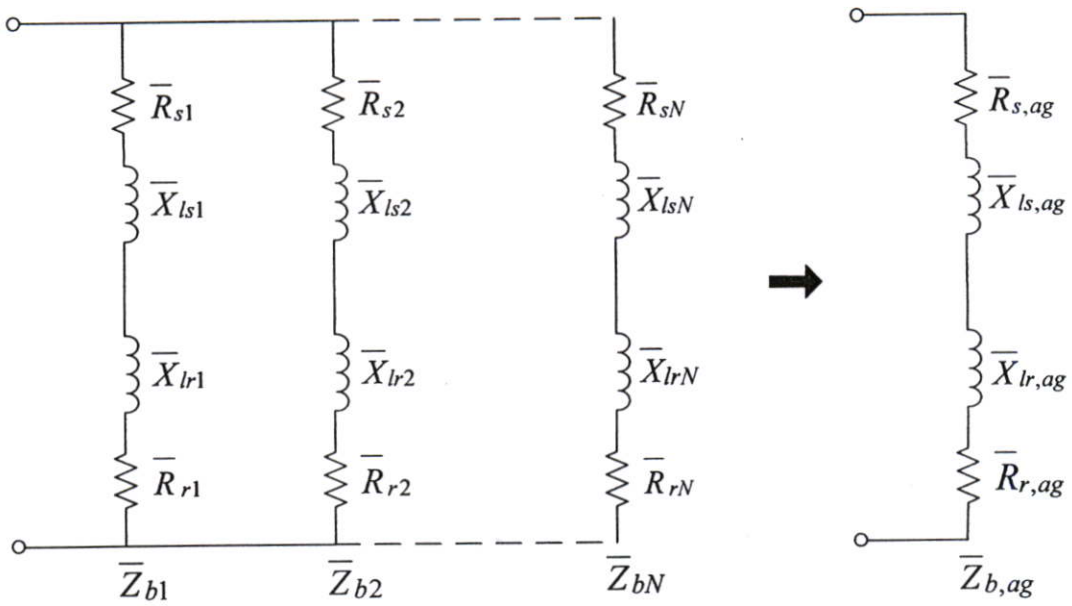
$\bar{R}_{s,ag}$ = ความต้านทานเปอร์ยูนิตของสเตเตอร์ของการรวมกลุ่ม

$\bar{X}_{ls,ag}$ = รีแอกแตนซ์รั่วไหลเปอร์ยูนิตของสเตเตอร์ของการรวมกลุ่ม

$\bar{X}_{m,ag}$ = รีแอกแตนซ์กระตุ้นแม่เหล็กเปอร์ยูนิตของการรวมกลุ่ม

3.4.2 กลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะยัดโรเตอร์

อาศัยพื้นฐานของการทดสอบยัดโรเตอร์ สามารถเขียนวงจรสมมูลเปอร์ยูนิตต่อเฟสของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ N ตัวในสภาวะยัดโรเตอร์ได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลเปอร์ยูนิตต่อเฟสของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ N ตัวในขณะชัตโรเตอร์

อิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิตขณะชัตโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัว คือ

$$\bar{Z}_{b,i} = (\bar{R}_{s,i} + \bar{R}_{r,i}) + j(\bar{X}_{ls,i} + \bar{X}_{lr,i}) \quad (3.7)$$

ทำการหาค่าอิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิตขณะชัตโรเตอร์ของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้วิธีการรวมอิมพีแดนซ์แบบขนาน

$$\frac{1}{\bar{Z}_{b,ag}} = \frac{1}{\bar{Z}_{b1}} + \frac{1}{\bar{Z}_{b2}} + \frac{1}{\bar{Z}_{b3}} + \dots + \frac{1}{\bar{Z}_{bN}} \quad (3.8)$$

จะได้

$$\bar{Z}_{b,ag} = \frac{\prod_{i=1}^N \bar{Z}_{bi}}{\sum_{i=1}^N \left[\prod_{k=1, k \neq i}^N \bar{Z}_{bk} \right]} \quad (3.9)$$

ผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในรูป

$$\bar{Z}_{b,ag} = (\bar{R}_{s,ag} + \bar{R}_{r,ag}) + j(\bar{X}_{ls,ag} + \bar{X}_{lr,ag}) \quad (3.10)$$

เมื่อ

$$i = 1, 2, 3, \dots, N$$

N = จำนวนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$\bar{R}_{s,i}$ = ความต้านทานเปอร์ยูนิตของสเตเตอร์ของมอเตอร์ตัวที่ i

$\bar{R}_{r,i}$ = ความต้านทานเปอร์ยูนิตของโรเตอร์ที่ย้ายมาทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์ตัวที่ i

$\bar{X}_{ls,i}$ = รีแอกแตนซ์รั่วไหลเปอร์ยูนิตของสเตเตอร์ของมอเตอร์ตัวที่ i

$\bar{X}_{lr,i}$ = รีแอกแตนซ์รั่วไหลเปอร์ยูนิตของโรเตอร์ที่ย้ายมาทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์ตัวที่ i

$\bar{R}_{s,ag}$ = ความต้านทานเปอร์ยูนิตของสเตเตอร์ของการรวมกลุ่ม

$\bar{R}_{r,ag}$ = ความต้านทานเปอร์ยูนิตของโรเตอร์ที่ย้ายมาทางด้านสเตเตอร์ของการรวมกลุ่ม

$\bar{X}_{ls,ag}$ = รีแอกแตนซ์รั่วไหลเปอร์ยูนิตของสเตเตอร์ของการรวมกลุ่ม

$\bar{X}_{lr,ag}$ = รีแอกแตนซ์รั่วไหลเปอร์ยูนิตของโรเตอร์ที่ย้ายมาทางด้านสเตเตอร์ของการรวมกลุ่ม

3.5 การคำนวณแบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิต

การคำนวณแบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิตเป็นการหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ความต้านทานเปอร์ยูนิตของสเตเตอร์ (per unit stator resistance)
2. ความต้านทานเปอร์ยูนิตของโรเตอร์ที่ย้ายมาทางด้านสเตเตอร์ (per unit rotor resistance)
3. รีแอกแตนซ์รั่วไหลเปอร์ยูนิตของสเตเตอร์ (per unit stator leakage reactance)
4. รีแอกแตนซ์รั่วไหลเปอร์ยูนิตของโรเตอร์ที่ย้ายมาทางด้านสเตเตอร์ (per unit rotor leakage reactance)
5. รีแอกแตนซ์กระตุ้นแม่เหล็กเปอร์ยูนิต (per unit magnetizing reactance)

3.5.1 ขั้นตอนในการคำนวณแบบจำลองการรวมกลุ่ม

ทำการหาตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองการรวมกลุ่มได้โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 นำค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เป็นค่าเปอร์ยูนิต คือ \bar{R}_s , \bar{R}_r , \bar{X}_{ls} , \bar{X}_{lr} และ \bar{X}_m ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัวมาจัดให้อยู่ในรูปอิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิตขณะไม่มีภาระ และอิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิตขณะยึดโรเตอร์โดยใช้สมการ (3.3) และ (3.7) ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณอิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิตขณะไม่มีภาระของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยสมการ (3.5) ผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปแบบตามสมการ (3.6)

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณอิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิตขณะยึดโรเตอร์ของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยสมการ (3.9) ผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปแบบตามสมการ (3.10)

ขั้นตอนที่ 4 พิจารณาตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองการรวมกลุ่มตามหัวข้อที่ 3.5.2

3.5.2 ตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองการรวมกลุ่ม

การพิจารณาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิต ทำได้ดังนี้

3.5.2.1 ความต้านทานเปอร์ยูนิตของสเตเตอร์ ($\bar{R}_{s,ag}$)

ความต้านทานเปอร์ยูนิตของสเตเตอร์ เท่ากับ ส่วนจริงของ $\bar{Z}_{n,ag}$

$$\bar{R}_{s,ag} = \text{Re}(\bar{Z}_{n,ag}) \quad (3.11)$$

3.5.2.2 ความต้านทานเปอร์ยูนิตของโรเตอร์ที่ย้ายมาทางด้านสเตเตอร์ ($\bar{R}_{r,ag}$)

ความต้านทานเปอร์ยูนิตของโรเตอร์ที่ย้ายมาทางด้านสเตเตอร์ เท่ากับ ส่วนจริงของ $\bar{Z}_{b,ag}$ ลบด้วย $\bar{R}_{s,ag}$

$$\bar{R}_{r,ag} = \text{Re}(\bar{Z}_{b,ag}) - \bar{R}_{s,ag} \quad (3.12)$$

3.5.2.3 รีแอกแตนซ์รั่วไหลเปอร์ยูนิตของสเตเตอร์ ($\bar{X}_{ls,ag}$) และโรเตอร์ ($\bar{X}_{lr,ag}$)

รีแอกแตนซ์รั่วไหลเปอร์ยูนิตของสเตเตอร์ และรีแอกแตนซ์รั่วไหลเปอร์ยูนิตของโรเตอร์ที่ย้ายมาทางด้านสเตเตอร์ หาได้โดยใช้มาตรฐาน IEEE Std 112-1996 [10] ซึ่งกำหนดการกระจายค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นอยู่กับชนิด (class) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังตาราง

ตารางที่ 3.1 การกระจายค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละชนิด [10]

Motor Class	X_{ls}	X_{lr}
A	0.5	0.5
B	0.4	0.6
C	0.3	0.7
D	0.5	0.5
Wound Rotor	0.5	0.5

จากตารางที่ 3.1 สามารถหาค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลเปอร์ยูนิต $\bar{X}_{ls,ag}$ และ $\bar{X}_{lr,ag}$ ของแบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิต ดังต่อไปนี้

Class A

$$\bar{X}_{ls,ag} = 0.5 \text{Im}(\bar{Z}_{b,ag}) \quad (3.13)$$

$$\bar{X}_{lr,ag} = 0.5 \text{Im}(\bar{Z}_{b,ag}) \quad (3.14)$$

Class B

$$\bar{X}_{ls,ag} = 0.4 \operatorname{Im}(\bar{Z}_{b,ag}) \quad (3.15)$$

$$\bar{X}_{lr,ag} = 0.6 \operatorname{Im}(\bar{Z}_{b,ag}) \quad (3.16)$$

Class C

$$\bar{X}_{ls,ag} = 0.3 \operatorname{Im}(\bar{Z}_{b,ag}) \quad (3.17)$$

$$\bar{X}_{lr,ag} = 0.7 \operatorname{Im}(\bar{Z}_{b,ag}) \quad (3.18)$$

Class D

$$\bar{X}_{ls,ag} = 0.5 \operatorname{Im}(\bar{Z}_{b,ag}) \quad (3.19)$$

$$\bar{X}_{lr,ag} = 0.5 \operatorname{Im}(\bar{Z}_{b,ag}) \quad (3.20)$$

3.5.2.4 รีแอกแตนซ์กระตุ้นแม่เหล็กเปอร์ยูนิต ($\bar{X}_{m,ag}$)

รีแอกแตนซ์กระตุ้นแม่เหล็กเปอร์ยูนิต เท่ากับ ส่วนจินตภาพของ $\bar{Z}_{n,ag}$ ลบด้วย $\bar{X}_{ls,ag}$

$$\bar{X}_{m,ag} = \operatorname{Im}(\bar{Z}_{n,ag}) - \bar{X}_{ls,ag} \quad (3.21)$$

3.6 สมการอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการรวมกลุ่ม

3.6.1 สมการกำลังพิคัดของการรวมกลุ่ม

กำลังพิคัดของการรวมกลุ่ม เท่ากับ ผลรวมกำลังพิคัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัว

$$P_{ag} = P_1 + P_2 + \dots + P_N$$

จะได้

$$P_{ag} = \sum_{i=1}^N P_i \quad (3.22)$$

3.6.2 สมการจำนวนขั้วแม่เหล็กรวมของการรวมกลุ่ม

แบบจำลองการรวมกลุ่มที่เคยมีการนำเสนอก่อนหน้านี้ มีข้อจำกัด คือ ใช้ได้เฉพาะการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีความเร็วเชิงโครนัสเท่ากันเท่านั้น จากสมการแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำในบทที่ 2 คือ สมการ (2.74), (2.75) และ (2.80) พบว่า ในกรณีที่ความเร็วเชิงโครนัส

ไม่เท่ากันไม่สามารถทำการรวมกลุ่มได้ เนื่องจากไม่ทราบความเร็วเชิง โครนัสหรือจำนวนขั้วแม่เหล็ก รวมของการรวมกลุ่ม ดังนั้น การพัฒนาให้แบบจำลองการรวมกลุ่มสามารถนำไปใช้ในการรวมกลุ่ม มอเตอร์เหนี่ยวนำในกรณีที่มีความเร็วเชิง โครนัสต่างกัน ก็ต้องทำการหาจำนวนขั้วแม่เหล็กรวมของ การรวมกลุ่ม

จำนวนขั้วแม่เหล็กรวมของการรวมกลุ่มหาได้โดยใช้แนวความคิด คือ ความเร็วเชิง โครนัส ของการรวมกลุ่ม เท่ากับ ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของความเร็วเชิง โครนัสกับกำลังพิกัดของมอเตอร์ เหนี่ยวนำแต่ละตัว [8]

$$N_{s,ag} = \frac{N_{s,1}P_1 + N_{s,2}P_2 + \dots + N_{s,N}P_N}{P_{ag}}$$

$$N_{s,ag} = \frac{N_{s,i}P_i}{P_{ag}}$$

$$\frac{120f}{pole_{ag}} = \frac{N_{s,i}P_i}{P_{ag}}$$

จะได้จำนวนขั้วแม่เหล็กรวมของการรวมกลุ่ม คือ

$$pole_{ag} = \frac{120fP_{ag}}{\sum_{i=1}^N N_{s,i}P_i} \quad (3.23)$$

3.6.3 สมการโมเมนต์ความเฉื่อยของการรวมกลุ่ม

โมเมนต์ความเฉื่อยของการรวมกลุ่ม หาได้จากหลักการอนุรักษ์พลังงานจลน์ของการหมุน ที่ความเร็วเชิง โครนัส [5]

$$\frac{1}{2} J_{ag} \omega_{s,ag}^2 = \frac{1}{2} J_1 \omega_{s,1}^2 + \frac{1}{2} J_2 \omega_{s,2}^2 + \dots + \frac{1}{2} J_N \omega_{s,N}^2$$

$$\frac{1}{2} J_{ag} (2\pi N_{s,ag})^2 = \frac{1}{2} J_1 (2\pi N_{s,1})^2 + \frac{1}{2} J_2 (2\pi N_{s,2})^2 + \dots + \frac{1}{2} J_N (2\pi N_{s,N})^2$$

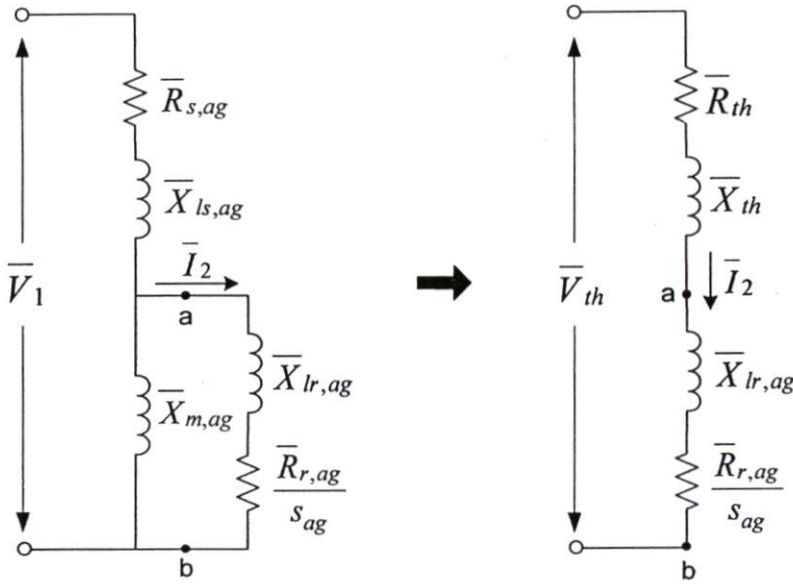
$$J_{ag} N_{s,ag}^2 = J_1 N_{s,1}^2 + J_2 N_{s,2}^2 + \dots + J_N N_{s,N}^2$$

จะได้โมเมนต์ความเฉื่อยของการรวมกลุ่ม คือ

$$J_{ag} = \frac{\sum_{i=1}^N J_i N_{s,i}^2}{N_{s,ag}^2} \quad (3.24)$$

3.6.4 สมการค่า slip ของการรวมกลุ่ม

พิจารณาวงจรสมมูลเปอร์ยูนิตต่อเฟสของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำรูปที่ 3.5 (b) ใช้ทฤษฎีของเทวินิน (Thevenin's theorem) เพื่อทำให้วงจรสมมูลอยู่ในรูปที่ง่ายขึ้น ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลเปอร์ยูนิตต่อเฟสโดยใช้ทฤษฎีเทวินิน

จะได้

$$\bar{R}_{th} = -\frac{\bar{X}_{ls,ag} \bar{X}_{m,ag}}{\bar{R}_{s,ag} + j(\bar{X}_{ls,ag} + \bar{X}_{m,ag})} \quad (3.25)$$

$$\bar{X}_{th} = \frac{\bar{R}_{s,ag} \bar{X}_{m,ag}}{\bar{R}_{s,ag} + j(\bar{X}_{ls,ag} + \bar{X}_{m,ag})} \quad (3.26)$$

$$\bar{V}_{th} = \frac{j\bar{X}_{m,ag}}{\bar{R}_{s,ag} + j(\bar{X}_{ls,ag} + \bar{X}_{m,ag})} \bar{V}_1 \quad (3.27)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{V}_{th}}{\left(\bar{R}_{th} + \frac{\bar{R}_{r,ag}}{s_{ag}}\right) + j(\bar{X}_{th} + \bar{X}_{lr,ag})} \quad (3.28)$$

จากสมการกำลังเอาต์พุตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$P = 3(1-s) \frac{R_r}{s} I_2^2 \quad (3.29)$$

ทำให้เป็นเปอร์ยูนิตโดยหารด้วยค่าฐานของกำลังไฟฟ้า $\left(P_b = \frac{3}{2} V_b I_b \right)$

$$\bar{P} = \frac{P}{P_b} = \frac{3(1-s) \frac{R_r}{s} I_2^2}{P_b} = 2(1-s) \frac{\bar{R}_r}{s} \bar{I}_2^2 \quad (3.30)$$

แทนค่าสมการ (3.25) ถึง (3.28) ลงในสมการ (3.30) จะได้

$$\bar{P}_{ag} = \frac{2(1-s_{ag}) \bar{R}_{r,ag} \bar{X}_{m,ag}^2 \bar{V}_1^2}{A + B s_{ag} + C s_{ag}^2} \quad (3.31)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} A &= \left(\bar{R}_{s,ag}^2 \bar{R}_{r,ag}^2 + \bar{R}_{r,ag}^2 \bar{X}_{s,ag}^2 \right) \\ B &= \left(2\bar{R}_{s,ag} \bar{R}_{r,ag} \bar{X}_{m,ag}^2 \right) \\ C &= \left(\bar{R}_{s,ag}^2 \bar{X}_{r,ag}^2 + \bar{X}_{s,ag}^2 \bar{X}_{r,ag}^2 + \bar{X}_{m,ag}^2 \bar{X}_{m,ag}^2 - 2\bar{X}_{s,ag} \bar{X}_{r,ag} \bar{X}_{m,ag}^2 \right) \end{aligned}$$

จัดรูปเพื่อคำนวณหาค่า slip จะได้

$$\begin{aligned} & \left[2\bar{R}_{r,ag} \bar{X}_{m,ag}^2 \bar{V}_1^2 + \bar{P}_{ag} \left\{ \bar{R}_{s,ag}^2 \bar{X}_{r,ag}^2 + (\bar{X}_{s,ag} \bar{X}_{r,ag} - \bar{X}_{m,ag}^2)^2 \right\} \right] s_{ag}^2 \\ & + \left[-\bar{R}_{r,ag} \bar{X}_{m,ag}^2 (2\bar{V}_1^2 - 2\bar{R}_{s,ag} \bar{P}_{ag}) \right] s_{ag} + \left[\bar{R}_{r,ag} \bar{P}_{ag} (\bar{R}_{s,ag}^2 + \bar{X}_{s,ag}^2) \right] = 0 \end{aligned}$$

หรือ

$$\alpha s_{ag}^2 + \beta s_{ag} + \gamma = 0 \quad (3.32)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \alpha &= 2\bar{R}_{r,ag} \bar{X}_{m,ag}^2 \bar{V}_1^2 + \bar{P}_{ag} \left\{ \bar{R}_{s,ag}^2 \bar{X}_{r,ag}^2 + (\bar{X}_{s,ag} \bar{X}_{r,ag} - \bar{X}_{m,ag}^2)^2 \right\} \\ \beta &= -\bar{R}_{r,ag} \bar{X}_{m,ag}^2 (2\bar{V}_1^2 - 2\bar{R}_{s,ag} \bar{P}_{ag}) \\ \gamma &= \bar{R}_{r,ag} \bar{P}_{ag} (\bar{R}_{s,ag}^2 + \bar{X}_{s,ag}^2) \end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned} \bar{X}_{s,ag} &= \bar{X}_{ls,ag} + \bar{X}_{m,ag} \\ \bar{X}_{r,ag} &= \bar{X}_{lr,ag} + \bar{X}_{m,ag} \end{aligned}$$

ค่า slip ของการรวมกลุ่ม หาได้จาก

$$s_{ag} = \frac{-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha} \quad (3.33)$$

รากที่ได้จากสมการมี 2 ค่า ซึ่งรากที่มีค่าน้อยกว่าเป็นค่า slip ของการรวมกลุ่ม

3.6.5 เกณฑ์ในการรวมกลุ่ม [4]

การกำหนดเกณฑ์ในการรวมกลุ่มมีจุดประสงค์เพื่อระบุและทำการรวมกลุ่มมอเตอร์ที่มีลักษณะเหมือนกัน สิ่งที่น่าสนใจในการจัดกลุ่มของมอเตอร์คือ ค่าคงที่ความเฉื่อย (H) หลักเกณฑ์ในการรวมกลุ่มได้มาจากสมการที่เสนอโดย Pillay [4] คือ

$$G = H\gamma\alpha \quad (3.34)$$

เมื่อ

$$\gamma = \frac{(\overline{X}_{ls} + \overline{X}_{lr})}{(\overline{R}_s + \overline{R}_r)}$$

$$\alpha = \frac{\overline{X}_m}{\overline{R}_r}$$

มอเตอร์เหนี่ยวนำจะสามารถรวมกลุ่มกันได้ เมื่อ

$$1 \leq (G_{\max} / G_{\min}) \leq 2.5 \quad (3.35)$$

3.7 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับทดสอบแบบจำลองการรวมกลุ่ม

การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิต ทำได้โดยนำแบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้ไปใช้ในการหาผลตอบสนองในสถานะชั่วขณะ ซึ่งการทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้การจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งเป็นสถานะชั่วขณะอย่างหนึ่งของระบบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดจริง

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้จำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุน สร้างโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยสมการที่นำมาใช้สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เป็นสมการของแบบจำลองพลวัตแบบเปอร์ยูนิตของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากบทที่ 2 ซึ่งเป็นสมการในระบบพิกัดแกน d-q ภายใต้กรอบอ้างอิงอิสระ (arbitrary reference frame) ประกอบด้วยสมการต่าง ๆ ดังนี้

3.7.1 สมการการแปลงแรงดันสามเฟสเป็นแรงดัน qd0

$$\bar{v}_{qs} = \frac{2}{3} \left[\bar{v}_a \cos(\omega_c t) + \bar{v}_b \cos\left(\omega_c t - \frac{2\pi}{3}\right) + \bar{v}_c \cos\left(\omega_c t - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (3.36)$$

$$\bar{v}_{ds} = \frac{2}{3} \left[\bar{v}_a \sin(\omega_c t) + \bar{v}_b \sin\left(\omega_c t - \frac{2\pi}{3}\right) + \bar{v}_c \sin\left(\omega_c t - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (3.37)$$

$$\bar{v}_{0s} = \frac{1}{3} [\bar{v}_a + \bar{v}_b + \bar{v}_c] \quad (3.38)$$

3.7.2 สมการกระแส qd

$$\frac{d\bar{i}_{ds}}{dt} = \frac{\omega(-\bar{R}_s \bar{X}_r \bar{i}_{ds} - \bar{\omega}_c \bar{X}_m^2 \bar{i}_{qs} + \bar{\omega}_r \bar{X}_m^2 \bar{i}_{qs} + \bar{\omega}_c \bar{X}_s \bar{X}_r \bar{i}_{qs} + \bar{R}_r \bar{X}_m \bar{i}_{dr} + \bar{\omega}_r \bar{X}_r \bar{X}_m \bar{i}_{qr} + \bar{X}_r \bar{v}_{ds})}{\bar{X}_s \bar{X}_r - \bar{X}_m^2} \quad (3.39)$$

$$\frac{d\bar{i}_{qs}}{dt} = \frac{\omega(\bar{\omega}_c \bar{X}_m^2 \bar{i}_{ds} - \bar{\omega}_r \bar{X}_m^2 \bar{i}_{ds} - \bar{\omega}_c \bar{X}_s \bar{X}_r \bar{i}_{ds} - \bar{R}_s \bar{X}_r \bar{i}_{qs} - \bar{\omega}_r \bar{X}_r \bar{X}_m \bar{i}_{dr} + \bar{R}_r \bar{X}_m \bar{i}_{qr} + \bar{X}_r \bar{v}_{qs})}{\bar{X}_s \bar{X}_r - \bar{X}_m^2} \quad (3.40)$$

$$\frac{d\bar{i}_{dr}}{dt} = \frac{\omega(\bar{R}_s \bar{X}_m \bar{i}_{ds} - \bar{\omega}_r \bar{X}_s \bar{X}_m \bar{i}_{qs} - \bar{R}_r \bar{X}_s \bar{i}_{dr} + \bar{\omega}_c \bar{X}_s \bar{X}_r \bar{i}_{qr} - \bar{\omega}_r \bar{X}_s \bar{X}_r \bar{i}_{qr} - \bar{\omega}_c \bar{X}_m^2 \bar{i}_{qr} - \bar{X}_m \bar{v}_{ds})}{\bar{X}_s \bar{X}_r - \bar{X}_m^2} \quad (3.41)$$

$$\frac{d\bar{i}_{qr}}{dt} = \frac{\omega(\bar{\omega}_r \bar{X}_s \bar{X}_m \bar{i}_{ds} + \bar{R}_s \bar{X}_m \bar{i}_{qs} - \bar{\omega}_c \bar{X}_s \bar{X}_r \bar{i}_{dr} + \bar{\omega}_r \bar{X}_s \bar{X}_r \bar{i}_{dr} + \bar{\omega}_c \bar{X}_m^2 \bar{i}_{dr} - \bar{R}_r \bar{X}_s \bar{i}_{qr} - \bar{X}_m \bar{v}_{qs})}{\bar{X}_s \bar{X}_r - \bar{X}_m^2} \quad (3.42)$$

3.7.3 สมการกระแสลำดับศูนย์

$$\bar{i}_{0s} = \frac{\omega_s}{X_{ls}} \int (\bar{v}_{0s} - \bar{i}_{0s} \bar{R}_s) dt \quad (3.43)$$

3.7.4 สมการแรงบิด

$$\bar{T}_e = \bar{X}_m (\bar{i}_{qs} \bar{i}_{dr} - \bar{i}_{ds} \bar{i}_{qr}) \quad (3.44)$$

3.7.5 สมการความเร็วรอบ

$$\bar{\omega}_r = \frac{1}{2H} \int (\bar{T}_e - \bar{T}_l) dt \tag{3.45}$$

เมื่อ
$$H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_{m,b}^2}{P_b}$$

3.7.6 สมการการแปลงกระแส dq0 เป็นกระแสสามเฟส

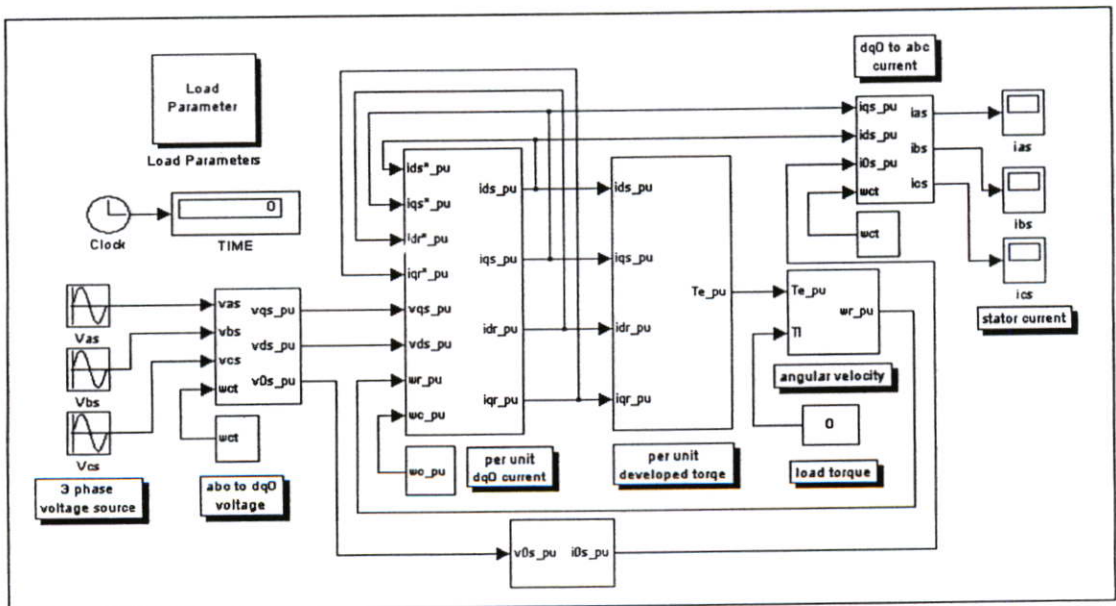
$$\bar{i}_a = \bar{i}_{qs} \cos(\omega_c t) + \bar{i}_{ds} \sin(\omega_c t) + \bar{i}_{0s} \tag{3.46}$$

$$\bar{i}_b = \bar{i}_{qs} \cos\left(\omega_c t - \frac{2\pi}{3}\right) + \bar{i}_{ds} \sin\left(\omega_c t - \frac{2\pi}{3}\right) + \bar{i}_{0s} \tag{3.47}$$

$$\bar{i}_c = \bar{i}_{qs} \cos\left(\omega_c t - \frac{4\pi}{3}\right) + \bar{i}_{ds} \sin\left(\omega_c t - \frac{4\pi}{3}\right) + \bar{i}_{0s} \tag{3.48}$$

3.7.7 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่สร้างโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับการจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สร้างโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK แสดงดังรูปที่ 3.9 (รายละเอียดของส่วนประกอบต่าง ๆ ในโปรแกรมได้แสดงไว้ในภาคผนวก)



รูปที่ 3.9 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่สร้างโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

บทที่ 4

การทดสอบแบบจำลองการรวมกลุ่ม

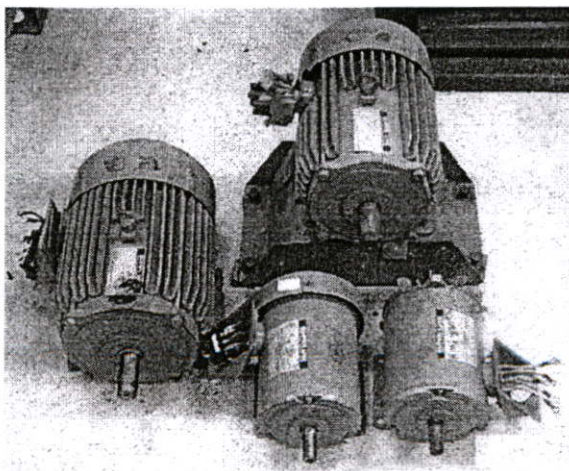
การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการรวมกลุ่ม ทำได้โดยนำแบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้ไปใช้ในการหาผลตอบสนองในสภาวะชั่วขณะที่เกิดขึ้นจากกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งในที่นี้เลือกใช้การจำลองกระแสเริ่มต้นหมุนเนื่องจากกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งเป็นสภาวะชั่วขณะอย่างหนึ่งของระบบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดจริง และผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัว ซึ่งจะทำให้การทดสอบทั้งในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความเร็วเชิง โครนัสเท่ากัน และกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความเร็วเชิง โครนัสต่างกัน จากนั้น นำแบบจำลองการรวมกลุ่มไปใช้ในกรณีศึกษาสภาวะพลวัตเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มที่เคยมีการนำเสนอก่อนหน้านี้ [4 ,9]

4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบและวัดกระแสเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ ประกอบด้วย

4.1.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ

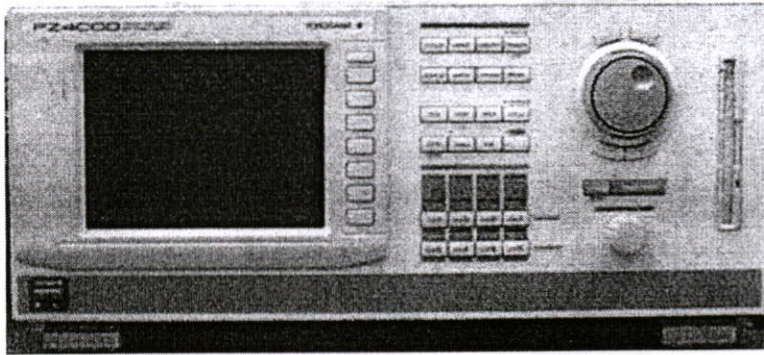
มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการทดสอบเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ผลิตตามมาตรฐาน JIS C4004 ประเภท totally enclosed fan cool (TEFC) ขนาด 1 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก, 3 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก, 5 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก และ 1 แรงม้า 6 ขั้วแม่เหล็ก, พิกัด 380 V, 50 Hz ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.2 เครื่องมือวัด

เครื่องมือสำหรับบันทึกข้อมูลแรงดันขณะเริ่มต้นหมุน, กระแสขณะเริ่มต้นหมุน และเวลาขณะเริ่มต้นหมุนที่ใช้ในการทดสอบคือ Power analyzer ของ YOKOGAWA รุ่น PZ4000 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 Power analyzer รุ่น PZ4000 ที่ใช้ในการทดสอบ

4.2 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ตัวแปรต่าง ๆ และค่าพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการรวมกลุ่ม แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ

No.	1	2	3	4	5	6
Ratings :						
Output Power P	1 hp	1 hp	3 hp	5 hp	2.2 kW	3.7 kW
Voltage V [V]	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220
Frequency f [Hz]	50	50	50	50	50	50
Number of Poles	6	4	4	4	4	6
Sync. Speed [rpm]	1000	1500	1500	1500	1500	1000
Base Quantities :						
Voltage V_b [V]	220	220	220	220	220	220
Current I_b [A]	7.9	7.9	7.9	7.9	10	10
Impedance Z_b [Ω]	27.85	27.85	27.85	27.85	22	22

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

No.	1	2	3	4	5	6
Parameters :						
Resistances						
R_s [pu.]	0.2496	0.3770	0.1357	0.0738	0.1354	0.0636
R_r [pu.]	0.2420	0.3638	0.1181	0.0705	0.1004	0.0909
Reactances						
X_{ls} [pu.]	0.3384	0.3521	0.1385	0.0750	0.1624	0.0824
X_{lr} [pu.]	0.3384	0.3521	0.1385	0.0750	0.1624	0.0915
X_m [pu.]	5.1268	7.7785	2.9121	1.9839	4.8458	3.0988
Moment of Inertia						
J [kg.m ²]	0.0028	0.0049	0.0056	0.0101	0.0227	0.0922

4.3 วิธีการทดสอบ

การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการรวมกลุ่มโดยนำไปใช้ในการจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานอยู่บนบัสเดียวกัน ซึ่งเป็นการเริ่มต้นหมุนด้วยวิธี direct-on-line แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสร้างโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK และจะทำการเปรียบเทียบในหลายรูปแบบด้วยกัน ได้แก่ เปรียบเทียบกับผลการวัดจริง เปรียบเทียบกับการจำลองแบบแยกเป็นแต่ละตัว และเปรียบเทียบโดยการใช้กรอบอ้างอิงที่แตกต่างกัน ทำการทดสอบในกรณีต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

4.3.1 กรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความเร็วเชิงโรตอร์สเท่ากัน

กรณีที่ 1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ ขนาด 1 แรงม้า 6 ขั้วแม่เหล็ก, 3 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก และ 5 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก ในสถานะไม่มีภาระทางกล เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการวัดจริง [17]

กรณีที่ 2 มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก และ 5 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก ในสถานะไม่มีภาระทางกล เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการวัดจริง [17]

กรณีที่ 3 มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก และ 5 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก ในสถานะมีภาระทางกล 14.27 N-m (1/2 ของแรงบิดพิคก) เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการวัดจริง [17] (โดยกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 มีมู่เล่เป็นอุปกรณ์ช่วยในการขับภาระทางกล ซึ่งมีค่า $J = 0.0249 \text{ kg.m}^2$)

4.3.2 กรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความเร็วเชิงโรตอร์สแตกต่างกัน

กรณีที่ 4 มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2.2 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก และ 3.7 kW 6 ขั้วแม่เหล็ก [5] ในสถานะไม่มีภาระทางกล เปรียบเทียบผลการจำลองโดยใช้แบบจำลองแยกแต่ละตัวและแบบจำลองการรวมกลุ่ม

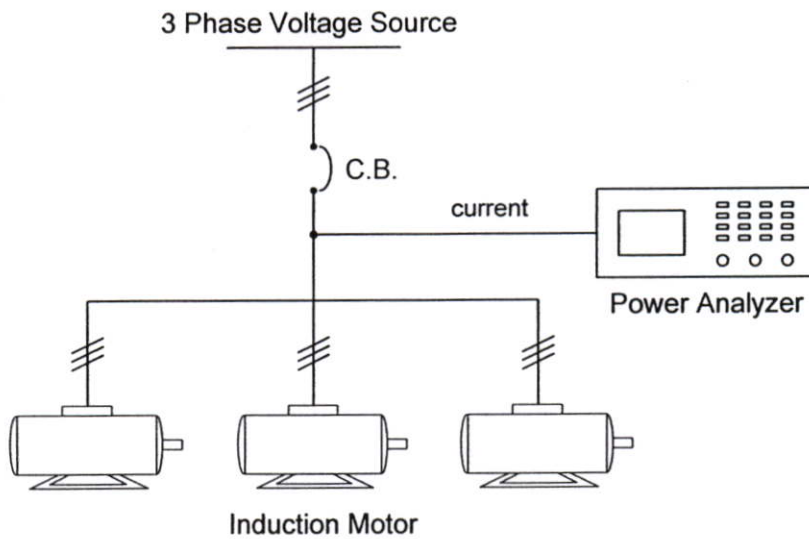
กรณีที่ 5 มอเตอร์เหนี่ยวนำ ขนาด 1 แรงม้า 6 ขั้วแม่เหล็ก, 3 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก และ 5 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก ในสถานะไม่มีภาระทางกล เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการวัดจริง

กรณีที่ 6 มอเตอร์เหนี่ยวนำ ขนาด 1 แรงม้า 6 ขั้วแม่เหล็ก, 1 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก และ 5 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก ในสถานะไม่มีภาระทางกล เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการวัดจริง

ทำการจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุน โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

- ครอบอ้างอิง stationary โดยกำหนด $\omega_c = 0$
- ครอบอ้างอิง rotor โดยกำหนด $\omega_c = \omega_r$
- ครอบอ้างอิง synchronous โดยกำหนด $\omega_c = \omega_s$

การต่ออุปกรณ์ในการทดสอบวัดกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ แสดงดังรูป



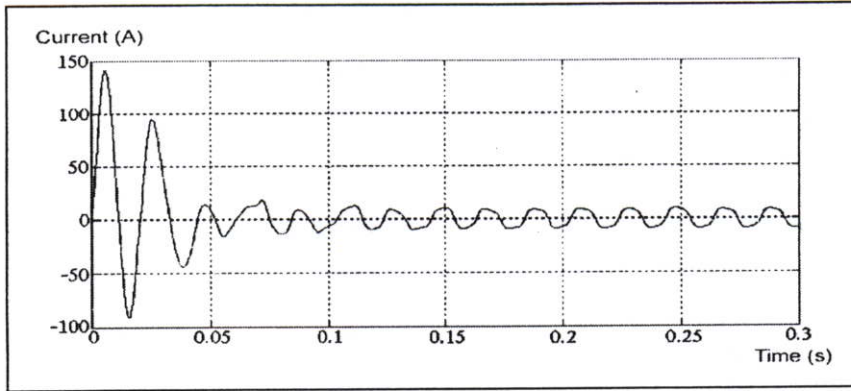
รูปที่ 4.3 การต่ออุปกรณ์ในการทดสอบ

พิจารณาความถูกต้องของแบบจำลองการรวมกลุ่มจาก ค่าสูงสุด (peak) ของกระแสขณะเริ่มต้นหมุน ค่ากระแสในสถานะอยู่ตัว (steady state) และค่าคงที่เวลา (time constant) เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการวัดและผลที่ได้จากการจำลอง โดย “ค่าคงที่เวลา (time constant) คือ ช่วงเวลาที่ผลตอบสนองชั่วขณะ (transient response) ของวงจรมีการลดลง (decay) จนมีค่าเท่ากับ e^{-1} เท่าหรือ 36.78 % ของค่าเริ่มต้น” [16] ซึ่งผลตอบสนองชั่วขณะในการทดสอบนี้ หมายถึง กระแสขณะเริ่มต้นหมุน

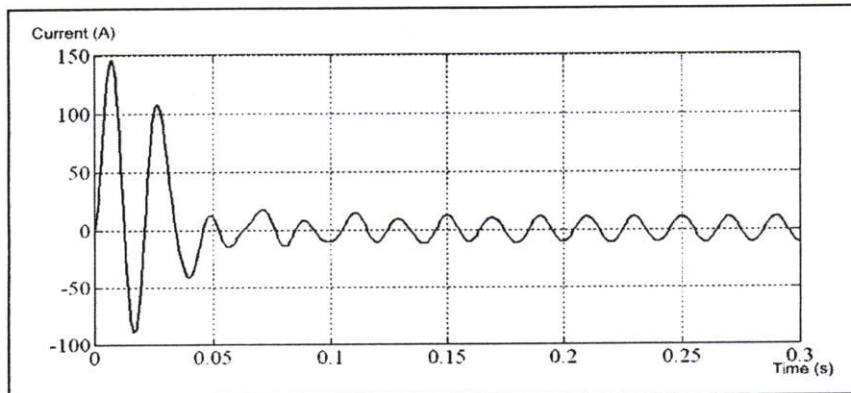
4.4 ผลการทดสอบ

รูปคลื่นกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการวัดจริงและการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้แบบจำลองการรวมกลุ่มภายใต้ครอบอ้างอิงต่าง ๆ เปรียบเทียบกันในแต่ละเฟส แสดงดังต่อไปนี้

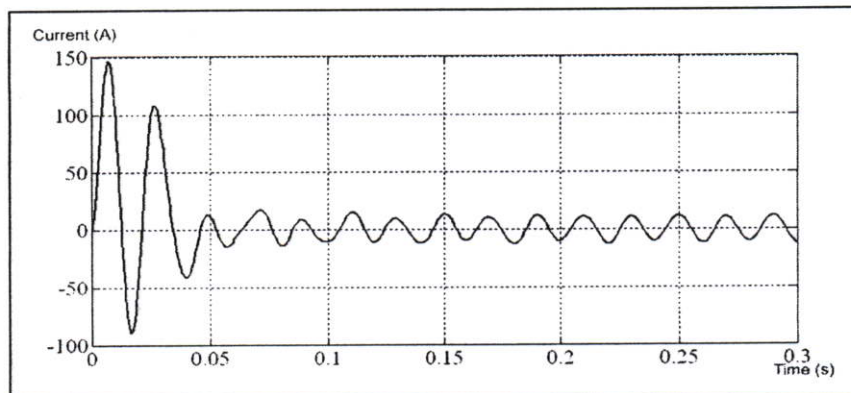
4.4.1 ผลการทดสอบกรณีที่ 1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase A)



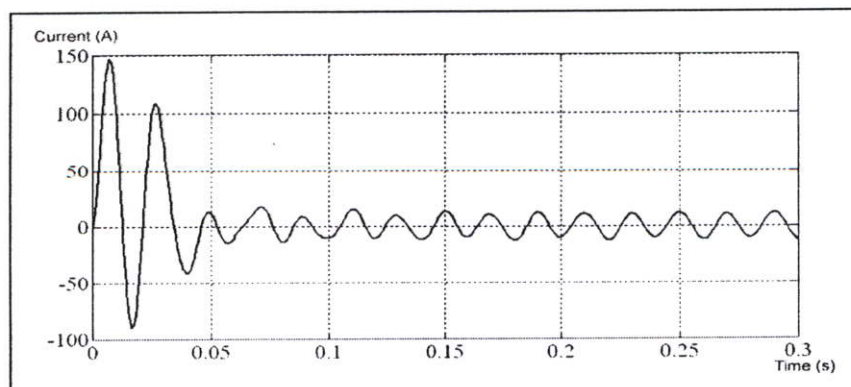
รูปที่ 4.4 กระแสที่ได้จากการวัดจริง [17]



รูปที่ 4.5 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary

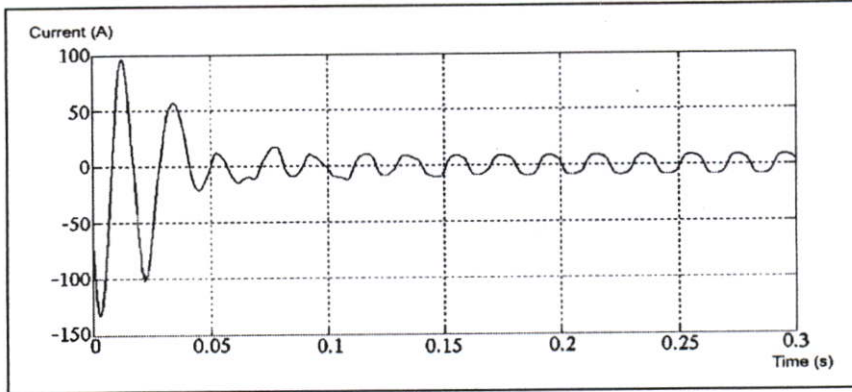


รูปที่ 4.6 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor

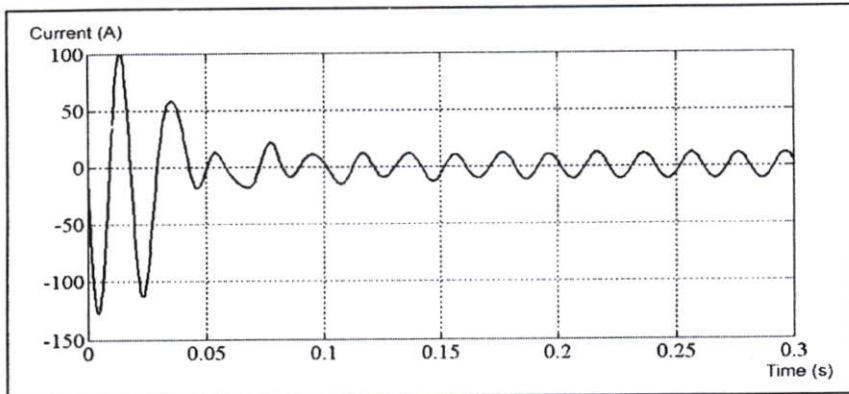


รูปที่ 4.7 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous

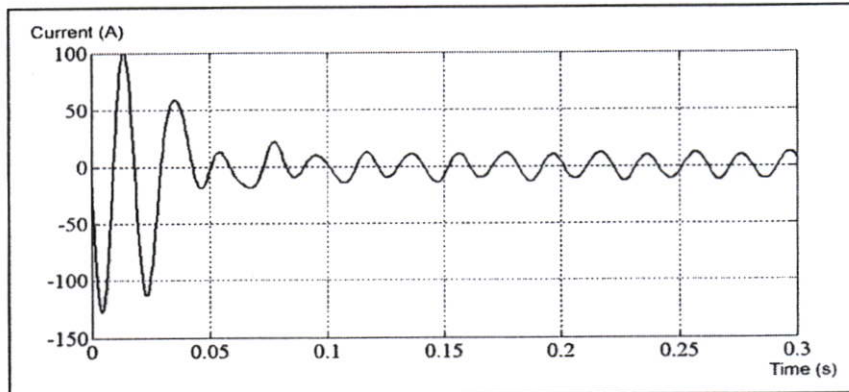
4.4.2 ผลการทดสอบกรณีที่ 1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase B)



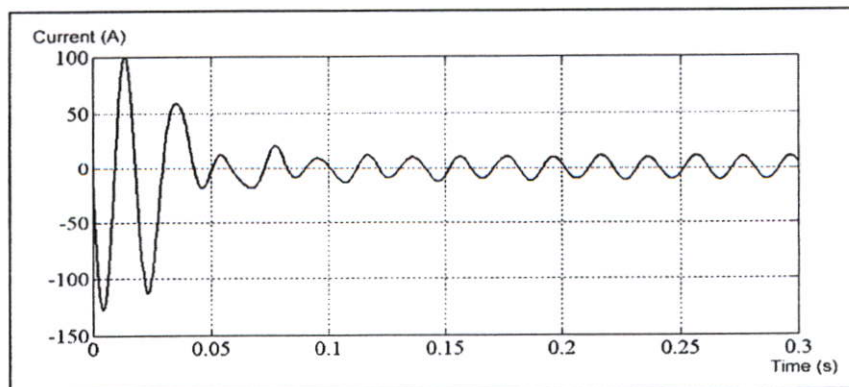
รูปที่ 4.8 กระแสที่ได้จากการวัดจริง [17]



รูปที่ 4.9 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary

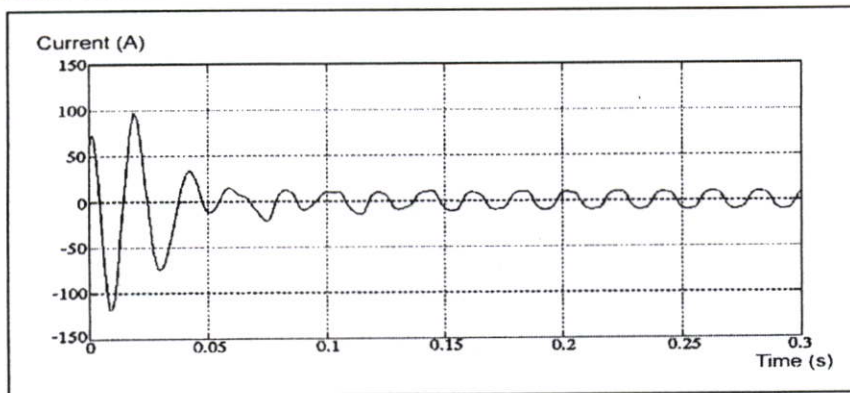


รูปที่ 4.10 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor

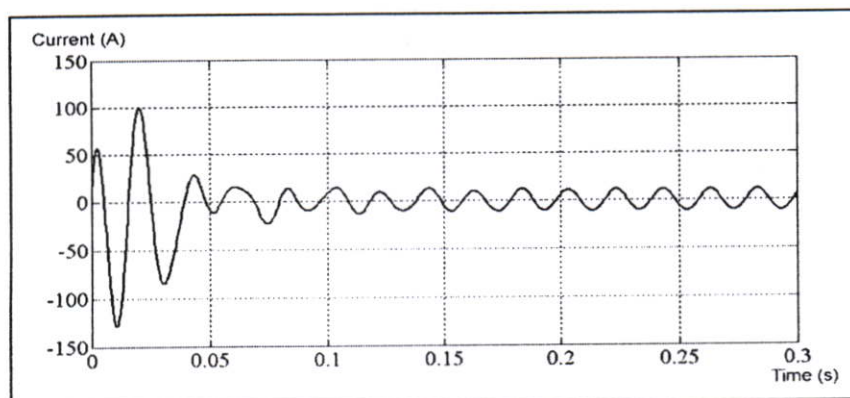


รูปที่ 4.11 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous

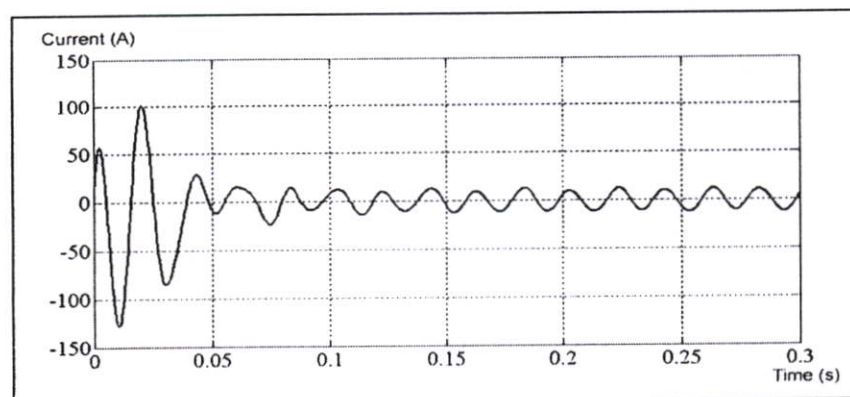
4.4.3 ผลการทดสอบกรณีที่ 1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase C)



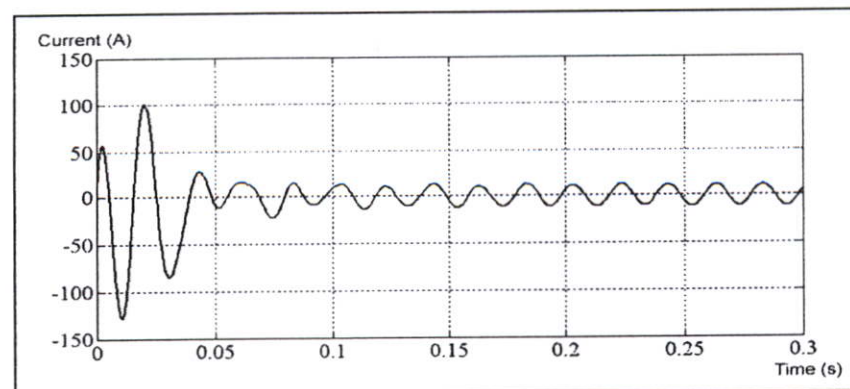
รูปที่ 4.12 กระแสที่ได้จากการวัดจริง [17]



รูปที่ 4.13 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary

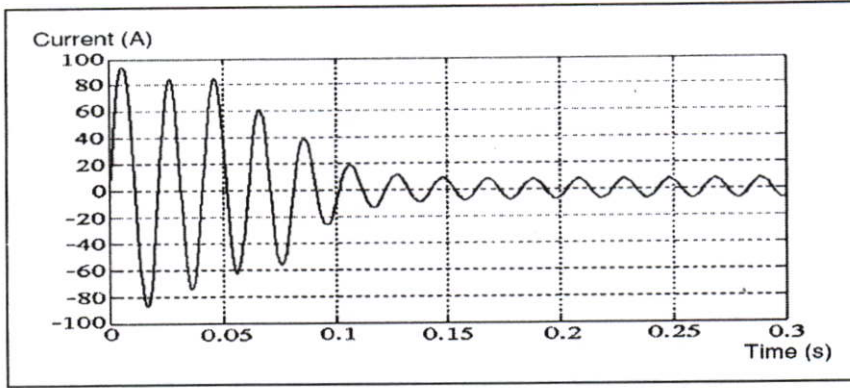


รูปที่ 4.14 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor

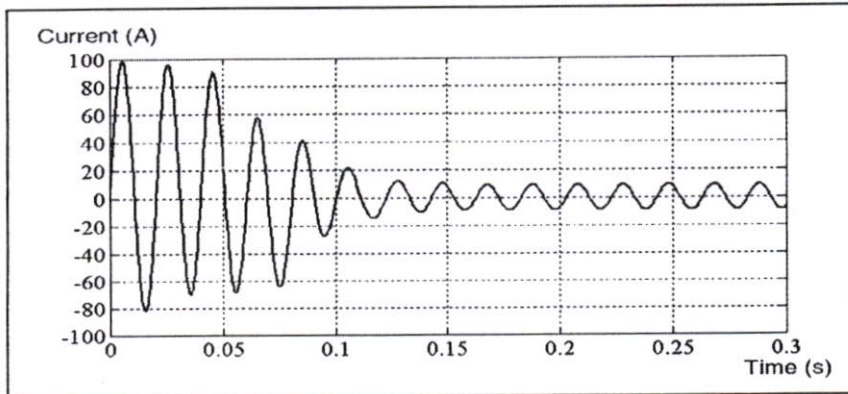


รูปที่ 4.15 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous

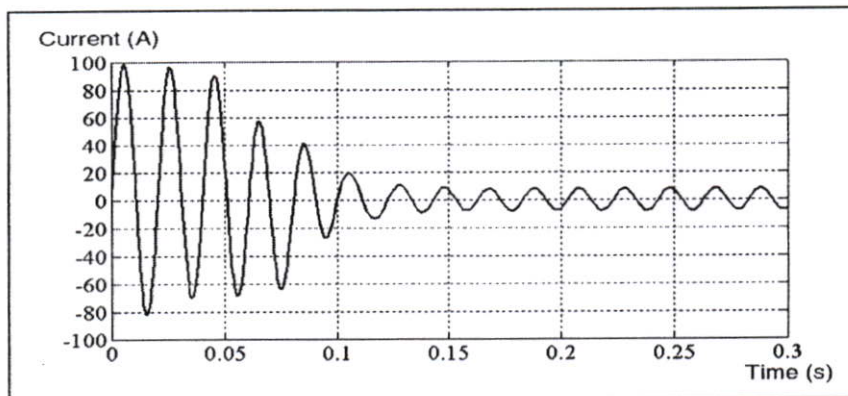
4.4.4 ผลการทดสอบกรณีที่ 2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase A)



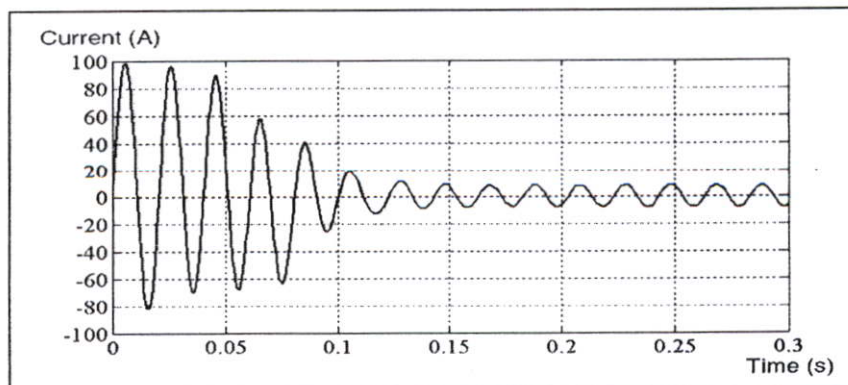
รูปที่ 4.16 กระแสที่ได้จากการวัดจริง [17]



รูปที่ 4.17 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary

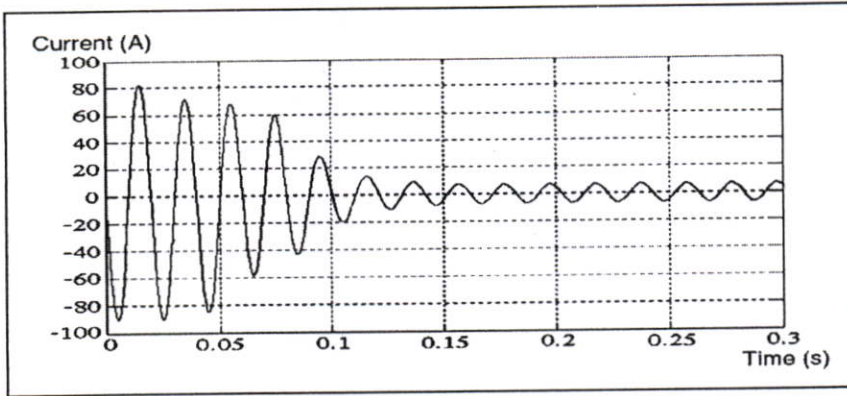


รูปที่ 4.18 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor

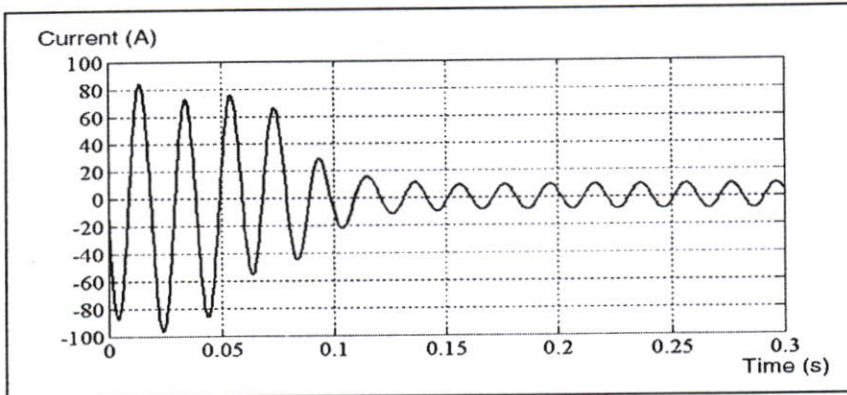


รูปที่ 4.19 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous

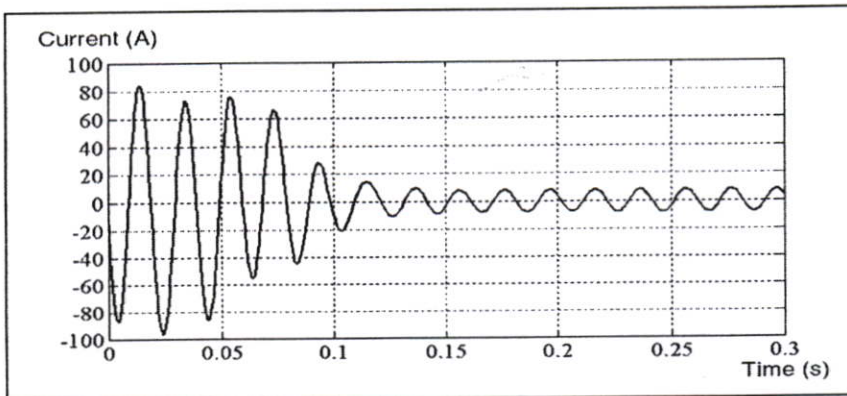
4.4.5 ผลการทดสอบกรณีที่ 2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase B)



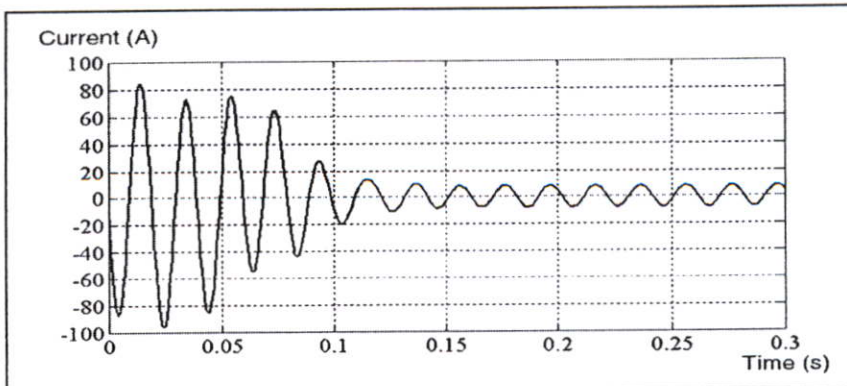
รูปที่ 4.20 กระแสที่ได้จากการวัดจริง [17]



รูปที่ 4.21 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary

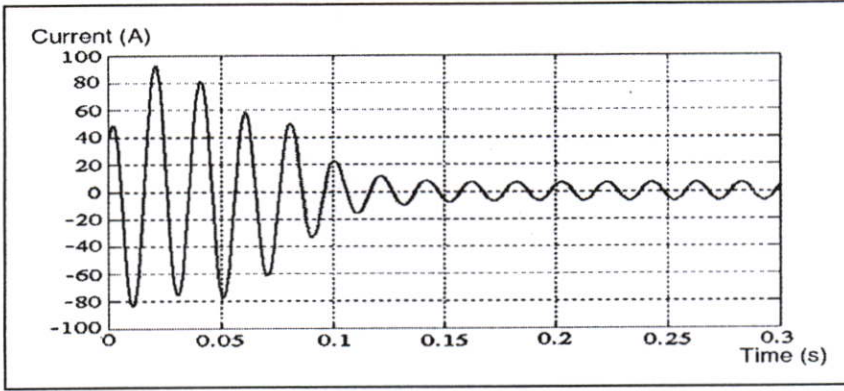


รูปที่ 4.22 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor

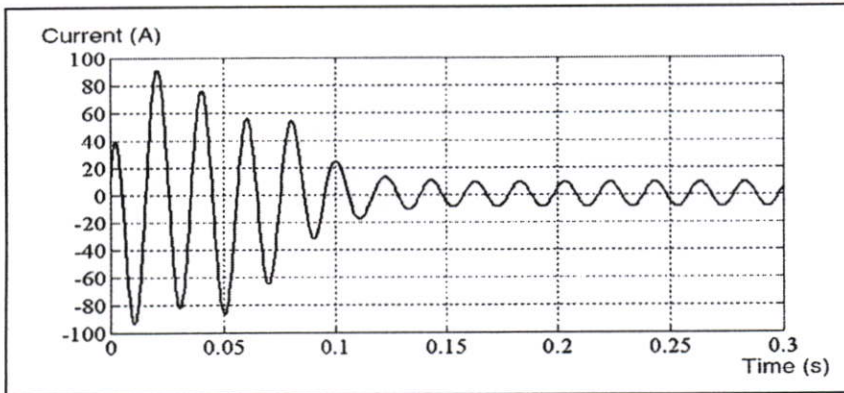


รูปที่ 4.23 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous

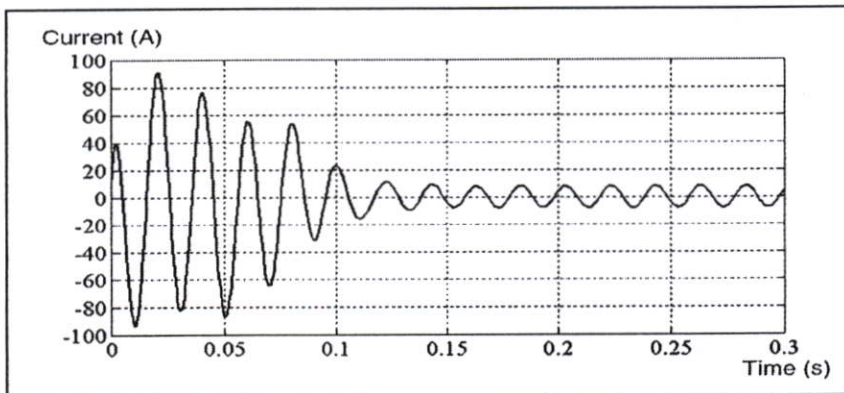
4.4.6 ผลการทดสอบกรณีที่ 2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase C)



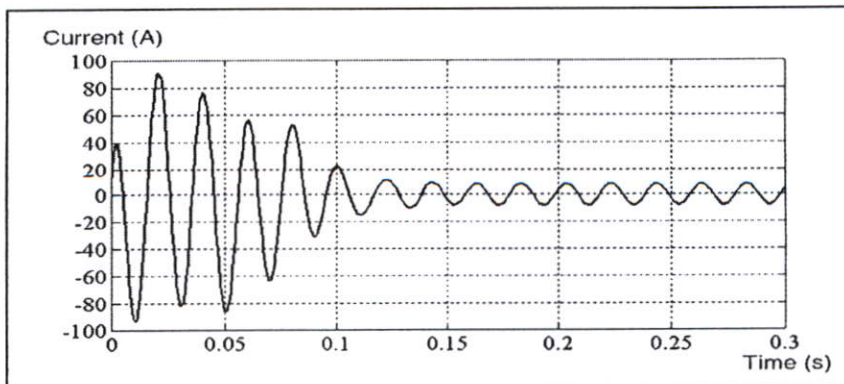
รูปที่ 4.24 กระแสที่ได้จากการวัดจริง [17]



รูปที่ 4.25 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary

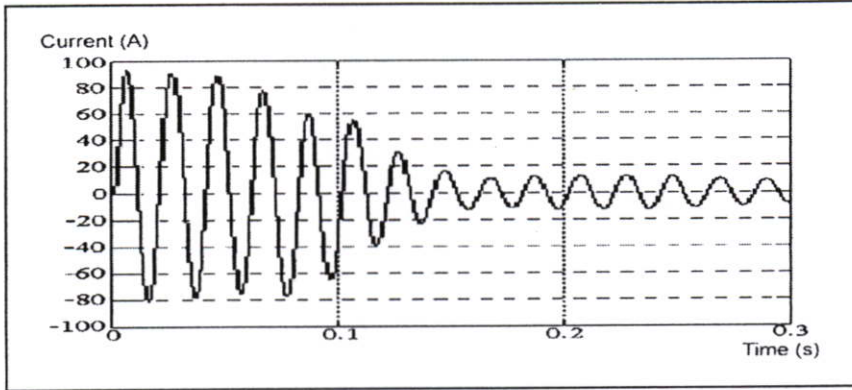


รูปที่ 4.26 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor

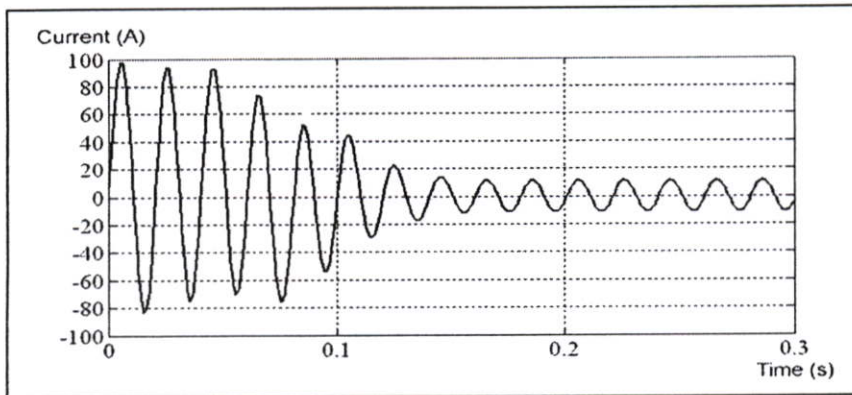


รูปที่ 4.27 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous

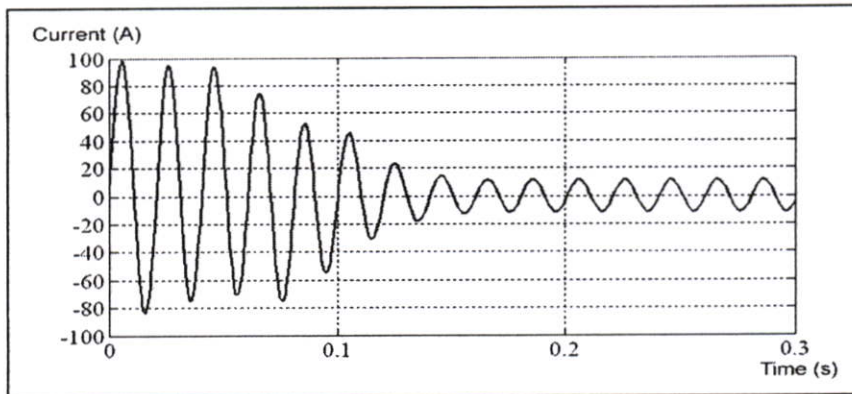
4.4.7 ผลการทดสอบกรณีที่ 3 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase A)



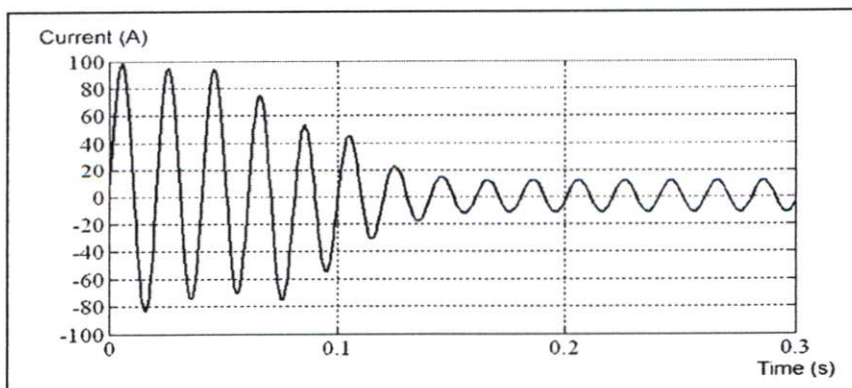
รูปที่ 4.28 กระแสที่ได้จากการวัดจริง [17]



รูปที่ 4.29 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary

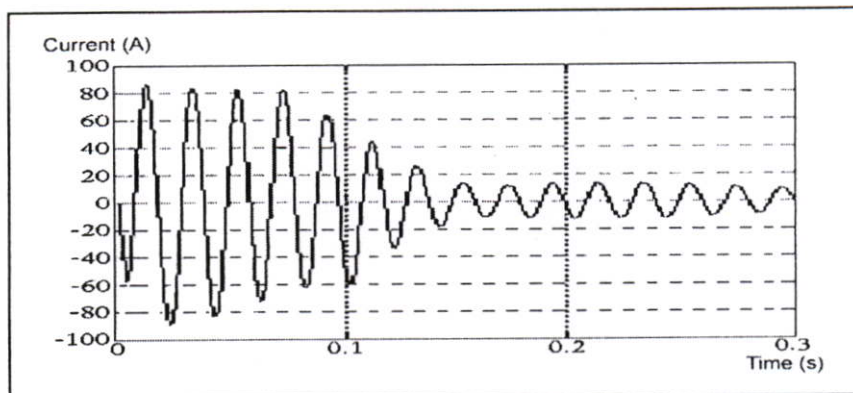


รูปที่ 4.30 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor

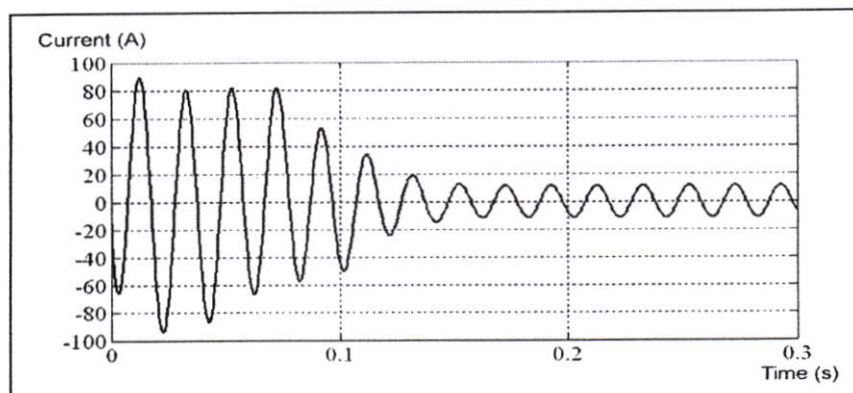


รูปที่ 4.31 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous

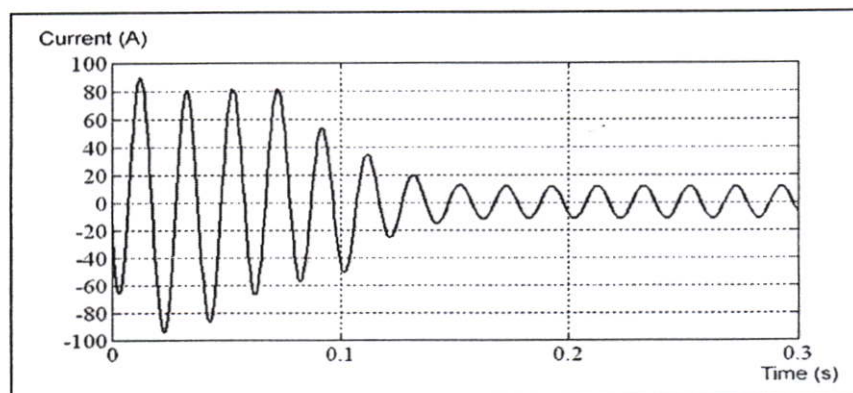
4.4.8 ผลการทดสอบกรณีที่ 3 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase B)



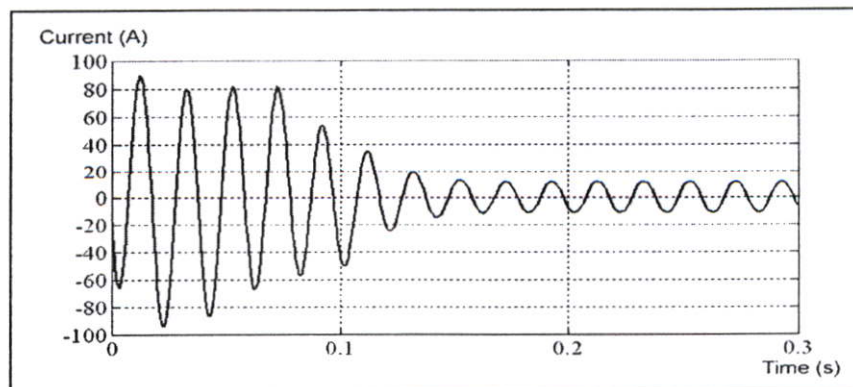
รูปที่ 4.32 กระแสที่ได้จากการวัดจริง [17]



รูปที่ 4.33 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary

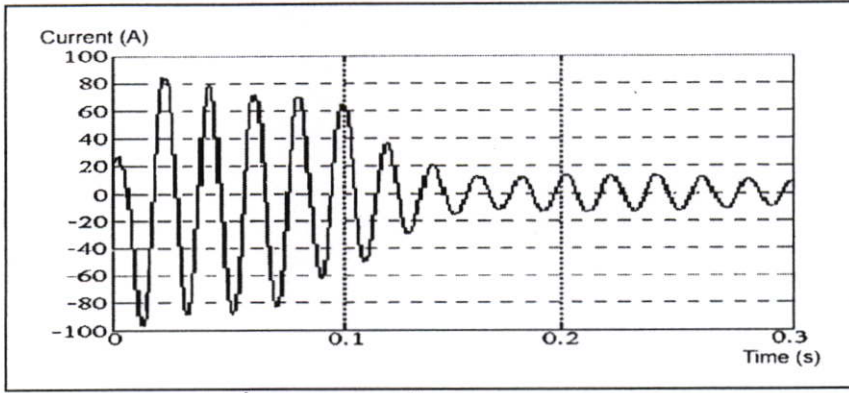


รูปที่ 4.34 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor

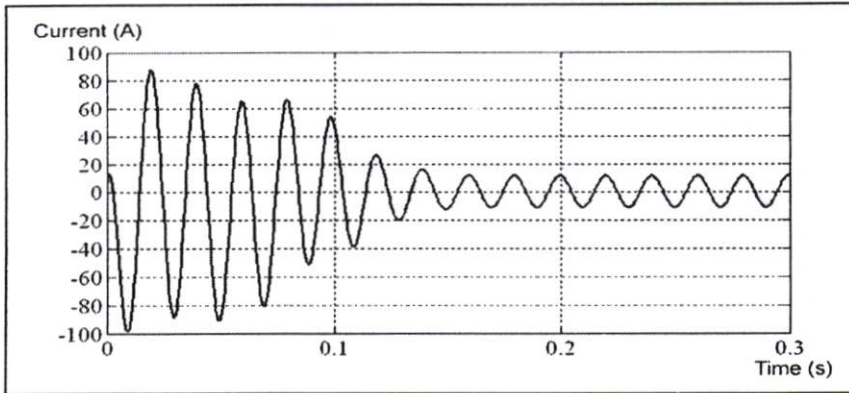


รูปที่ 4.35 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous

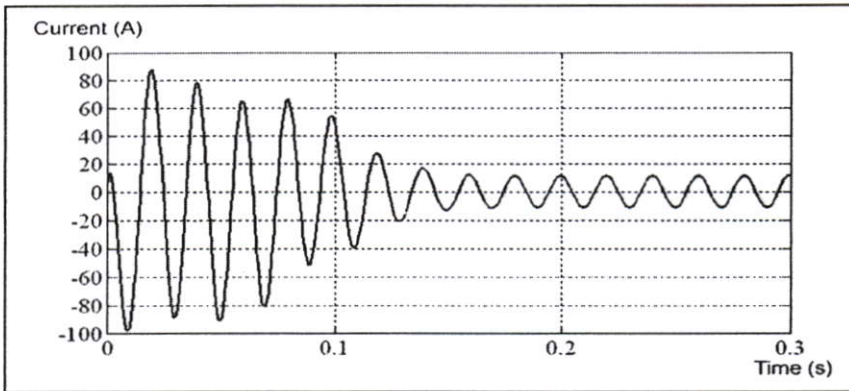
4.4.9 ผลการทดสอบกรณีที่ 3 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase C)



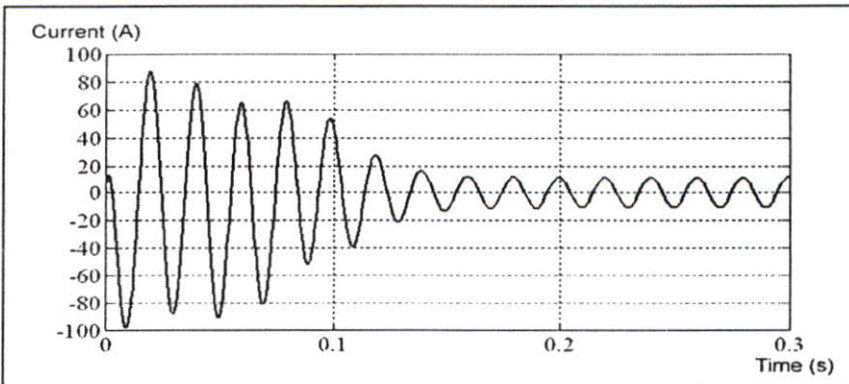
รูปที่ 4.36 กระแสที่ได้จากการวัดจริง [17]



รูปที่ 4.37 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary

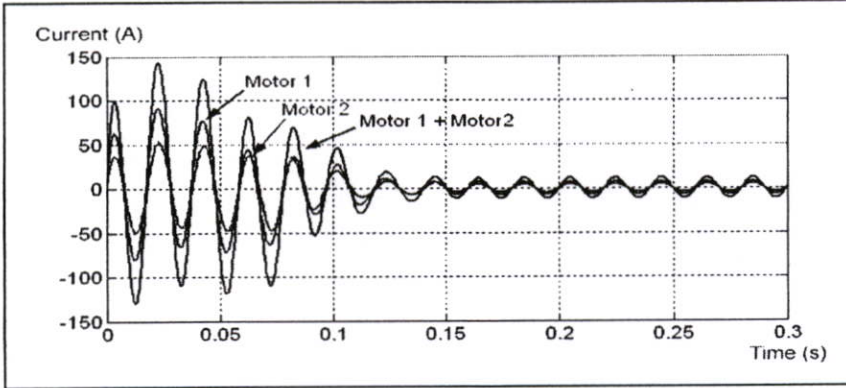


รูปที่ 4.38 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor

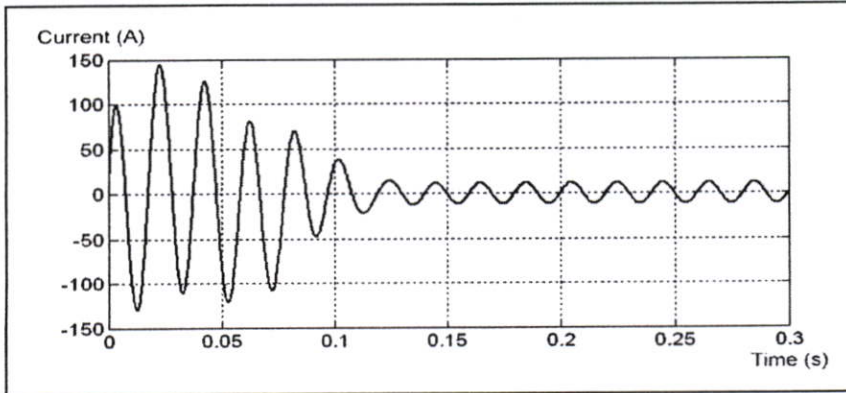


รูปที่ 4.39 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous

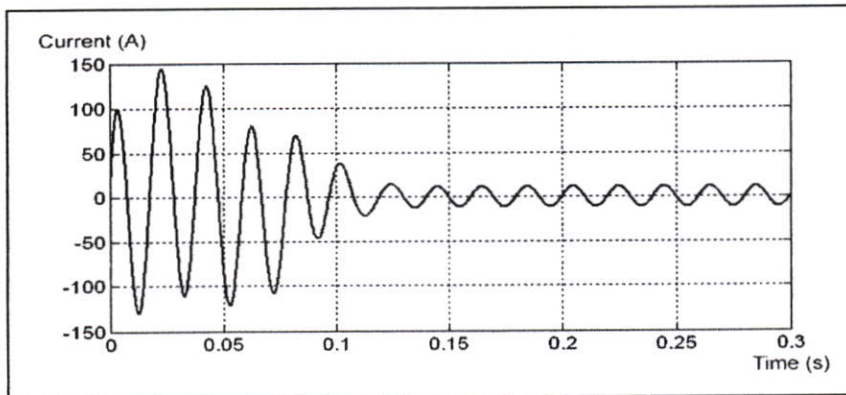
4.4.10 ผลการทดสอบกรณีที่ 4 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW และ 3.7 kW (Phase A)



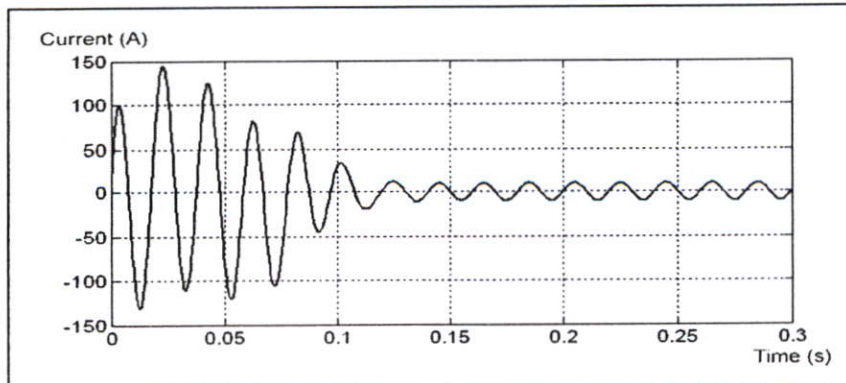
รูปที่ 4.40 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองแยกแต่ละตัว



รูปที่ 4.41 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary

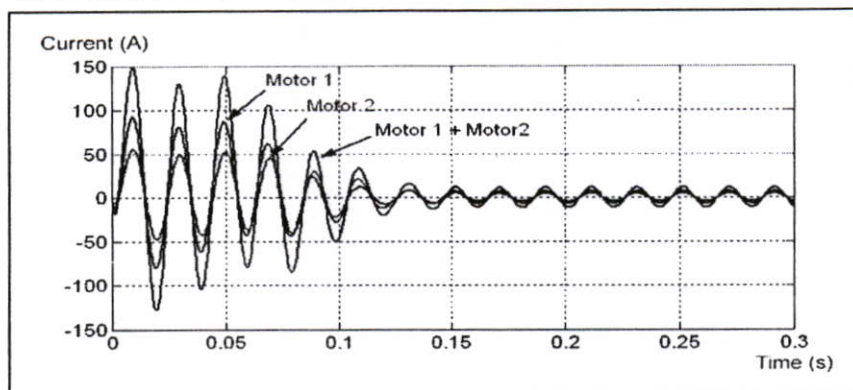


รูปที่ 4.42 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor

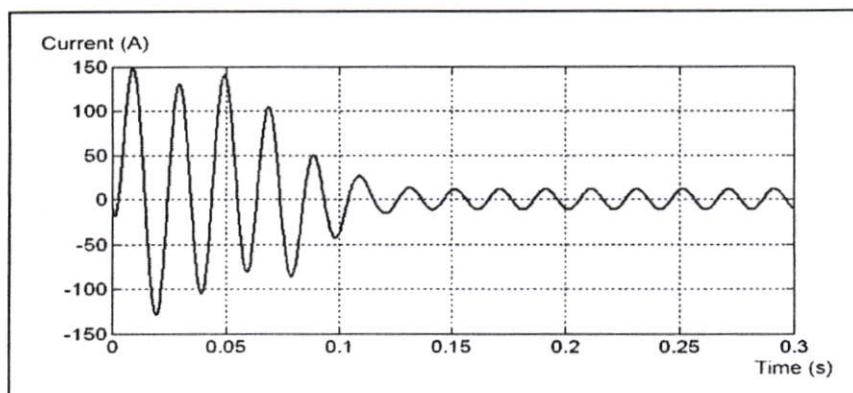


รูปที่ 4.43 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous

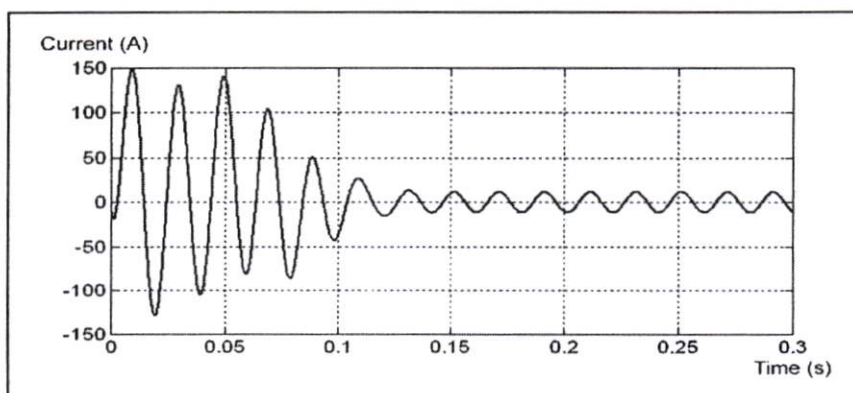
4.4.11 ผลการทดสอบกรณีที่ 4 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW และ 3.7 kW (Phase B)



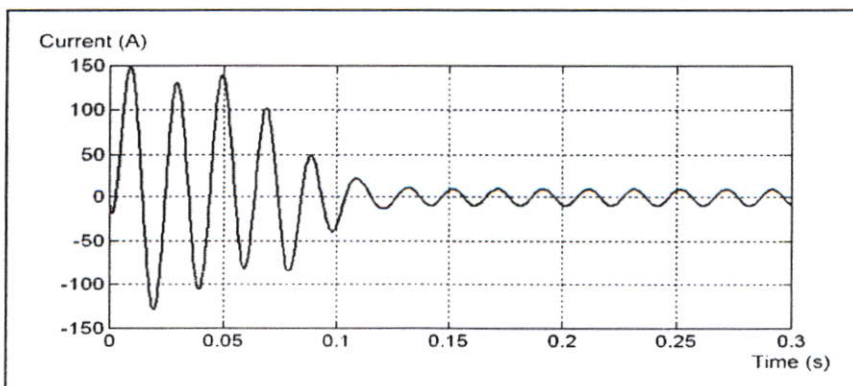
รูปที่ 4.44 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองแยกแต่ละตัว



รูปที่ 4.45 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary

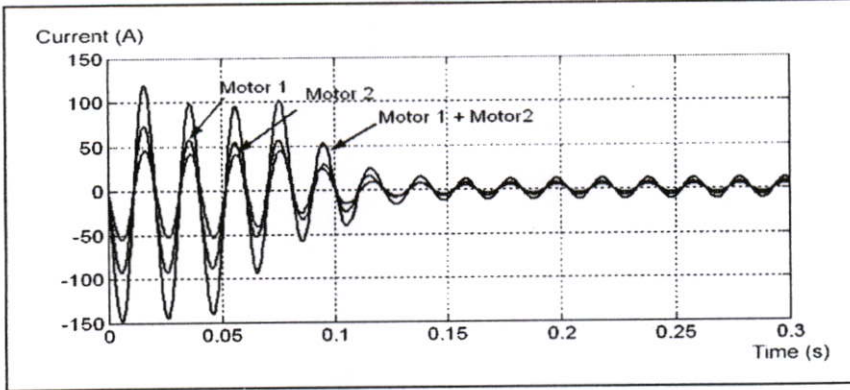


รูปที่ 4.46 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor

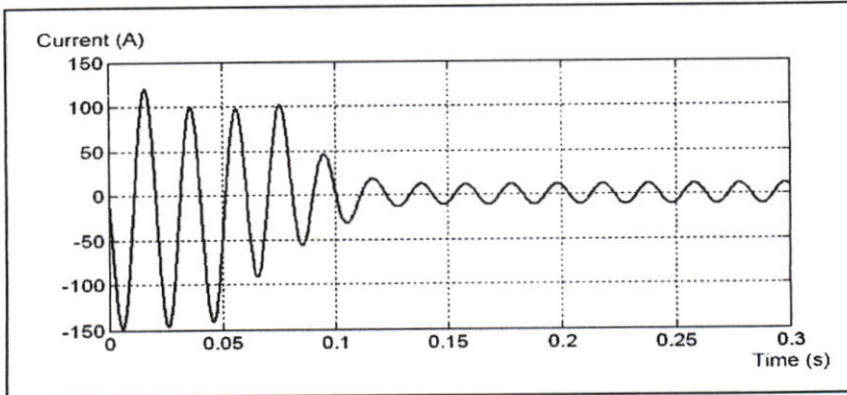


รูปที่ 4.47 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous

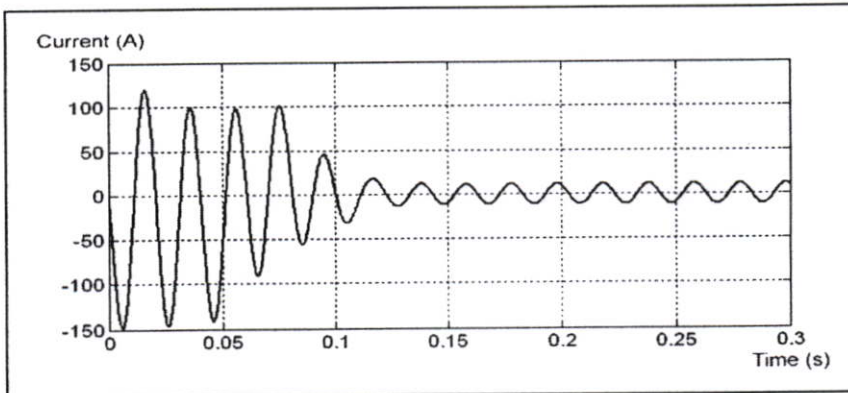
4.4.12 ผลการทดสอบกรณีที่ 4 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2 kW และ 3.7 kW (Phase C)



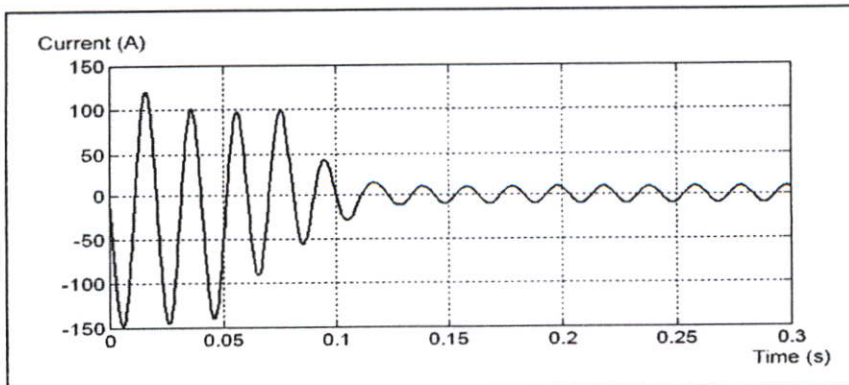
รูปที่ 4.48 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองแยกแต่ละตัว



รูปที่ 4.49 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary

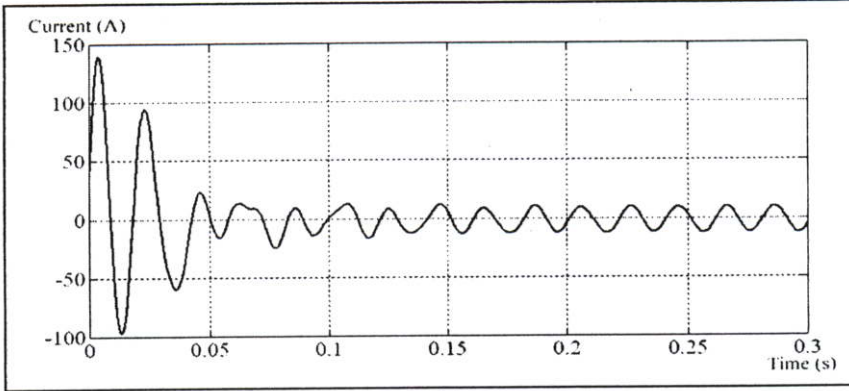


รูปที่ 4.50 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor

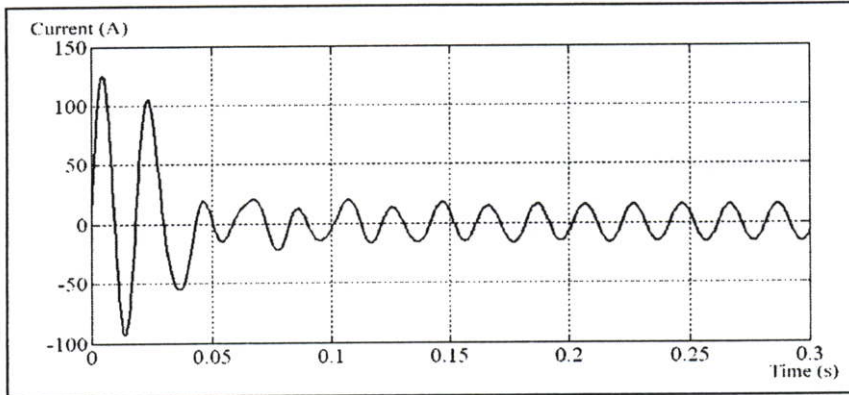


รูปที่ 4.51 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous

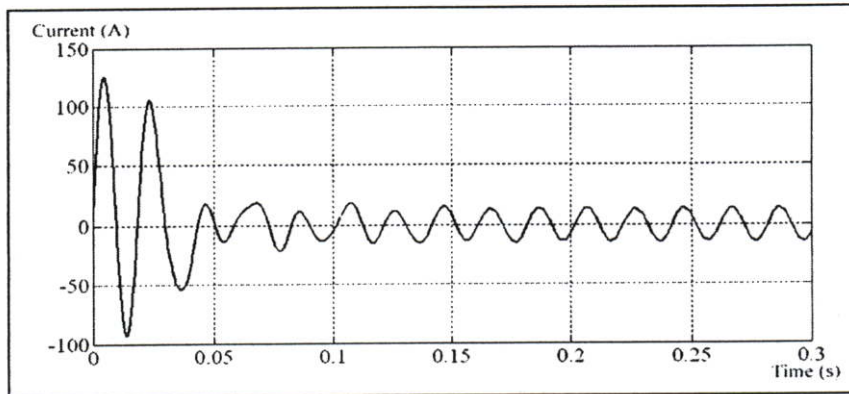
4.4.13 ผลการทดสอบกรณีที่ 5 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase A)



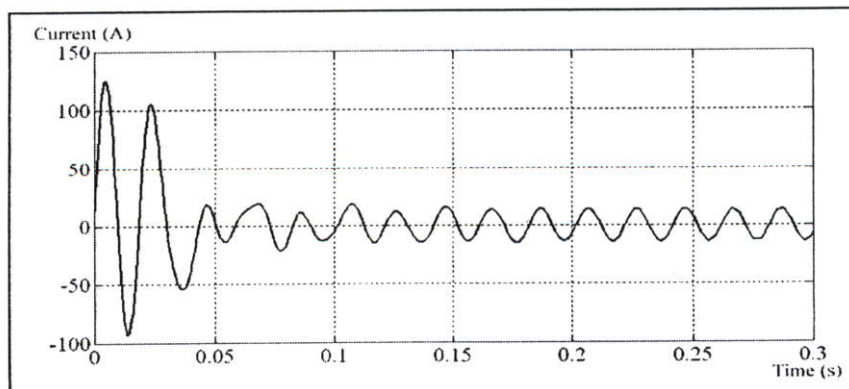
รูปที่ 4.52 กระแสที่ได้จากการวัดจริง



รูปที่ 4.53 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary

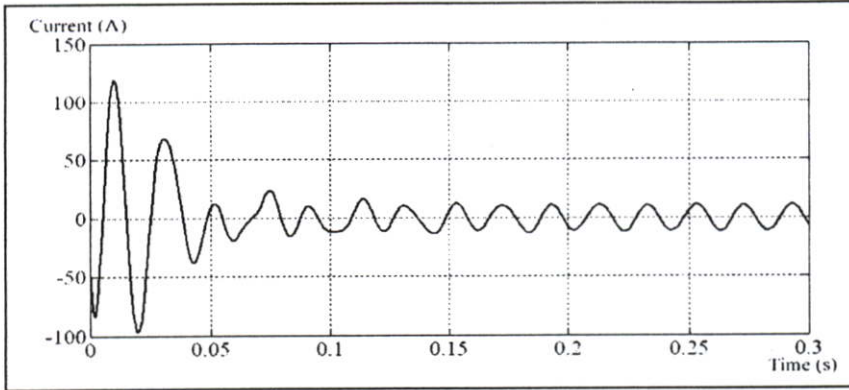


รูปที่ 4.54 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor

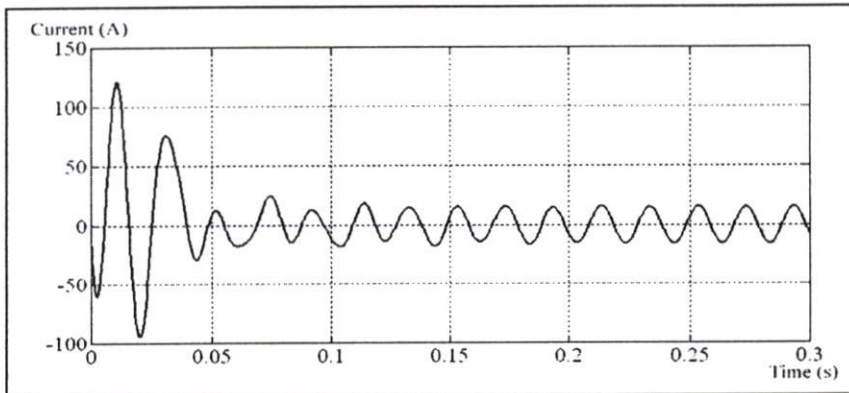


รูปที่ 4.55 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous

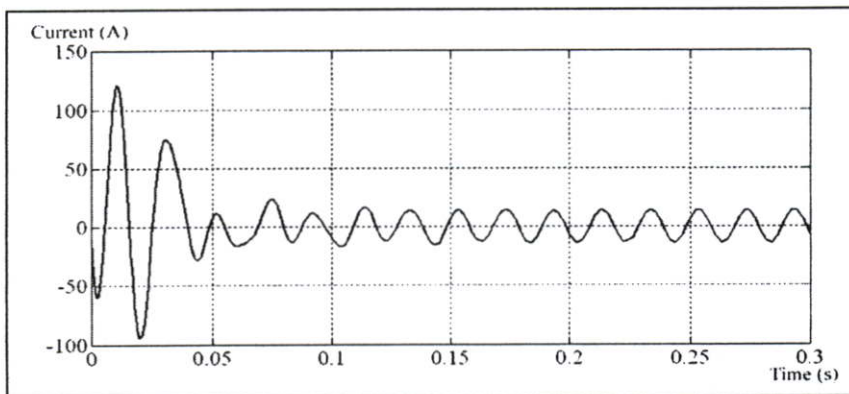
4.4.14 ผลการทดสอบกรณีที่ 5 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase B)



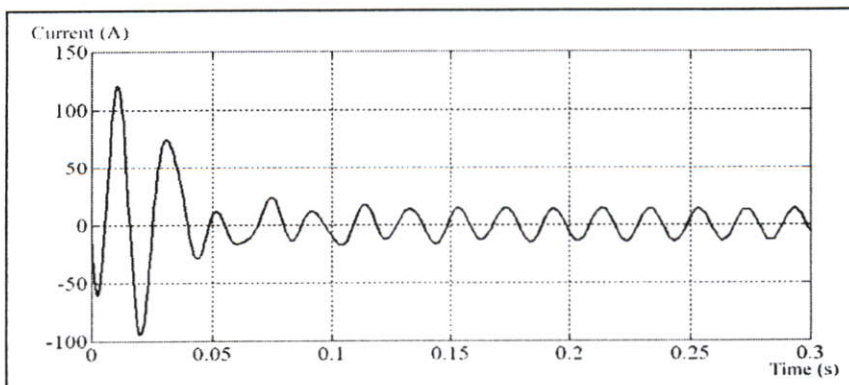
รูปที่ 4.56 กระแสที่ได้จากการวัดจริง



รูปที่ 4.57 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary

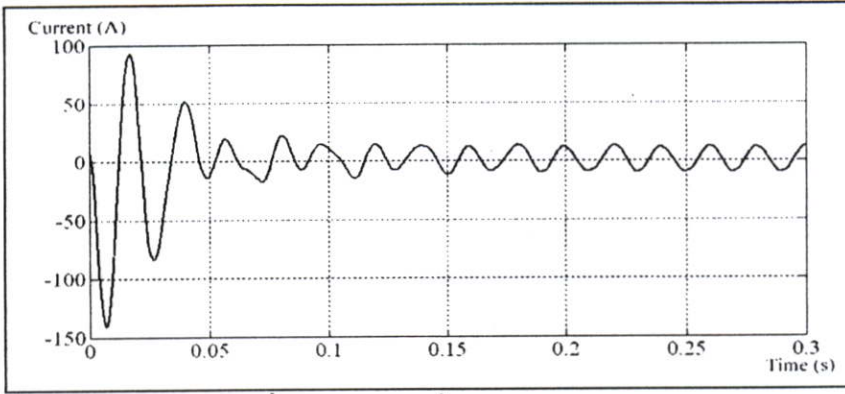


รูปที่ 4.58 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor

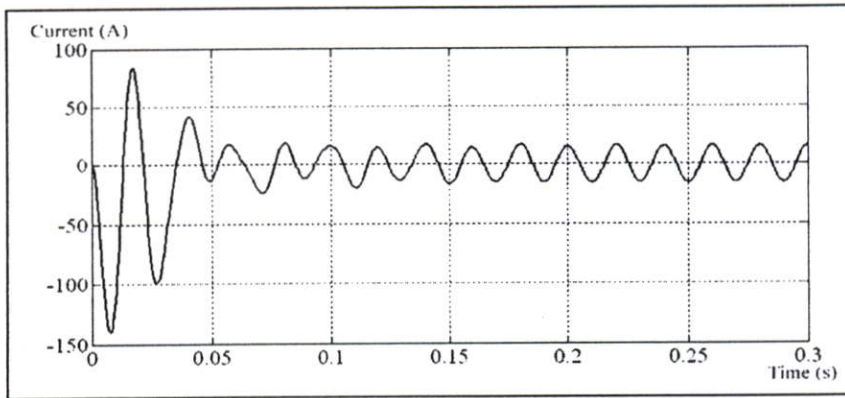


รูปที่ 4.59 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous

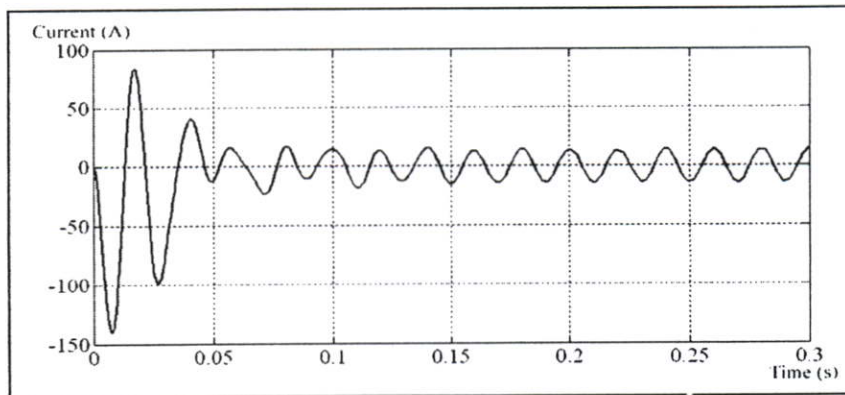
4.4.15 ผลการทดสอบกรณีที่ 5 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase C)



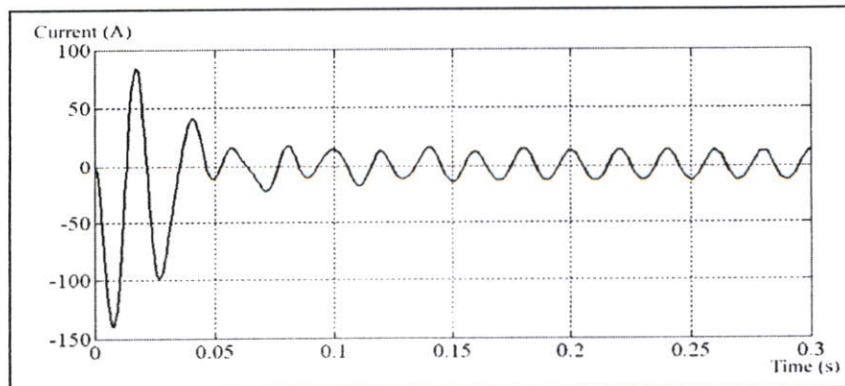
รูปที่ 4.60 กระแสที่ได้จากการวัดจริง



รูปที่ 4.61 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary

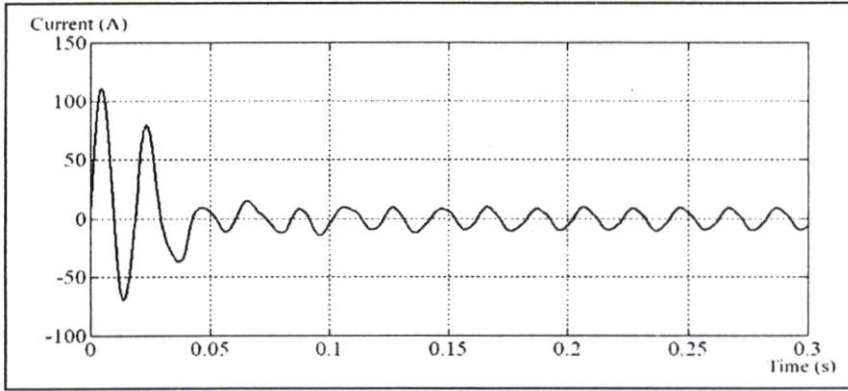


รูปที่ 4.62 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor

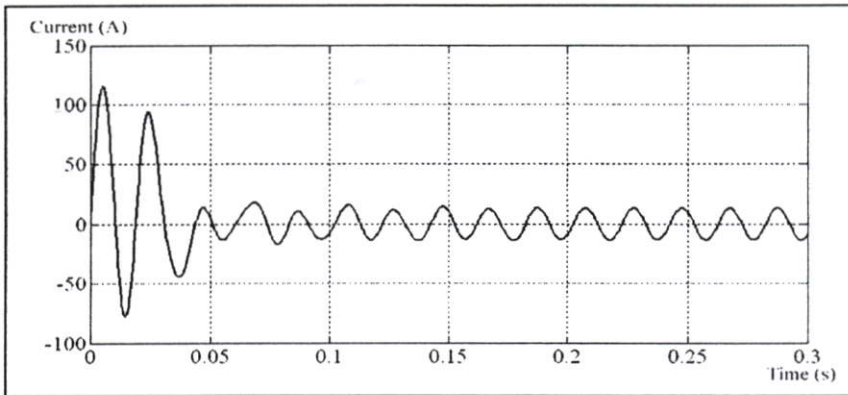


รูปที่ 4.63 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous

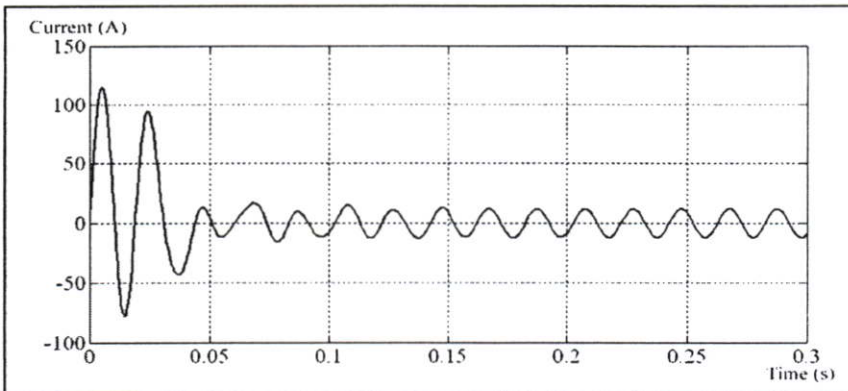
4.4.16 ผลการทดสอบกรณีที่ 6 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase A)



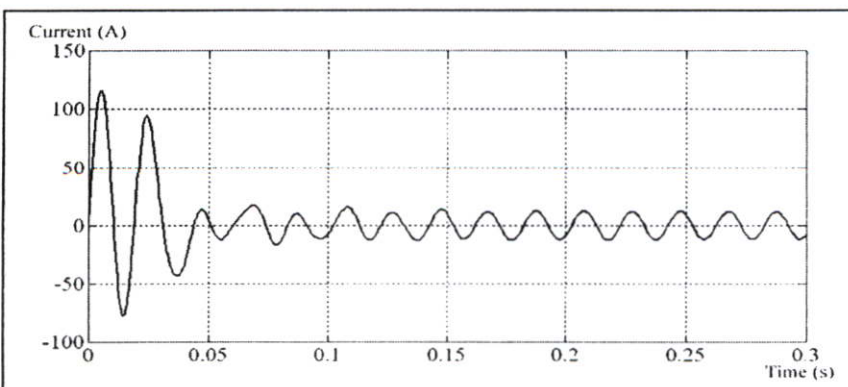
รูปที่ 4.64 กระแสที่ได้จากการวัดจริง



รูปที่ 4.65 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary

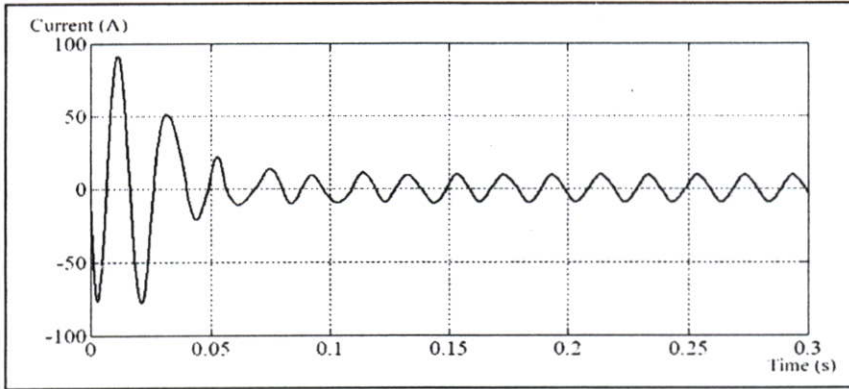


รูปที่ 4.66 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor

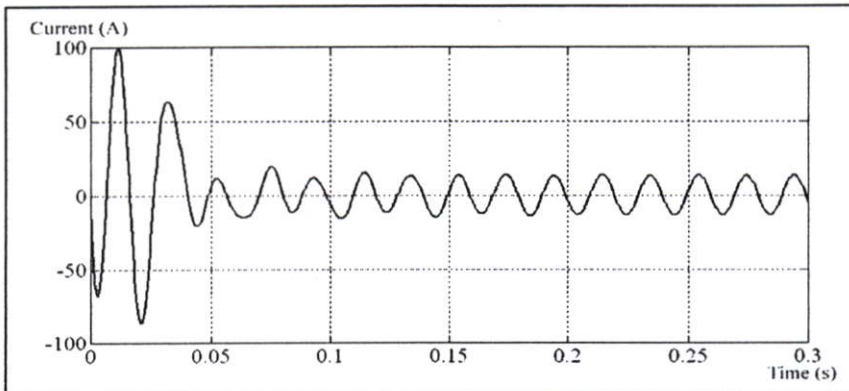


รูปที่ 4.67 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous

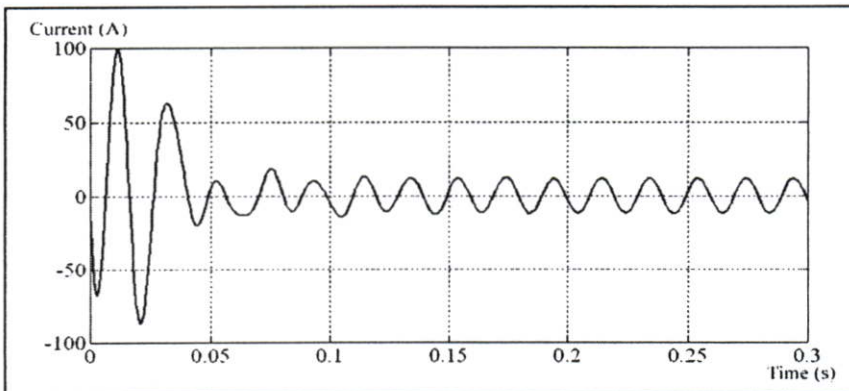
4.4.17 ผลการทดสอบกรณีที่ 6 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase B)



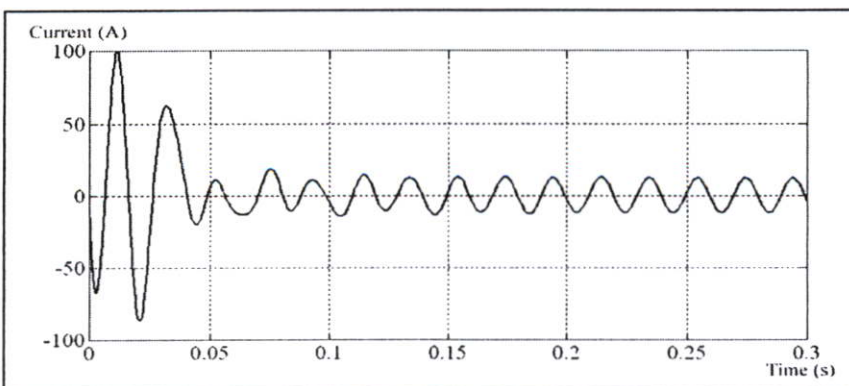
รูปที่ 4.68 กระแสที่ได้จากการวัดจริง



รูปที่ 4.69 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary

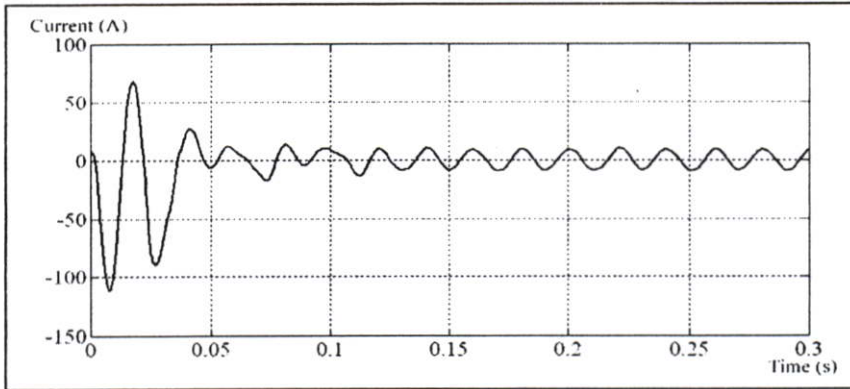


รูปที่ 4.70 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor

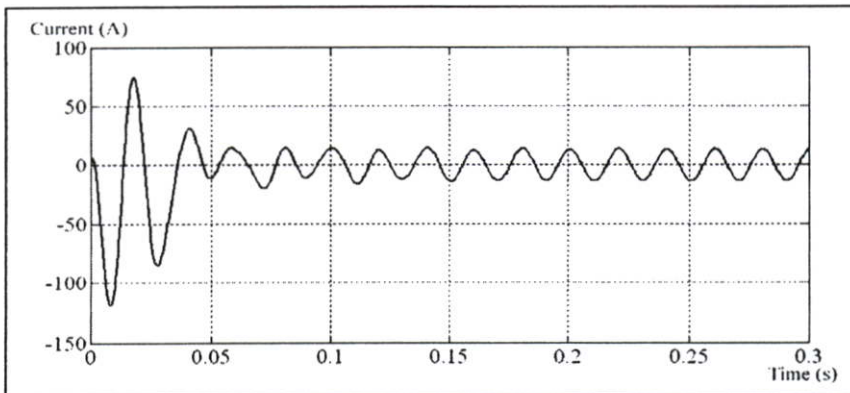


รูปที่ 4.71 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous

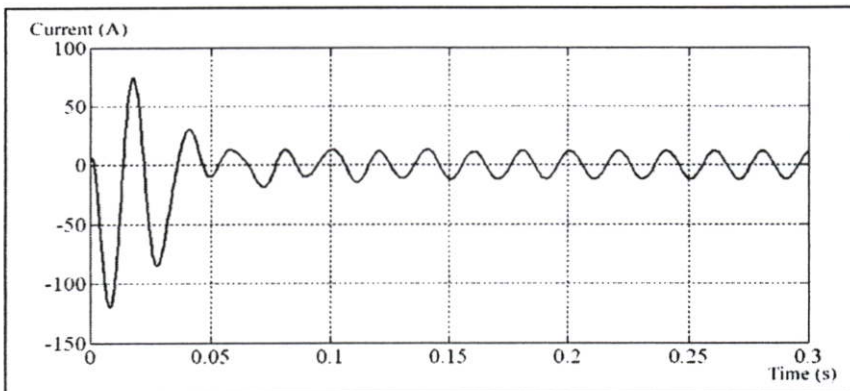
4.4.18 ผลการทดสอบกรณีที่ 6 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า, 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า (Phase C)



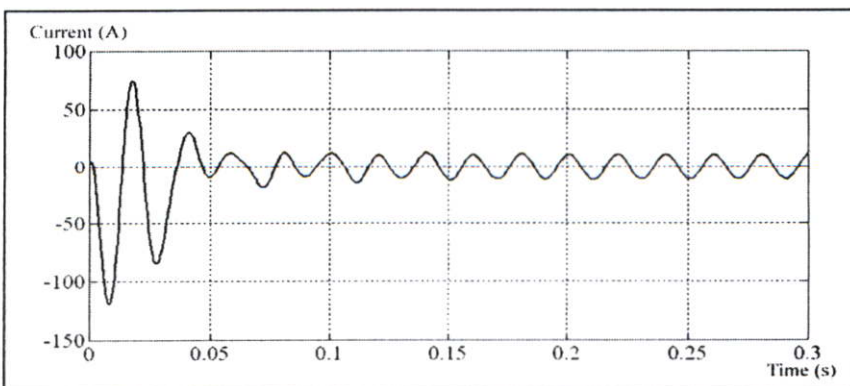
รูปที่ 4.72 กระแสที่ได้จากการวัดจริง



รูปที่ 4.73 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง stationary



รูปที่ 4.74 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง rotor



รูปที่ 4.75 กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยใช้กรอบอ้างอิง synchronous

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าสูงสุด (peak) ของกระแสขณะเริ่มต้นหมุน

กระแส	ผลจากการวัด (A)	ผลจากแบบจำลอง (A)	Error (%)
กรณีที่ 1	141.1	146.7	3.96
กรณีที่ 2	94.64	98.03	3.58
กรณีที่ 3	96.32	98.95	2.73
กรณีที่ 4	145.7	148.5	1.92
กรณีที่ 5	140.8	146.4	3.97
กรณีที่ 6	112.0	119.7	6.87

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่ากระแสในสภาวะอยู่ตัว (steady state)

กระแส	ผลจากการวัด (A)	ผลจากแบบจำลอง (A)	Error (%)
กรณีที่ 1	11.95	12.91	8.03
กรณีที่ 2	8.67	9.23	6.46
กรณีที่ 3	12.05	12.97	7.63
กรณีที่ 4	10.10	10.38	2.78
กรณีที่ 5	13.50	14.74	9.18
กรณีที่ 6	10.80	11.45	6.02

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าคงที่เวลา (time constant)

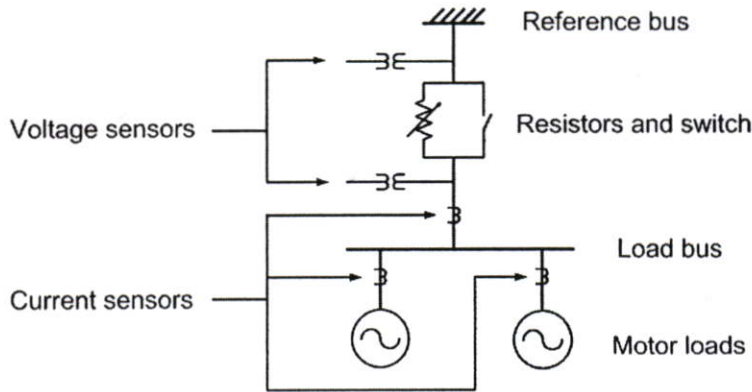
ค่าคงที่เวลา	ผลจากการวัด (s)	ผลจากแบบจำลอง (s)	Error (%)
กรณีที่ 1	0.038	0.035	7.89
กรณีที่ 2	0.075	0.071	5.33
กรณีที่ 3	0.100	0.092	8.00
กรณีที่ 4	0.068	0.065	4.41
กรณีที่ 5	0.040	0.037	7.50
กรณีที่ 6	0.034	0.032	5.88

4.5 กรณีศึกษาสภาวะพลวัต

จากผลการทดสอบในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่า แบบจำลองการรวมกลุ่มให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวัด และผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้แบบจำลองแบบแยกแต่ละตัว จึงนำแบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้นำเสนอมาใช้ในการศึกษาผลตอบสนองพลวัตของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มที่เคยมีการนำเสนอใน [4,9]

4.5.1 ผลตอบสนองพลวัตเนื่องจากแรงดันตกทันทีทันใด [9]

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 ตัวต่อขนานอยู่ในบัสเดียวกัน โดยมีค่าพิกัดและตัวแปรต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 เงื่อนไขของการทดสอบ คือ จ่ายแรงดันขนาด 120 V 60 Hz ให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 ตัว ขนาด 2.5 แรงม้า และ 0.25 แรงม้าที่ต่อขนานกัน มีภาระเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน และในสถานะอยู่ตัว (steady-state) ขนาดของแรงดันลดลงทันทีทันใดจาก 120 V (1.0 pu.) เหลือ 104 V (0.87 pu) ทำการวัดผลตอบสนองพลวัตของกำลังไฟฟ้า active (P) และกำลังไฟฟ้า reactive (Q)



รูปที่ 4.76 ระบบทดสอบที่ใช้ศึกษาผลตอบสนองพลวัตเนื่องจากแรงดันตกทันทีทันใด [9]

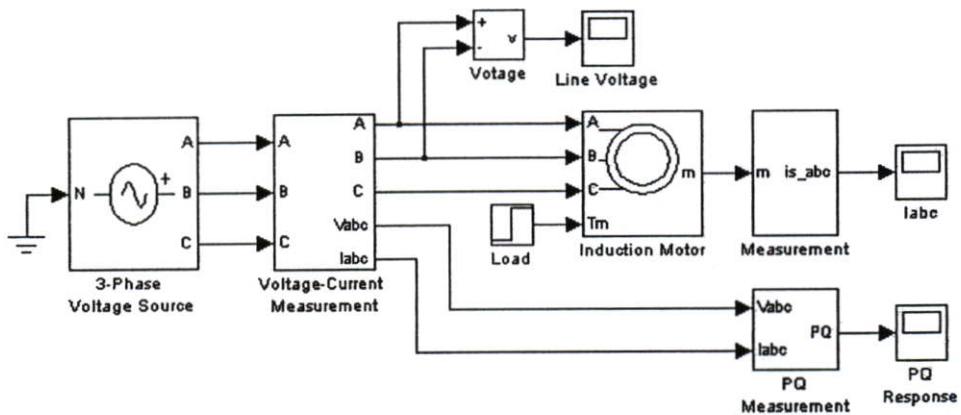
ตารางที่ 4.5 ค่าพิกัดและตัวแปรต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรณีศึกษาแรงดันตกทันทีทันใด

No.		1	2
Output Power	P	2.5 hp	0.25 hp
Voltage (line-line)	V [V]	208	208
Frequency	f [Hz]	60	60
Number of Poles		4	4
Base Quantities :			
Voltage	V_b [V]	120	120
Current	I_b [A]	5.7	5.7
Impedance	Z_b [Ω]	21.09	21.09
Parameters :			
Resistances	R_s [pu.]	0.1019	0.6828
	R_r [pu.]	0.1574	0.8962
Reactances	X_{ls} [pu.]	0.1636	0.3618
	X_{lr} [pu.]	0.1636	0.3618
	X_m [pu.]	4.5379	7.5395
Moment of Inertia	J [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]	0.358	0.000714

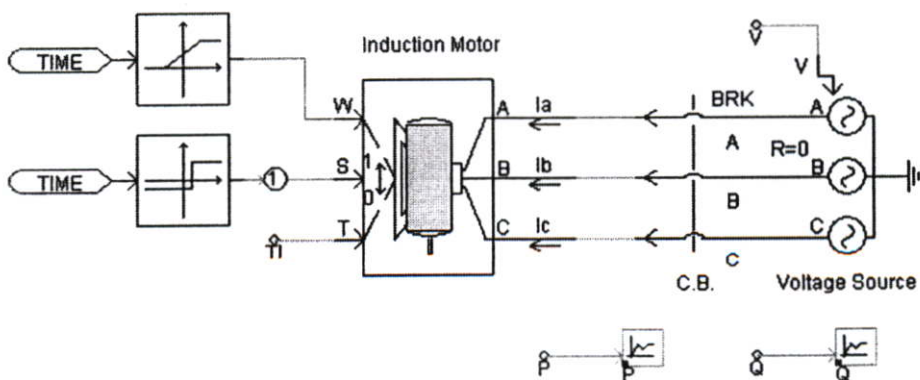
ทำการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems และ PSCAD/EMTDC เปรียบเทียบ กับผลที่ได้จากการวัด [9] และผลที่ได้จากแบบจำลองแบบ third order ที่เคยมีการนำเสนอก่อนหน้านี้

ตารางที่ 4.6 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองการรวมกลุ่มในกรณีศึกษาแรงดันตกที่ทันได

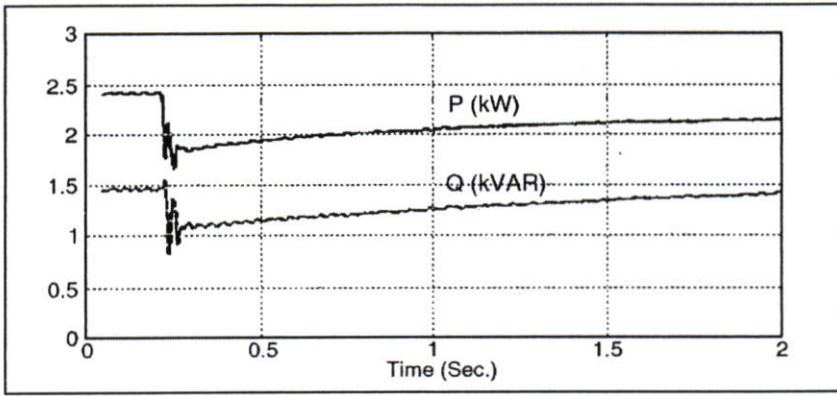
Parameters			IMag
Resistances	R_s	[pu.]	0.1349
	R_r	[pu.]	0.1010
Reactances	X_{ls}	[pu.]	0.1241
	X_{lr}	[pu.]	0.1241
	X_m	[pu.]	2.8263
Moment of Inertia	J	[kg.m ²]	0.3587
Power	P		2.75 hp
Number of Poles			4



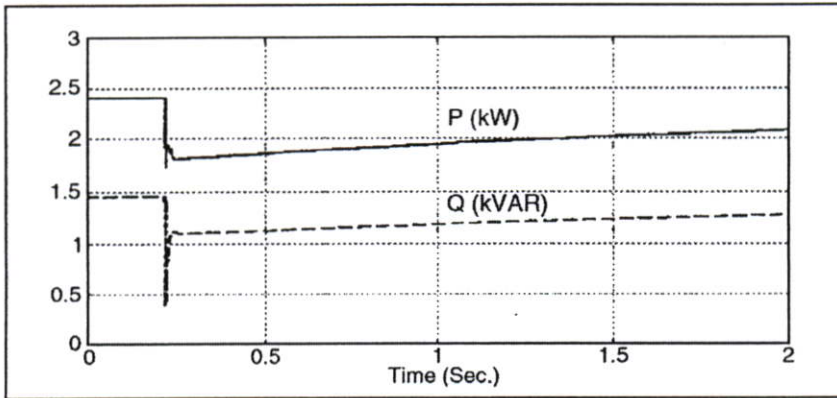
รูปที่ 4.77 แบบจำลองสภาวะแรงดันตกที่ทันไดโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems



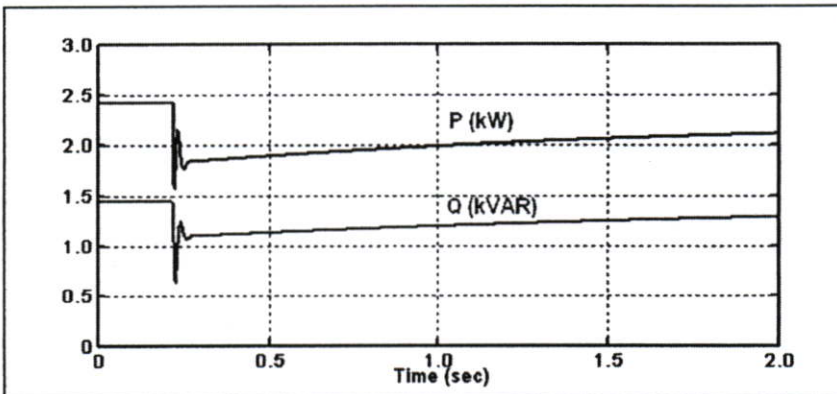
รูปที่ 4.78 แบบจำลองสภาวะแรงดันตกที่ทันไดโดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC



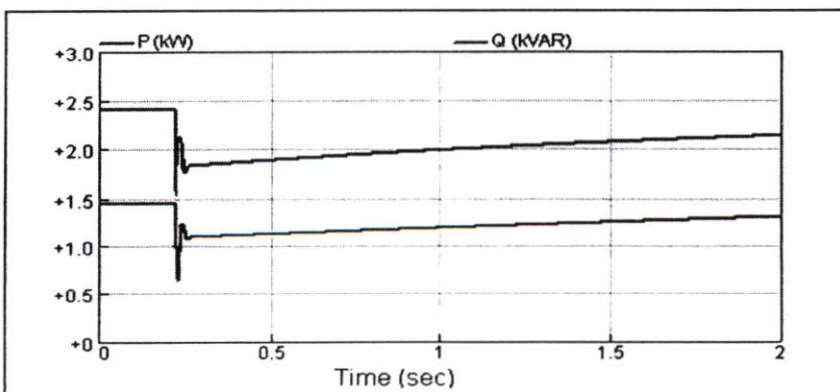
รูปที่ 4.79 ผลตอบสนอง P,Q ที่ได้จากการวัด [9]



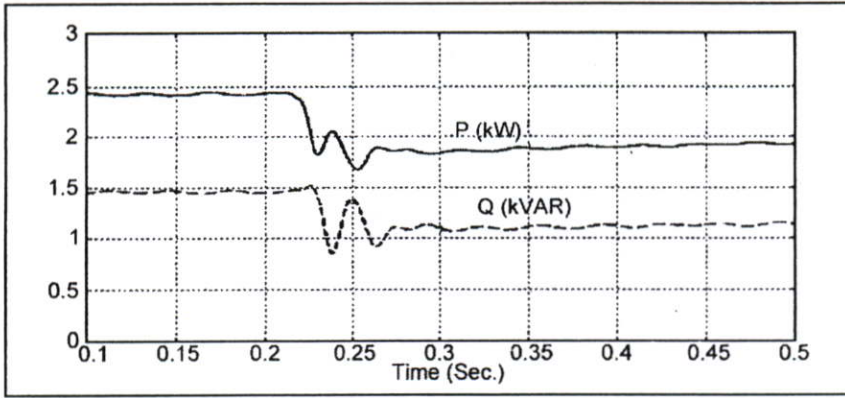
รูปที่ 4.80 ผลตอบสนอง P,Q ที่ได้จากแบบจำลองแบบ third order [9]



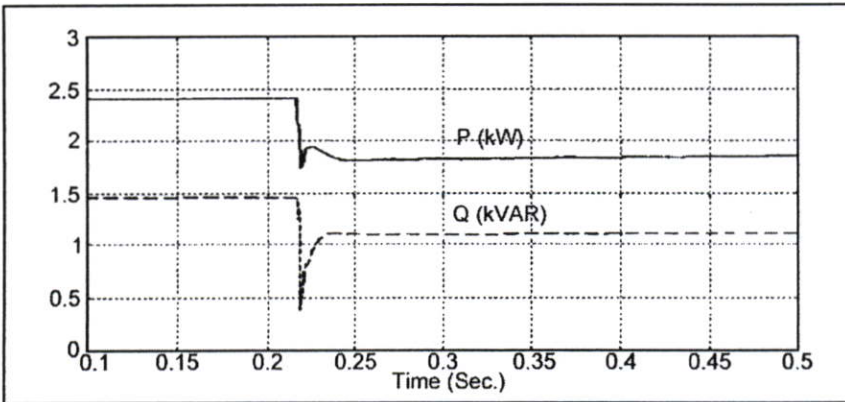
รูปที่ 4.81 ผลตอบสนอง P,Q ที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มโดย MATLAB/SimPowerSystems



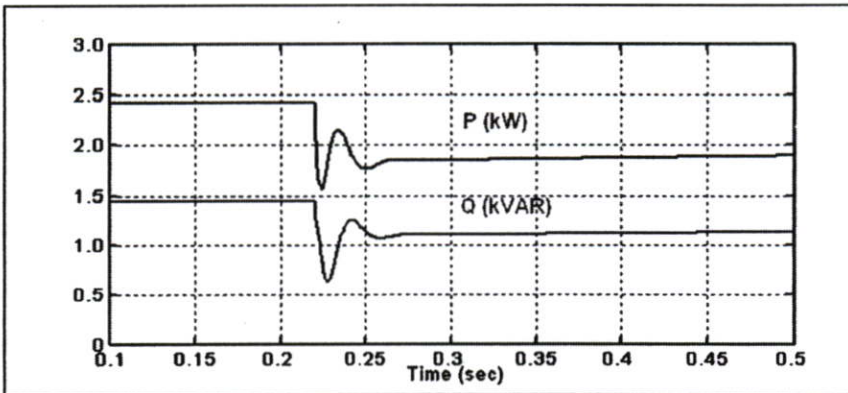
รูปที่ 4.82 ผลตอบสนอง P,Q ที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มโดย PSCAD/EMTDC



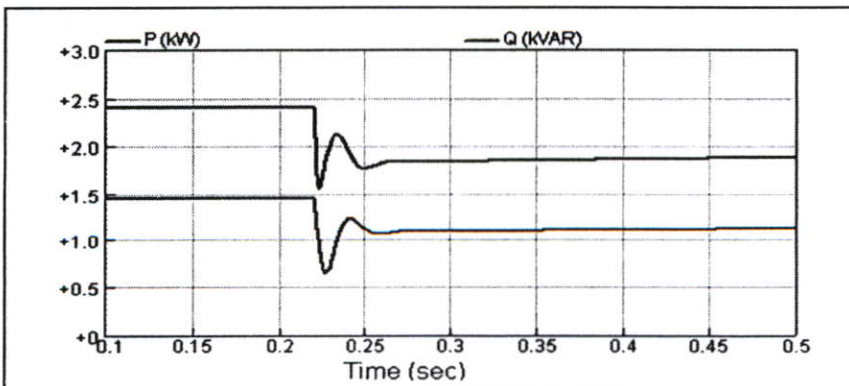
รูปที่ 4.83 ผลตอบสนอง P,Q ที่ได้จากการวัด [9] (ขยายในช่วง 0.4 วินาที)



รูปที่ 4.84 ผลตอบสนอง P,Q ที่ได้จากแบบจำลองแบบ third order [9] (ขยายในช่วง 0.4 วินาที)



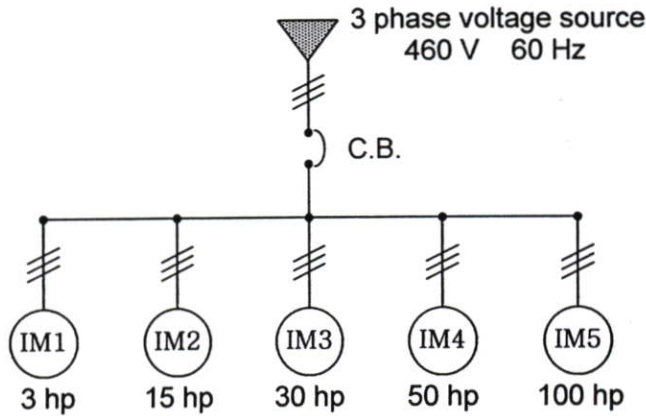
รูปที่ 4.85 ผลตอบสนอง P,Q ที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มโดย MATLAB/SimPowerSystems



รูปที่ 4.86 ผลตอบสนอง P,Q ที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มโดย PSCAD/EMTDC

4.5.2 ผลตอบสนองพลวัตเนื่องจากการเปิดวงจรชั่วขณะ [4]

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 ตัวต่อขนานอยู่ในบัสเดียวกัน โดยมีค่าพิกัดและตัวแปรต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 เงื่อนไขของการทดสอบ คือ จ่ายแรงดันขนาด 460 V 60 Hz ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5 ตัว ขนาด 3 แรงม้า, 15 แรงม้า, 30 แรงม้า, 50 แรงม้า และ 100 แรงม้าที่ต่อขนานกัน และในสถานะอยู่ตัว (steady-state) มีการเปิดวงจรตัดแหล่งจ่ายออกจากระบบเป็นเวลา 134 ms (8 cycles) ทำการวัดผลตอบสนองพลวัตของกระแสไฟฟ้า และแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของกลุ่มมอเตอร์



รูปที่ 4.87 ระบบทดสอบที่ใช้ศึกษาผลตอบสนองพลวัตเนื่องจากการเปิดวงจรชั่วขณะ

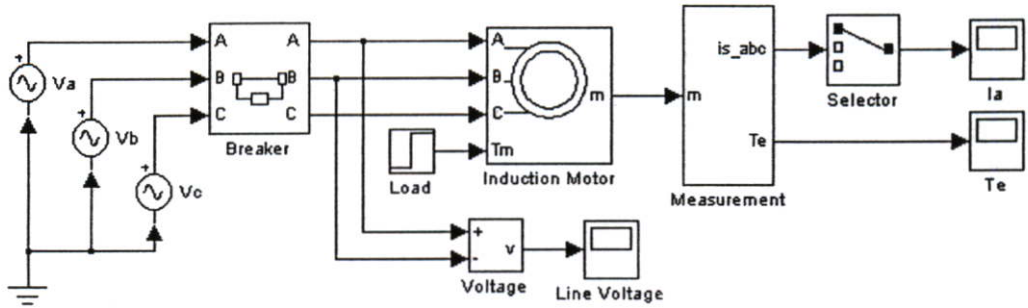
ตารางที่ 4.7 ค่าพิกัดและตัวแปรต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรณีศึกษาการเปิดวงจรชั่วขณะ

No.		1	2	3	4	5
Output Power	P	3 hp	15 hp	30 hp	50 hp	100 hp
Voltage (line-line)	V [V]	460	460	460	460	460
Frequency	f [Hz]	60	60	60	60	60
Number of Poles		4	4	4	4	4
Base Quantities :						
Voltage	V_b [V]	265.58	265.58	265.58	265.58	265.58
Current	I_b [A]	185.39	185.39	185.39	185.39	185.39
Impedance	Z_b [Ω]	1.433	1.433	1.433	1.433	1.433
Parameters :						
Resistances	R_s [pu.]	3.3925	1.0331	0.5096	0.2932	0.1745
	R_r [pu.]	1.2844	0.2164	0.1117	0.0977	0.0558
Reactances	X_{ls} [pu.]	1.8638	0.1256	0.1117	0.1047	0.0698
	X_{lr} [pu.]	1.8638	0.1256	0.1117	0.1047	0.0698
	X_m [pu.]	59.1111	17.3745	10.4429	6.6106	2.7713
Moment of Inertia	J [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]	0.09	0.50	1.00	1.66	2.70

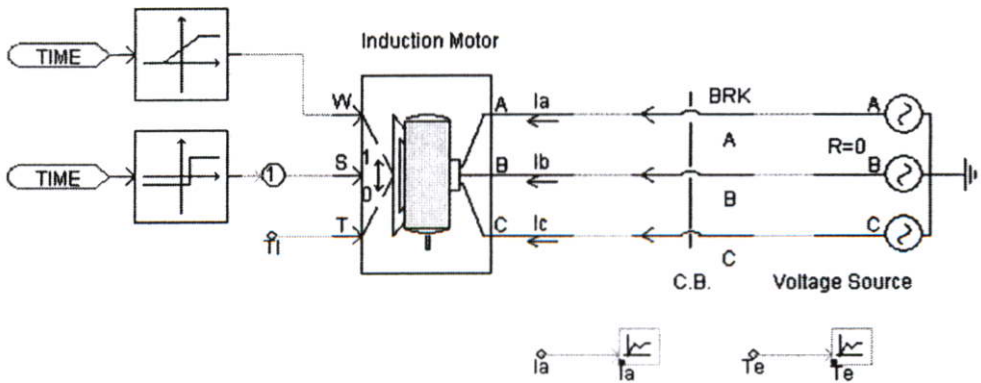
ทำการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems และ PSCAD/EMTDC เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มของ [4] ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองการรวมกลุ่มแสดงดังตาราง

ตารางที่ 4.8 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองการรวมกลุ่มในกรณีศึกษาการเปิดวงจรชั่วขณะ

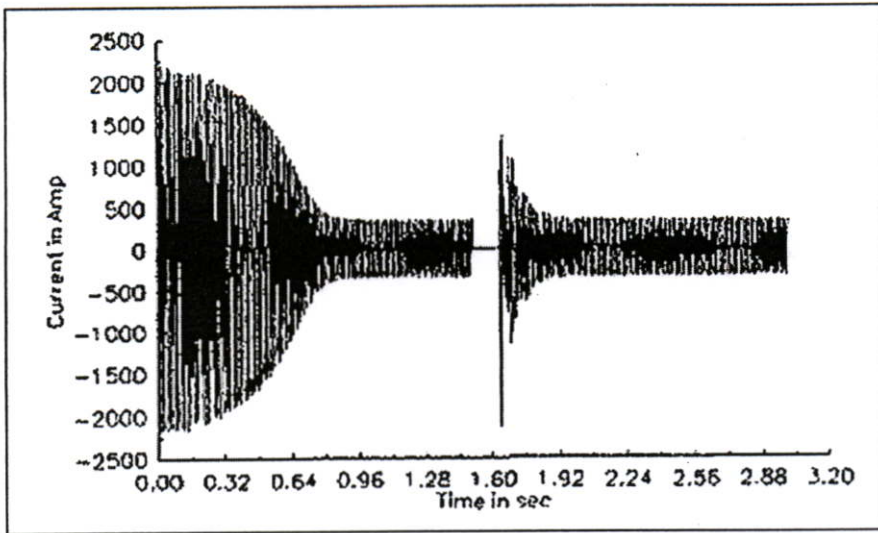
Parameters			IMag
Resistances	R_s	[pu.]	0.0826
	R_r	[pu.]	0.0241
Reactances	X_{ls}	[pu.]	0.0268
	X_{lr}	[pu.]	0.0268
	X_m	[pu.]	1.4677
Moment of Inertia	J	[kg.m ²]	5.95
Power	P		198 hp
Number of Poles			4



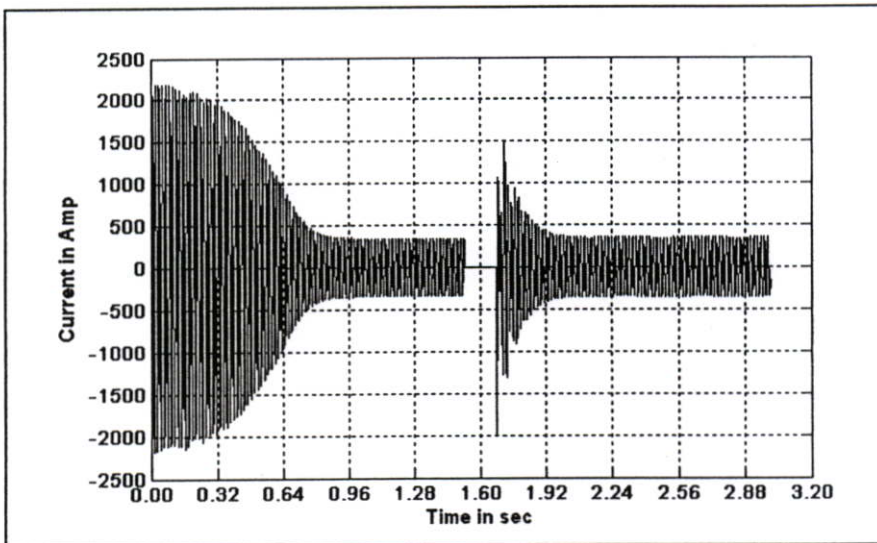
รูปที่ 4.88 แบบจำลองสถานะการเปิดวงจรชั่วขณะโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems



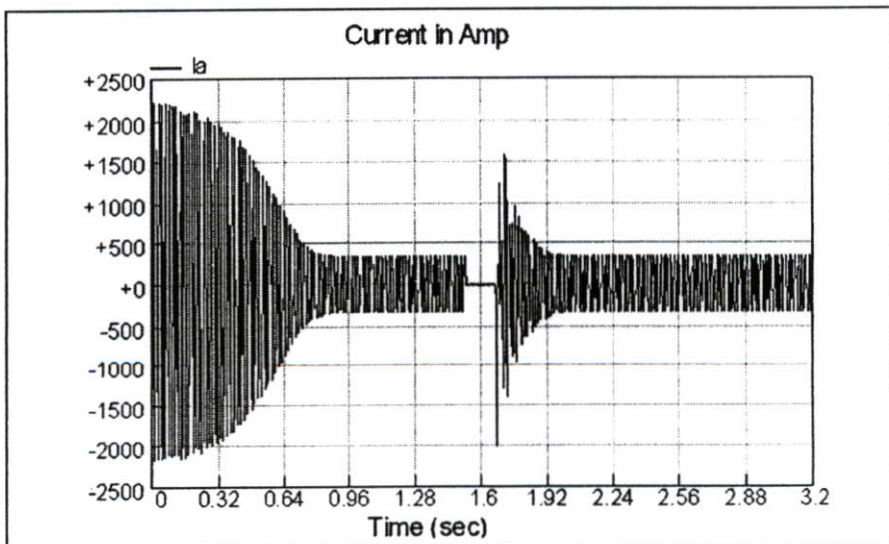
รูปที่ 4.89 แบบจำลองสถานะการเปิดวงจรชั่วขณะ โดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC



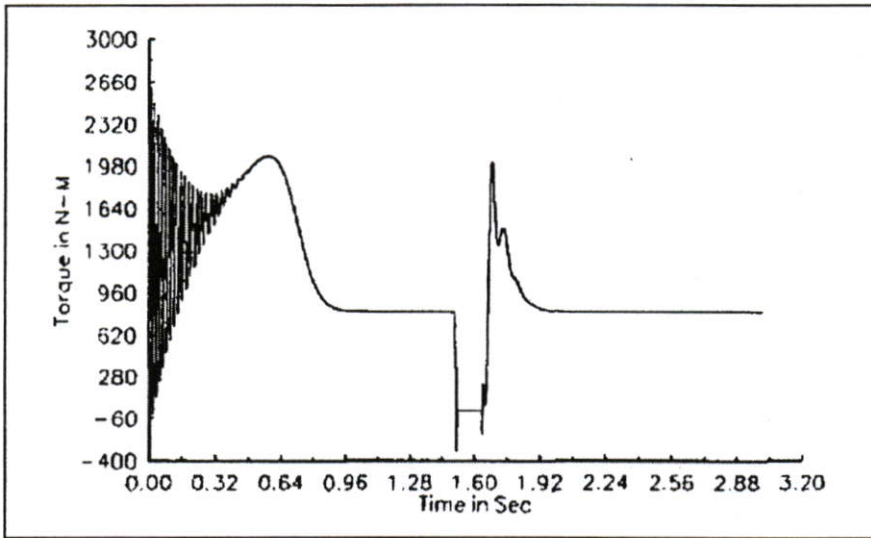
รูปที่ 4.90 กระแส phase A ที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มของ [4]



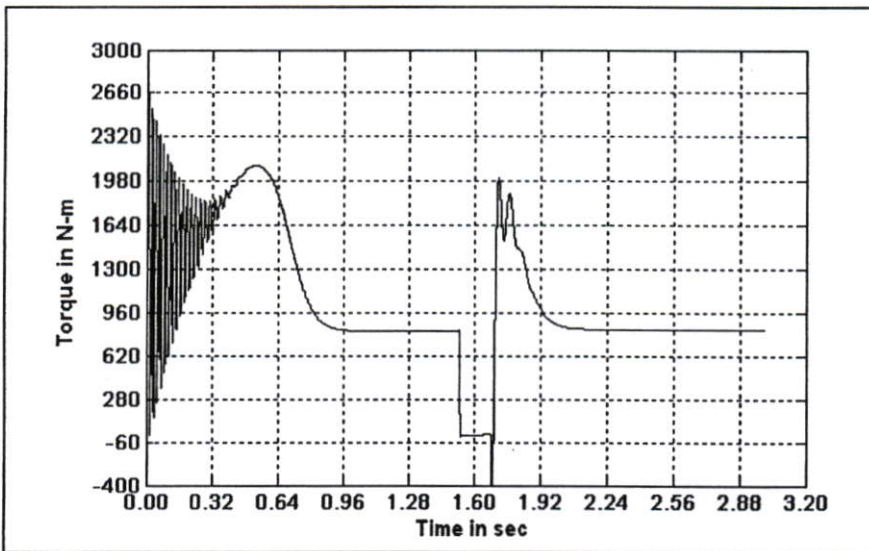
รูปที่ 4.91 กระแส phase A จากแบบจำลองการรวมกลุ่มโดย MATLAB/SimPowerSystems



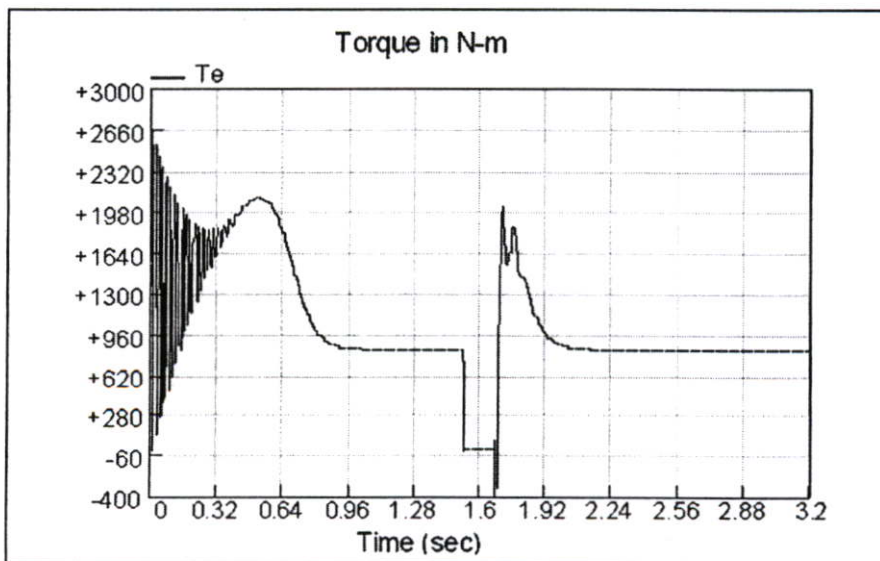
รูปที่ 4.92 กระแส phase A จากแบบจำลองการรวมกลุ่มโดย PSCAD/EMTDC



รูปที่ 4.93 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มของ [4]



รูปที่ 4.94 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าจากแบบจำลองการรวมกลุ่มโดย MATLAB/SimPowerSystems



รูปที่ 4.95 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าจากแบบจำลองการรวมกลุ่มโดย PSCAD/EMTDC

4.6 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการรวมกลุ่มโดยนำไปใช้ในการจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นการเริ่มต้นหมุนแบบ direct-on-line โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการวัดจริงกับผลการจำลอง โดยใช้แบบจำลองการรวมกลุ่ม และเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองโดยใช้แบบจำลองแต่ละตัวกับผลการจำลองโดยใช้แบบจำลองการรวมกลุ่ม พิจารณาผลการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

พิจารณาลักษณะรูปคลื่นกระแส ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.75 พบว่า รูปคลื่นกระแสแต่ละเฟสที่ได้จากการจำลองโดยใช้แบบจำลองการรวมกลุ่มมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นที่ได้จากการวัดจริง และรูปคลื่นที่ได้จากแบบจำลองแต่ละตัว ทั้งในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความเร็วเชิงโรตอร์สเท่ากันและกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความเร็วเชิงโรตอร์สแตกต่างกัน

พิจารณาค่าสูงสุด (peak) ของกระแสขณะเริ่มต้นหมุนที่เกิดขึ้นในสภาวะชั่วขณะ (transient) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มและผลที่ได้จากการวัด โดยมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 7 เปอร์เซ็นต์

พิจารณาค่ากระแสในสภาวะอยู่ตัว (steady state) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มและผลที่ได้จากการวัด โดยมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์

พิจารณาค่าคงที่เวลา (time constant) ซึ่งเป็นเวลาที่กระแสลดลงจนมีค่าเท่ากับ e^{-1} เท่า หรือ 36.78 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มและผลที่ได้จากการวัด โดยมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 9 เปอร์เซ็นต์ หมายความว่า การเปลี่ยนแปลงจากสภาวะ transient เข้าสู่สภาวะ steady state ของกระแสที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มและกระแสที่ได้จากการวัดจริงมีระยะเวลาใกล้เคียงกัน

ในกรณีศึกษาผลตอบสนองเนื่องจากแรงดันตกทันทีทันใด เปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จาก [9] ผลตอบสนอง P,Q ที่ได้จากการวัดและจากแบบจำลองการรวมกลุ่มที่นำเสนอ จะมีการ oscillation เป็นช่วงเวลาสั้น ๆ ประมาณ 0.05 วินาทีหลังจากแรงดันตกทันทีทันใด แต่แบบจำลองแบบ third order ไม่ได้ให้ผลของการ oscillation เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยไม่คิดค่าความต้านทานของสเตเตอร์ จะเห็นได้ว่า แบบจำลองการรวมกลุ่มที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวัดและให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าแบบจำลองแบบ third order ที่เคยมีการนำเสนอก่อนหน้านี้

ในกรณีศึกษาผลตอบสนองเนื่องจากการเปิดวงจรชั่วขณะ เปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มแบบ transformer-type [4] พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มที่นำเสนอและที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มของ [4] มีลักษณะใกล้เคียงกันทั้งกระแสและแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การสร้างแบบจำลองของภาระไฟฟ้าเป็นประเด็นสำคัญอย่างหนึ่งในการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมในสภาวะชั่วขณะหรือพฤติกรรมพลวัตของระบบ เช่น การคำนวณกระแสลัดวงจร การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ การเกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ เป็นต้น ภาระไฟฟ้าที่มีสัดส่วนเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับภาระไฟฟ้าประเภทอื่น ๆ ได้แก่ มอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งผลตอบสนองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำเหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมในสภาวะชั่วขณะของทั้งระบบ การสร้างแบบจำลองภาระไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ในปัจจุบัน การศึกษาและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะระบบที่มีขนาดใหญ่และมีความยุ่งยากซับซ้อนนิยมใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการจำลองระบบ ซึ่งในทางปฏิบัติการจำลองระบบที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นจำนวนมากโดยใช้แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัวเป็นสิ่งที่ไม่สะดวกและอาจต้องใช้เวลาอย่างมาก ดังนั้น จึงได้มีแนวความคิดในการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำมารวมกลุ่มเข้าด้วยกัน โดยสร้างเป็นแบบจำลองสมมูลหนึ่งหน่วยขึ้นมาใช้แทนกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานอยู่ด้วยกัน เพื่อให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการคำนวณและแบบจำลองนี้ถูกเรียกว่า “แบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ” จนถึงปัจจุบันนี้นักวิจัยหลายคนได้เสนอวิธีการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายวิธีและแบบจำลองการรวมกลุ่มหลายแบบ [1-7] ความยุ่งยากซับซ้อนของวิธีการรวมกลุ่มและความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มขึ้นอยู่กับสมมติฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองการรวมกลุ่ม และมีความแตกต่างกันออกไปสำหรับแต่ละวิธีการ

วิธีการรวมกลุ่มและแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้รับการศึกษา วิจัย และพัฒนามาเป็นเวลานาน บทความ [1] พัฒนาแบบจำลองการรวมกลุ่มโดยใช้วงจรสมมูลแบบประมาณ third order บทความ [2] เสนอเทคนิคการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำและภาระไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรม บทความ [3] พัฒนาแบบจำลองการรวมกลุ่มโดยใช้ Thevenin theorem บทความ [4] พัฒนาแบบจำลองการรวมกลุ่มโดยใช้วงจรสมมูล Transformer-type บทความ [5-7] พัฒนาแบบจำลองการรวมกลุ่มโดยใช้พื้นฐานการทดสอบขณะไม่มีภาระและการทดสอบฮีดโรเตอร์

แบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้มีการนำเสนอในช่วงแรก [1-3] ยังอยู่ในรูปแบบที่ยุ่งยาก และต่อมาในภายหลังก็ได้มีการพัฒนาแบบจำลองการรวมกลุ่มให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายขึ้น [4-7] แต่แบบจำลองการรวมกลุ่มเหล่านี้ก็ยังมีข้อจำกัด คือ การคำนวณแบบจำลองการรวมกลุ่มต้องใช้ตัวแปรที่เป็นค่าจริง รวมทั้งค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เป็นผลลัพธ์จากการคำนวณก็ได้ออกมาเป็นค่าจริงด้วย

ซึ่งไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน เพราะในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังมักจะแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ของอุปกรณ์ไฟฟ้ารวมทั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบเปอร์ยูนิต ทำให้ต้องเสียเวลาในการเปลี่ยนระหว่างค่าจริงและค่าเปอร์ยูนิต และแบบจำลองการรวมกลุ่มสามารถใช้ในการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำได้เฉพาะในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัวมีความเร็วเชิง โครนัสเท่ากันเท่านั้น ดังนั้น จึงต้องพัฒนาแบบจำลองการรวมกลุ่มให้อยู่ในรูปแบบเหมาะสมต่อการใช้งาน และสามารถแก้ปัญหาเรื่องข้อจำกัดที่มีอยู่ โดยให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องเป็นที่ยอมรับได้

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิตสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจำนวน N ตัวที่เชื่อมต่ออยู่ในบัสเดียวกัน ทำการสร้างสมการในรูปแบบทั่วไปสำหรับคำนวณตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองการรวมกลุ่มโดยพิจารณาจากหลักการของการทดสอบขณะไม่มีภาระและการทดสอบขั้วโรเตอร์เช่นเดียวกับ [5-7] และทำการพัฒนาให้สามารถนำไปใช้ในการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งในกรณีที่มีความเร็วเชิง โครนัสเท่ากันและกรณีที่มีความเร็วเชิง โครนัสแตกต่างกันได้

การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการรวมกลุ่ม โดยนำแบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้ไปใช้หาผลตอบสนองในสถานะชั่วขณะที่เกิดขึ้นจากกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งในที่นี้เลือกใช้การจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนเนื่องจากกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งเป็นสถานะชั่วขณะอย่างหนึ่งของระบบ ทำการเปรียบเทียบผลในหลายรูปแบบ ได้แก่ เปรียบเทียบกับผลการวัดจริง เปรียบเทียบกับการจำลองโดยใช้แบบจำลองแต่ละตัว และเปรียบเทียบโดยใช้กรอบอ้างอิงแตกต่างกัน ทำการทดสอบทั้งในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความเร็วเชิง โครนัสเท่ากัน และกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความเร็วเชิง โครนัสต่างกัน แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนสร้างด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งสมการที่นำมาใช้เป็นสมการของแบบจำลองพลวัตแบบเปอร์ยูนิตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากนั้น นำแบบจำลองการรวมกลุ่มไปใช้ศึกษาสถานะพลวัตเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มที่เคยมีการนำเสนอก่อนหน้านี้ [4,9] และเปรียบเทียบระหว่างการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems และ โปรแกรม PSCAD/EMTDC

จากผลการทดสอบที่ได้ทั้งในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความเร็วเชิง โครนัสเท่ากัน และกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความเร็วเชิง โครนัสแตกต่างกัน เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแส ค่าสูงสุด (peak) ของกระแสขณะเริ่มต้นหมุนที่เกิดขึ้นในสถานะชั่วขณะ (transient) ค่ากระแสในสถานะอยู่ตัว (steady state) และค่าคงที่เวลา (time constant) พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองโดยใช้แบบจำลองการรวมกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดจริง และผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองโดยใช้แบบจำลองแต่ละตัว

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองพลวัตที่ได้จากกรณีศึกษาทั้งสองกรณี พบว่า ผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มที่นำเสนอกับผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่มของ [4,9]

มีความใกล้เคียงกัน ซึ่งกล่าวได้ว่าแบบจำลองการรวมกลุ่มที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้อง เชื่อถือได้ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการสร้างแบบจำลองภาระไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังที่มีกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อขนานอยู่ในบัสเดียวกันได้ เช่น การศึกษาผลตอบสนองพลวัต การคำนวณค่ากระแสลัดวงจร การเกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ และ การศึกษาเสถียรภาพของระบบ เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

แบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิตที่ได้นำเสนอเป็นแบบจำลองที่พัฒนาให้อยู่ใน รูปแบบทั่วไปที่ง่ายและให้ผลลัพธ์เป็นที่ยอมรับได้ และแบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้เหมาะสำหรับการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำที่อยู่ในประเภท (class) เดียวกัน ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนา งานวิจัยในลำดับต่อไป คือ

1. การนำแบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้นำเสนอไปใช้ในการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำประเภท (class) ต่างกัน สามารถทำได้โดยจัดกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ ซึ่งแต่ละกลุ่ม ประกอบด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำประเภท (class) เดียวกัน
2. แบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้นำเสนอ สามารถนำไปใช้ในการศึกษาระบบไฟฟ้ากรณีอื่นได้ เช่น การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยการพิจารณาค่า eigen value เป็นต้น
3. มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่ที่มีการใช้งานมักจะเป็นมอเตอร์แบบ โรเตอร์กรงกระรอกสองชั้น (double cage) ดังนั้นการพัฒนาแบบจำลองการรวมกลุ่มในลำดับต่อไปจึงควรสร้างแบบจำลอง การรวมกลุ่มสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ โรเตอร์กรงกระรอกสองชั้น (double cage)

เอกสารอ้างอิง

- [1] M.M. Abdel Hakim and G.J. Berg, "Dynamic single-unit representation of induction motor groups", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-95, No.1, January/February 1976, pp.155-165
- [2] Graham J. Rogers, John Di Manno and Robert T.H. Alden, "An Aggregate Induction Motor Model for Industrial plants", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-103, No. 4, April 1984, pp.683-690
- [3] M. Taleb, M. Akbaba and E.A. Abdullah, "Aggregation of Induction Machines for Power System Dynamic Studies", IEEE Trans. Power Systems, Vol.9, No.4, November 1994, pp.2042-2048
- [4] 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 1997, pp.225-228
- [5] T. Kataoka, H. Uchida, S. Nishikata, T. Kai, T. Funabashi, "A Method for Aggregation of a Group of Induction Motor Loads," POWERCON 2000, Perth, Australia, December 2000, pp.1683-1688
- [6] P.Piromthum and A.Kunakorn, "A Study of Starting Current due to a Group of Induction Motors Using an Aggregation Model", IEEE Power Electronics and Drive Systems (PEDS 2003), Singapore, November 2003, pp.1054-1057
- [7] W.Suwanwej and A.Kunakorn, "Estimation of short circuit current due to a group of induction motors using an aggregation model", IEEE POWERCON'2004, Singapore, November 2004, pp.559-563
- [8] M.Akbaba and S.Q.Fakhro, "New model for single-unit representation of induction motor loads, including skin effect, for power system transient stability studies", IEE Proceedings-B. Vol.139, No.6, November 1992, pp.521-533
- [9] T.Y.J. Lem and R.T.H. Alden, "Comparison of experimental and aggregate induction motor responses", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 9, No. 4, November 1994, pp.1895-1900
- [10] IEEE standard 112-1996, "Test procedures for polyphase induction motors and generators"
- [11] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink", Prentice Hall, 1998
- [12] R. Krishnan, "Electric Motor Drives : Modeling, Analysis, and Control", Prentice Hall, 2001.

- [13] P. Kundur, "Power system stability and control," McGraw-Hill, 1994.
- [14] Paul C. Krause, "Analysis of electric machinery", McGraw-Hill, 1987.
- [15] Richard A. Pearman, "Electrical Machinery and Transformer Technology", Saunders college publishing, 1994.
- [16] William H. Hayt, JR. and Jack E. Kemmerly, "Engineering Circuit Analysis", McGraw-Hill, 1993.
- [17] ไพสิฐ ภิรมย์ธรรม, "การศึกษากระแสขณะเริ่มต้นหมุนสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้แบบจำลองการรวมกลุ่ม", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546

ภาคผนวก ก.

ส่วนประกอบของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุน

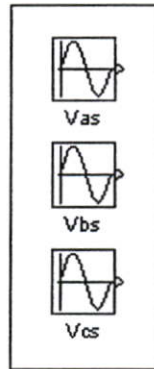
ส่วนประกอบของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุน

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนที่สร้างโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อให้ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิต มีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. แหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส

แหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟสที่จ่ายเข้าทางด้านสเตเตอร์ สร้างได้โดยใช้ “Sine Wave” จาก library ชื่อ Sources สำหรับแรงดันแต่ละเฟส โดยแรงดันที่ได้จะอยู่ในรูปของสมการ

$$v = V_m \sin(2\pi ft + \phi)$$



รูปที่ 1 แหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส

2. การแปลงแรงดันจาก abc เป็น dq0

การแปลงแรงดันจาก abc เป็น dq0 ทำได้โดยใช้

“Fcn” จาก library ชื่อ User-Define Functions

“Gain” จาก library ชื่อ Math Operations

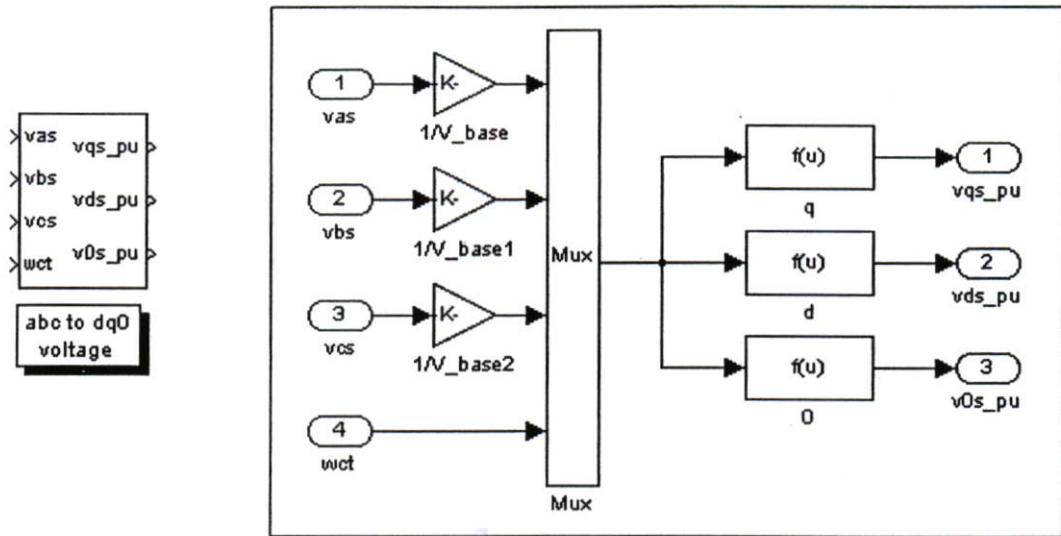
“Mux” จาก library ชื่อ Signal Routing

โดยทำการป้อนสมการ (3.36) - (3.38) นั่นคือ

$$\bar{v}_{qs} = \frac{2}{3} \left[\bar{v}_a \cos(\omega_c t) + \bar{v}_b \cos\left(\omega_c t - \frac{2\pi}{3}\right) + \bar{v}_c \cos\left(\omega_c t - \frac{4\pi}{3}\right) \right]$$

$$\bar{v}_{ds} = \frac{2}{3} \left[\bar{v}_a \sin(\omega_c t) + \bar{v}_b \sin\left(\omega_c t - \frac{2\pi}{3}\right) + \bar{v}_c \sin\left(\omega_c t - \frac{4\pi}{3}\right) \right]$$

$$\bar{v}_{0s} = \frac{1}{3} [\bar{v}_a + \bar{v}_b + \bar{v}_c]$$



รูปที่ 2 ส่วนประกอบ การแปลงแรงดันจาก abc เป็น dq0

3. กระแส dq

กระแส dq สร้างได้โดยใช้

- “Fcn” จาก library ชื่อ User-Define Functions
- “Gain” จาก library ชื่อ Math Operations
- “Mux” จาก library ชื่อ Signal Routing
- “Demux” จาก library ชื่อ Signal Routing
- “Integrator” จาก library ชื่อ Continuous

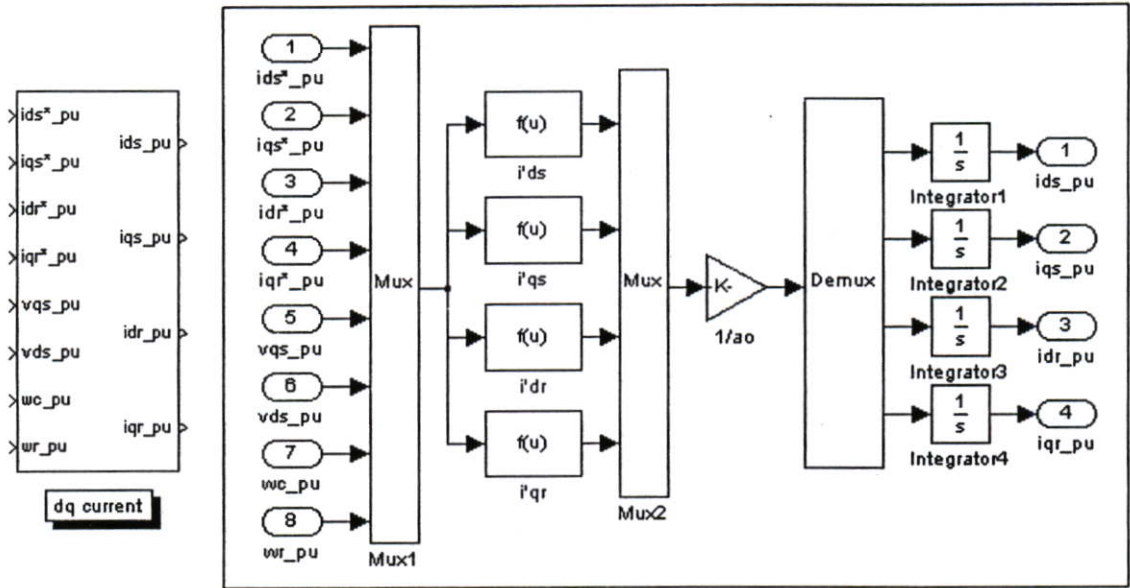
โดยทำการป้อนสมการ (3.39) - (3.42) นั่นคือ

$$\frac{d\bar{i}_{ds}}{dt} = \frac{\omega(-\bar{R}_s \bar{X}_r \bar{i}_{ds} - \bar{\omega}_c \bar{X}_m^2 \bar{i}_{qs} + \bar{\omega}_r \bar{X}_m^2 \bar{i}_{qs} + \bar{\omega}_c \bar{X}_s \bar{X}_r \bar{i}_{qs} + \bar{R}_r \bar{X}_m \bar{i}_{dr} + \bar{\omega}_r \bar{X}_r \bar{X}_m \bar{i}_{qr} + \bar{X}_r \bar{v}_{ds})}{\bar{X}_s \bar{X}_r - \bar{X}_m^2}$$

$$\frac{d\bar{i}_{qs}}{dt} = \frac{\omega(\bar{\omega}_c \bar{X}_m^2 \bar{i}_{ds} - \bar{\omega}_r \bar{X}_m^2 \bar{i}_{ds} - \bar{\omega}_c \bar{X}_s \bar{X}_r \bar{i}_{ds} - \bar{R}_s \bar{X}_r \bar{i}_{qs} - \bar{\omega}_r \bar{X}_r \bar{X}_m \bar{i}_{dr} + \bar{R}_r \bar{X}_m \bar{i}_{qr} + \bar{X}_r \bar{v}_{qs})}{\bar{X}_s \bar{X}_r - \bar{X}_m^2}$$

$$\frac{d\bar{i}_{dr}}{dt} = \frac{\omega(\bar{R}_s \bar{X}_m \bar{i}_{ds} - \bar{\omega}_r \bar{X}_s \bar{X}_m \bar{i}_{qs} - \bar{R}_r \bar{X}_s \bar{i}_{dr} + \bar{\omega}_c \bar{X}_s \bar{X}_r \bar{i}_{qr} - \bar{\omega}_r \bar{X}_s \bar{X}_r \bar{i}_{qr} - \bar{\omega}_c \bar{X}_m^2 \bar{i}_{qr} - \bar{X}_m \bar{v}_{ds})}{\bar{X}_s \bar{X}_r - \bar{X}_m^2}$$

$$\frac{d\bar{i}_{qr}}{dt} = \frac{\omega(\bar{\omega}_r \bar{X}_s \bar{X}_m \bar{i}_{ds} + \bar{R}_s \bar{X}_m \bar{i}_{qs} - \bar{\omega}_c \bar{X}_s \bar{X}_r \bar{i}_{dr} + \bar{\omega}_r \bar{X}_s \bar{X}_r \bar{i}_{dr} + \bar{\omega}_c \bar{X}_m^2 \bar{i}_{dr} - \bar{R}_r \bar{X}_s \bar{i}_{qr} - \bar{X}_m \bar{v}_{qs})}{\bar{X}_s \bar{X}_r - \bar{X}_m^2}$$



รูปที่ 3 ส่วนประกอบกระแส dq

4. กระแสลำดับศูนย์

กระแสลำดับศูนย์ สร้างได้โดยใช้

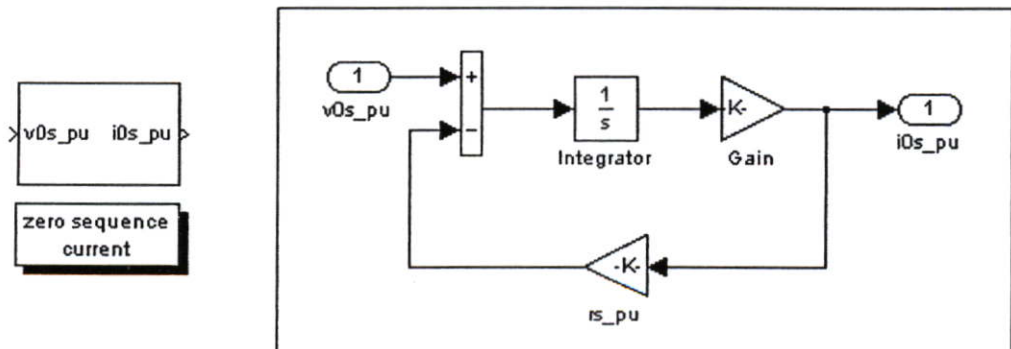
“Gain” จาก library ชื่อ Math Operations

“Sum” จาก library ชื่อ Math Operations

“Integrator” จาก library ชื่อ Continuous

โดยทำการป้อนสมการ (3.43) นั่นคือ

$$\bar{i}_{0s} = \frac{\omega_s}{X_{ls}} \int (\bar{v}_{0s} - \bar{i}_{0s} \bar{R}_s) dt$$



รูปที่ 4 ส่วนประกอบกระแสลำดับศูนย์

5. แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า

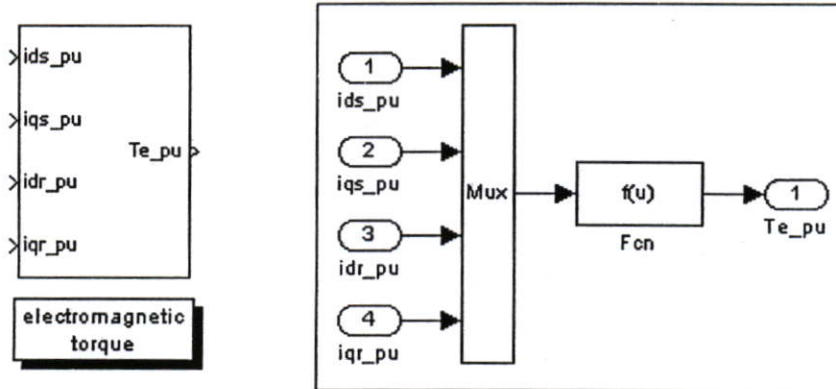
แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า สร้างได้โดยใช้

“Fcn” จาก library ชื่อ User-Define Functions

“Mux” จาก library ชื่อ Signal Routing

โดยทำการป้อนสมการ (3.44) นั่นคือ

$$\bar{T}_e = \bar{X}_m (\bar{i}_{qs} \bar{i}_{dr} - \bar{i}_{ds} \bar{i}_{qr})$$



รูปที่ 5 ส่วนประกอบแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า

6. ความเร็วรอบเชิงมุม

ความเร็วรอบเชิงมุม สร้างได้โดยใช้

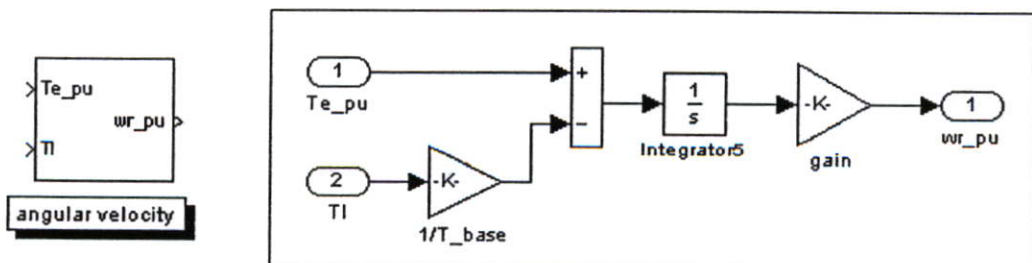
“Gain” จาก library ชื่อ Math Operations

“Sum” จาก library ชื่อ Math Operations

“Integrator” จาก library ชื่อ Continuous

โดยทำการป้อนสมการ (3.45) นั่นคือ

$$\bar{\omega}_r = \frac{1}{2H} \int (\bar{T}_e - \bar{T}_l) dt$$



รูปที่ 6 ส่วนประกอบความเร็วรอบเชิงมุม

7. การแปลงกระแสจาก dq0 เป็น abc

การแปลงกระแสจาก dq0 เป็น abc ทำได้โดยใช้

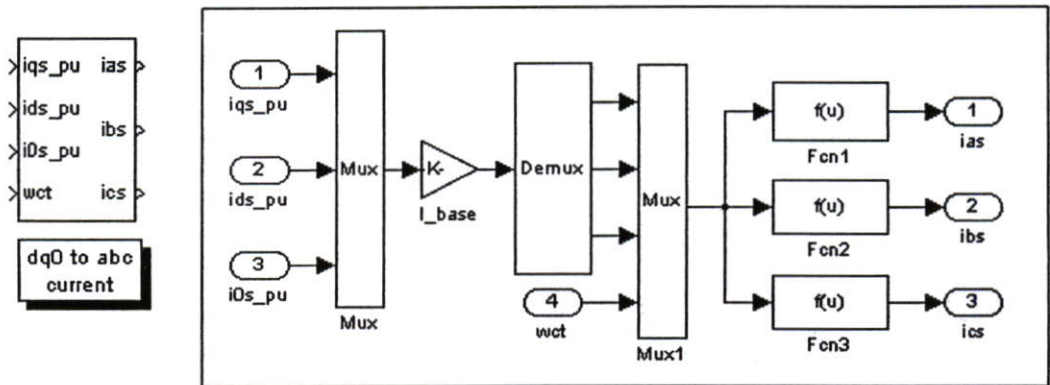
- “Fcn” จาก library ชื่อ User-Define Functions
- “Gain” จาก library ชื่อ Math Operations
- “Mux” จาก library ชื่อ Signal Routing
- “Demux” จาก library ชื่อ Signal Routing

โดยทำการป้อนสมการ (3.46) - (3.48) นั่นคือ

$$\bar{i}_a = \bar{i}_{qs} \cos(\omega_c t) + \bar{i}_{ds} \sin(\omega_c t) + \bar{i}_{0s}$$

$$\bar{i}_b = \bar{i}_{qs} \cos\left(\omega_c t - \frac{2\pi}{3}\right) + \bar{i}_{ds} \sin\left(\omega_c t - \frac{2\pi}{3}\right) + \bar{i}_{0s}$$

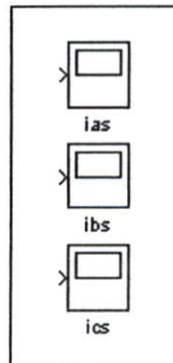
$$\bar{i}_c = \bar{i}_{qs} \cos\left(\omega_c t - \frac{4\pi}{3}\right) + \bar{i}_{ds} \sin\left(\omega_c t - \frac{4\pi}{3}\right) + \bar{i}_{0s}$$



รูปที่ 7 ส่วนประกอบการแปลงกระแสจาก dq0 เป็น abc

8. การแสดงผลของรูปคลื่นกระแส

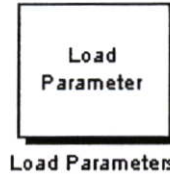
การแสดงผลของรูปคลื่นกระแส ทำได้โดยใช้ “Scope” จาก library ชื่อ Sinks สำหรับกระแสของสเตเตอร์แต่ละเฟส



รูปที่ 8 Scope สำหรับแสดงรูปคลื่นกระแส

9. การดึงข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองการรวมกลุ่ม

การป้อนข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เลือกใช้การป้อนผ่าน M-File แล้วจึงทำการดึงข้อมูลเข้ามาใช้ในแบบจำลอง เนื่องจากมีข้อดี คือ เมื่อต้องการแก้ไขหรือเปลี่ยนตัวแปรของมอเตอร์เหนี่ยวนำก็ดำเนินการที่ M-File โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงแก้ไขแบบจำลอง การดึงข้อมูลจาก M-File ทำได้โดยใช้ “Subsystem” จาก library ชื่อ Ports & Subsystems แล้วทำการ Edit mask



รูปที่ 9 ส่วนประกอบการดึงข้อมูลผ่าน M-File

10. M-File ที่ใช้ป้อนข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

M-File ที่ใช้ป้อนข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่ม เขียนโดยใช้คำสั่งของโปรแกรม MATLAB มีรายละเอียด ดังนี้

% Parameter for Per Unit Aggregation Model in Arbitrary Reference Frame

% Rated Quantity

```
vrated = ;           % rated line voltage
irated = ;           % rated phase current
frated = ;           % rated frequency
p_agg = ;            % aggregation pole
Vm      = vrated*sqrt(2/3); % peak value of rated voltage
ws      = 2*pi*frated; % synchronous angular speed
wc      = ;           % arbitrary angular speed
```

% Base Quantity

```
vs_base = vrated*sqrt(2)/sqrt(3); % base voltage
is_base = irated*sqrt(2);         % base current
zs_base = vs_base/is_base;        % base impedance
f_base  = frated;                 % base frequency
p_base  = p_agg;                  % base pole
w_base  = 2*pi*f_base;            % base angular speed
wm_base = w_base*(2/p_base);      % base mechanical angular speed
va_base = (3/2)*vs_base*is_base;  % base volt-amp
t_base  = va_base/wm_base;        % base torque
H        = (1/2)*J*wm_base^2/va_base; % inertia constant
```

% Motor Parameter

```

rs_pu = ; % per unit stator resistance
rr_pu = ; % per unit rotor resistance referred to stator
xls_pu = ; % per unit stator leakage reactance
xlr_pu = ; % per unit rotor leakage reactance referred to stator
xm_pu = ; % per unit magnetizing reactance
xs_pu = xm_pu+xls_pu; % per unit stator reactance
xr_pu = xm_pu+xlr_pu; % per unit rotor reactance
J = ; % moment of inertia

```

```

1 % Parameter for Per Unit Aggregation Model in Arbitrary Reference Frame
2 % Created by Teepakorn Bunyatnarat, 2005
3
4 % Rated Quantity
5 vrated = 380; % rated line voltage
6 irated = 7.9; % rated phase current of highest rated power motor
7 frated = 50; % rated frequency
8 p_agg = 4; % aggregation pole
9 Va = vrated*sqrt(2/3); % peak value of rated voltage
10 ws = 2*pi*frated; % synchronous angular speed
11 wc = 0; % arbitrary angular speed
12
13 % Base Quantity
14 vs_base = vrated*sqrt(2)/sqrt(3); % base voltage
15 is_base = irated*sqrt(2); % base current
16 zs_base = vs_base/is_base; % base impedance
17 f_base = frated; % base frequency
18 p_base = p_agg; % base pole
19 w_base = 2*pi*f_base; % base angular speed
20 wa_base = w_base*(2/p_base); % base mechanical angular speed
21 va_base = (3/2)*vs_base*is_base; % base volt-amp
22 t_base = va_base/wa_base; % base torque
23 H = (1/2)*J*wa_base^2/va_base; % inertia constant
24
25 % Motor Parameter
26 rs_pu = 0.043; % per unit stator resistance
27 rr_pu = 0.0389; % per unit rotor resistance referred to stator
28 xls_pu = 0.0428; % per unit stator leakage reactance
29 xlr_pu = 0.0428; % per unit rotor leakage reactance referred to stator
30 xm_pu = 1.0251; % per unit magnetizing reactance
31 xs_pu = xm_pu+xls_pu; % per unit stator reactance
32 xr_pu = xm_pu+xlr_pu; % per unit rotor reactance
33 J = 0.0185; % moment of inertia

```

รูปที่ 10 ตัวอย่าง M-File สำหรับป้อนข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่าง M-File สำหรับคำนวณแบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิต

ตัวอย่าง M-File สำหรับคำนวณแบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิต

```

% This program for calculate parameter of
% Per unit aggregation model for a group of Induction motor

disp('Per Unit Aggregation Model for a Group of Induction Motor');
disp('-----');
disp(' ');
clear all

% Number of Induction Motor
m = input('Enter number of IM : ');
c = input('Enter class of IM : ','s');
if c == or('A','a')
    class = 0.5;
elseif c == or('B','b')
    class = 0.4;
elseif c == or('C','c')
    class = 0.3;
else class = 0.5;
end
disp('-----');
disp(' ');

% Frequency
f = input('Enter rated frequency : ');
disp('-----');
disp(' ');

% Parameter of IM
for ii = 1:m
    fprintf('Enter parameter of motor No. %d\n',ii);
    disp(' ');
    rs_pu(ii) = input('Stator resistance (pu) : ');
    rr_pu(ii) = input('Rotor resistance (pu) : ');
    xls_pu(ii) = input('Stator leakage reactance (pu) : ');
    xlr_pu(ii) = input('Rotor leakage reactance (pu) : ');
    xm_pu(ii) = input('Magnetizing reactance (pu) : ');
    J(ii) = input('Moment of inertia (kg.m^2) : ');
    p(ii) = input('Number of pole : ');
    OP(ii) = input('Output power (W) : ');
    disp(' ');
    disp('*****');
    % Per unit no load impedance
    Zn_pu(ii) = rs_pu(ii)+j*(xls_pu(ii)+xm_pu(ii));
    % Per unit block rotor impedance
    Zb_pu(ii) = rs_pu(ii)+rr_pu(ii)+j*(xls_pu(ii)+xlr_pu(ii));

```

```

% Per unit no load admittance
    Yn_pu(ii) = 1/Zn_pu(ii);
% Per unit block rotor admittance
    Yb_pu(ii) = 1/Zb_pu(ii);
end

% Calculation process
Ynag_pu = 0;           % initial value of per unit no load aggregation admittance
Ybag_pu = 0;           % initial value of per unit block rotor aggregation admittance
OP_ag = 0;             % initial value of aggregation output power
OPNs_ag = 0;
JNs_ag = 0;

for ii = 1:m
    Ynag_pu = Ynag_pu + Yn_pu(ii); % Per unit no load aggregation admittance
    Ybag_pu = Ybag_pu + Yb_pu(ii); % Per unit block rotor aggregation admittance
    OP_ag = OP_ag + OP(ii);         % Aggregation output power
    Ns(ii) = 120*f/p(ii);           % Synchronous speed
    OPNs_ag = OPNs_ag + (OP(ii)*Ns(ii));
    JNs_ag = JNs_ag + (J(ii)*Ns(ii)^2);
end

Znag_pu = 1/Ynag_pu;           % Per unit no load aggregation impedance
Zbag_pu = 1/Ybag_pu;           % Per unit block rotor aggregation impedance
rs_ag = real(Znag_pu);         % Per unit aggregation stator resistance
rr_ag = real(Zbag_pu)-rs_ag;    % Per unit aggregation rotor resistance
xls_ag = imag(Zbag_pu)*class;   % Per unit aggregation stator leakage reactance
xlr_ag = imag(Zbag_pu)-xls_ag;  % Per unit aggregation rotor leakage reactance
xm_ag = imag(Znag_pu)-xls_ag;   % Per unit aggregation magnetizing reactance
Ns_ag = OPNs_ag/OP_ag;
pole_ag = 120*f/Ns_ag;
J_ag = JNs_ag/Ns_ag^2;

disp(' ');
% Display parameter of aggregation model
fprintf('Per unit aggregation stator resistance      (rs,ag) : pu = %6.4f \n',rs_ag);
fprintf('Per unit aggregation rotor resistance       (rr,ag) : pu = %6.4f \n',rr_ag);
fprintf('Per unit aggregation stator leakage reactance  (xls,ag) : pu = %6.4f \n',xls_ag);
fprintf('Per unit aggregation rotor leakage reactance  (xlr,ag) : pu = %6.4f \n',xlr_ag);
fprintf('Per unit aggregation magnetizing reactance    (xm,ag) : pu = %6.4f \n',xm_ag);
fprintf('Aggregation output power                       (P,ag) : watt = %6.0f \n',OP_ag);
fprintf('Aggregation moment of inertia                  (J,ag) : kg.m^2 = %6.4f \n',J_ag);
fprintf('Aggregation pole                               (pole,ag) = %6.4f \n',pole_ag);
disp(' ');
disp('++++');
disp(' ');

```

ภาคผนวก ค.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 21 ฉบับที่ 3

กันยายน 2547

1. การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การสะท้อนในตัวกลางแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ในโดเมนเวลา
ปราโมทย์ จางอัสระกุล นันทิยา นาฬิกาวีท 1
2. การพัฒนากระบวนการประกอบไดโอดกำลังชนิดเซลล์
นพดล สิทธิพล ชบา สุริยาอมรานนท์ วิสุทธิ์ วุฒิรุ่งเรือง 7
3. ผลกระทบของอุณหภูมิขึ้นเตอริงที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแสแรงดันของไฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาสมา
ธเนศ โขะเหม สรศักดิ์ เนียมเจริญ สรายุทธ วิศวแสงสุข 14
4. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปล่องกระเจิงกระจายอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะอากาศของประเทศไทย
ปริดา จันทวงษ์ ชลินทร์ นาคส์วิ จงจิตร หิรัญลาก พิชัย นามประกาย โจเซฟ เดคาร์รี สมบัติ ทิมทรัพย์
ม่อม ม่อม วิน โยธิน อึ้งกุล ปัญญา ยอดโอวาท 20
5. การตรวจพบและติดตามยานพาหนะโดยใช้แบบจำลอง ST-MRF
อำนวยการ ศักดิ์ มงคลชัชวาลย์ สุวิพล สิทธิชีวภาค 26
6. An FPGA Implementation of Systolic Array for Montgomery Modular Multiplication
Medi A. Nazar Surin Kittitornkun Pratheep Bunyatneparat 32
7. เซอร์จิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้าคอนกรีตเนื่องจากผลของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอนกรีต
สำเร็จ อินทวัฒน์ ชำนาญ ห่อเกียรติ 38
8. การออกแบบวงจรบวกชนิดฟลูอิดเตอร์ซิมอสส์กำลังต่ำ
วิไลพร โอบบอ้อม กอบชัย เดชหาญ 44
9. การตรวจหาลักษณะเด่นที่คาดว่าจะเป็นดาวหางสองข้าง
ศศิ ศรีสัตตบุตร เกษตร์ ศิริสัมพันธ์ฤทธิ์ 50
10. การปรับปรุงวิธีการเลือกใช้อัลกอริทึมการแทนที่ข้อมูลสำหรับเว็บแคชเซิร์ฟเวอร์
โกศล ธีรจิตโต ศักดิ์ชัย ทิพย์จักรรัตน์ ประทีป บัญญัตินพรัตน์ 56
11. การวิเคราะห์สมรรถนะการเข้ารหัส Turbo-OFDM มาตรฐาน IEEE 802.11a บนช่องสัญญาณมัลติพาธเฟดดิ้ง
จอมใจ ศรีอำไพ ภาณุต ละมุล กอบชัย เดชหาญ 62
12. การวิเคราะห์สมรรถนะของการสเปกตรัมจากการมอดูเลตโดยอาศัยสัญญาณเชิงพีซีในลักษณะหลายผู้ใช้งานบนช่องสัญญาณ
เฟดดิ้งแบบนาคากามิ
อุสาห์ ต่อเทียนชัย กอบชัย เดชหาญ 68
13. การปรับปรุงแบบจำลองการรวมกลุ่มสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ระบบเปอร์ยูนิต
ทีปกร บัญญัตินพรัตน์ อานันท์วัฒน์ คุณากร 74

การปรับปรุงแบบจำลองการรวมกลุ่มสำหรับกลุ่มของ มอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ระบบเปอร์ยูนิต

Improvement of an Aggregation Model for a Group of Induction Motors Using Per Unit System

ทีปกร บัญญัติสินทรัพย์ อานันท์วัฒน์ คุณากร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยอาศัยพื้นฐานของการทดสอบขณะไม่มีภาระและการทดสอบฮีดโรเตอร์ในการหาตัวแปรทั้งหมดของวงจรสมมูลย์ การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ทำโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK และนำระบบเปอร์ยูนิตเข้ามาใช้เพื่อให้แบบจำลองสามารถนำไปใช้ในการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีความเร็วซิงโครนัสแตกต่างกันได้ จากนั้น แบบจำลองจะถูกนำไปใช้จำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดจริงและเปรียบเทียบกับผลการตอบสนองแบบแยกเป็นแต่ละตัว พบว่าการจำลองให้ผลที่มีความน่าเชื่อถือได้ซึ่งมีความผิดพลาดน้อยกว่า 10 %

Abstract

This paper presents an aggregation model for representing a group of three phase induction motors. All parameters in the equivalent circuit are derived based on no load test and block rotor test. The computer model is constructed using MATLAB/SIMULINK, and per unit system is used so that induction motors with different synchronous speeds can be aggregated. The model, then, is employed to simulate the starting current of a group of induction motors. The simulation results are compared with those from measurements and those from the summation of each response from an individual motor. It is found that the simulation gives satisfactory results with an error of less than 10 %.

1. บทนำ

การสร้างแบบจำลองของภาระไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในการวิเคราะห์สภาวะชั่วขณะและพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของระบบ เช่น การเริ่มต้นหมุนของมอเตอร์

เหนี่ยวนำ, การคำนวณกระแสลัดวงจร, การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ เป็นต้น เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นภาระไฟฟ้าที่มีอยู่เป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับภาระไฟฟ้า

ประเภทอื่น ๆ ดังนั้นการวางแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วการวิเคราะห์ระบบด้วยแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัวเป็นสิ่งที่ไม่สะดวกและต้องใช้เวลามาก แบบจำลองที่ใช้แทนกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงได้มีการพัฒนาขึ้นและรู้จักกันในชื่อ "แบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ" จนถึงปัจจุบันนี้ มีผู้นำเสนอวิธีการสำหรับการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำและแบบจำลองการรวมกลุ่มหลายแบบ เช่น [1,2,3]

บทความฉบับนี้นำเสนอแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเปอร์ยูนิตด้วยวิธีการรวมกลุ่มที่อ้างอิงมาจาก [1] และนำระบบเปอร์ยูนิตมาช่วยในการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อแก้ไขข้อจำกัดที่ไม่สามารถทำการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีความเร็วเชิงโรตอร์แตกต่างกันได้ของแบบจำลองที่นิยมมีการนำเสนอก่อนหน้านี้ [1] จากนั้น ทำการทดสอบแบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้โดยนำไปใช้จำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จาก [7] และเปรียบเทียบผลระหว่างการจำลองแบบแยกเป็นแต่ละตัวและแบบรวมกลุ่ม

2. ระบบเปอร์ยูนิต

ระบบเปอร์ยูนิต คือ ระบบการคำนวณที่ปริมาณต่าง ๆ เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ถูกนำมาคิดเทียบกับค่าฐานหรือค่าอ้างอิงของระบบ ทำให้ปริมาณต่าง ๆ เหล่านี้มีหน่วยเดียวกัน และช่วยลดความยุ่งยากในการคำนวณระบบไฟฟ้ากำลัง โดยอาศัยความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\text{ค่าเปอร์ยูนิต} = \frac{\text{ค่าจริง}}{\text{ค่าฐาน}}$$

ค่าจริง คือ ค่าจริงของปริมาณใด ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ค่าฐาน คือ ค่าที่ใช้เป็นฐานในการอ้างอิง

ค่าฐานต่าง ๆ ที่ใช้ในแบบจำลองการรวมกลุ่ม กำหนดดังนี้

$V_{s,base}$ = ค่าสูงสุด (peak) ของแรงดันเฟสที่กักที่จ่ายให้กับกลุ่มมอเตอร์

$I_{s,base}$ = ค่าสูงสุด (peak) ของกระแสเฟสที่กักของมอเตอร์ที่มีกำลังที่กักสูงสุดในกลุ่ม

$f_{s,base}$ = ความถี่ไฟฟ้าที่กัก

p = จำนวนขั้วแม่เหล็กรวมของกลุ่มมอเตอร์

$$VA_{base} = \frac{3}{2} V_{s,base} I_{s,base} \quad (1)$$

$$\omega_{base} = 2\pi f_{base} \quad (2)$$

$$\omega_{m,base} = \left(\frac{2}{p}\right) \omega_{base} \quad (3)$$

$$Z_{s,base} = \frac{V_{s,base}}{I_{s,base}} \quad (4)$$

$$T_{base} = \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2}\right) \frac{V_{s,base} I_{s,base}}{\omega_{base}} \quad (5)$$

3. การรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

แนวความคิดในการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวน N ตัวที่ต่อขนานอยู่ในบัสเดียวกัน คือ การหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของวงจรมวลซึ่งเป็นตัวแทนของการรวมกลุ่ม ได้แก่ ความต้านทาน (resistance) ความต้านทานรั่วไหล (leakage reactance) และความต้านทานกระตุ้น (magnetizing reactance) นอกจากนั้นยังต้องทำการหาจำนวนขั้วแม่เหล็กรวมของการรวมกลุ่มด้วย การหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของวงจรมวลของการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิตอ้างอิงมาจากวิธีการรวมกลุ่มของ [1] ซึ่งตัวแปรทั้งหมดหาได้จากการพิจารณาบนพื้นฐานของการทดสอบขณะไม่มีภาระ (no load test) และการทดสอบยึดโรเตอร์ (block rotor test)

อิมพีแดนซ์สมมูลเปอร์ยูนิตของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ N ตัวที่ต่อขนานอยู่ในบัสเดียวกัน หาได้จาก

$$\bar{Z}_n = \frac{\prod_{i=1}^N \bar{Z}_{ni}}{\sum_{i=1}^N \left[\prod_{k=1, k \neq i}^N \bar{Z}_{nk} \right]} \quad (6)$$

$$\bar{Z}_{mag} = \bar{r}_{log} + j(\bar{x}_{ilog} + \bar{x}_{mag}) \quad (7)$$

$$\bar{Z}_l = \frac{\prod_{i=1}^N \bar{Z}_{Li}}{\sum_{i=1}^N \left[\prod_{k=1, k \neq i}^N \bar{Z}_{Lk} \right]} \quad (8)$$

$$\bar{Z}_{Log} = \bar{r}_{1og} + \bar{r}_{2og} + j(\bar{x}_{1log} + \bar{x}_{2og}) \quad (9)$$

เมื่อ

N = จำนวนของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกลุ่ม

\bar{r}_{1og} = ความต้านทานสเตเตอร์ของกลุ่มมอเตอร์

\bar{x}_{1log} = ความต้านทานรีวไหลสเตเตอร์ของกลุ่มมอเตอร์

\bar{r}_{2og} = ความต้านทานโรเตอร์ของกลุ่มมอเตอร์ที่เข้ามาทางด้านสเตเตอร์

\bar{x}_{2og} = ความต้านทานรีวไหลโรเตอร์ของกลุ่มมอเตอร์ที่เข้ามาทางด้านสเตเตอร์

\bar{x}_{Mog} = ความต้านทานกระตุ้นของกลุ่มมอเตอร์

(เครื่องหมาย "-" แทนค่าเปอร์เซ็นต์)

จำนวนขั้วแม่เหล็กรวมของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ

(p_{og}) หาได้จากสมการที่พัฒนาขึ้นมาจาก [3] โดยใช้หลักการอนุรักษ์พลังงานของการหมุน

$$p_{og} = 120f(1 - s_{og}) \frac{J_{og}}{\sum_{i=1}^N J_i N_i} \quad (10)$$

เมื่อ

N_r = ความเร็วรอบที่พิกัดของมอเตอร์ (หน่วยเป็น rpm)

J = โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์

J_{og} = โมเมนต์ความเฉื่อยของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ

s_{og} = ค่าสลิป (slip) ของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ

(J_{og} และ s_{og} หาได้จากสมการที่ได้จาก [1])

4. แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในระบบเปอร์เซ็นต์

โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับทดสอบการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถทำได้โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK สมการต่าง ๆ อ้างอิง

มาจาก [4,5,6] เป็นการแปลงตัวแปรต่าง ๆ เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ในระบบพิกัดแกน d-q โดยใช้กรอบอ้างอิงแบบ stationary

$$\bar{v}_{qs} = \frac{2}{3} \bar{v}_{as} - \frac{1}{2} \bar{v}_{bs} - \frac{1}{3} \bar{v}_{cs} \quad (11)$$

$$\bar{v}_{ds} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\bar{v}_{cs} - \bar{v}_{bs}) \quad (12)$$

$$\bar{v}_{0s} = \frac{1}{3} (\bar{v}_{as} + \bar{v}_{bs} + \bar{v}_{cs}) \quad (13)$$

$$\bar{i}_{0s} = \frac{\omega_s}{X_{ll}} \int (\bar{v}_{0s} - \bar{i}_{0s} \bar{r}_l) dt \quad (14)$$

$$\frac{d\bar{i}_{ds}}{dt} = \frac{\omega_s (-\bar{r}_1 \bar{x}_2 \bar{i}_{ds} + \bar{\omega}_r \bar{x}_M \bar{i}_{qs} + \bar{r}_2 \bar{x}_M \bar{i}_{ds} + \bar{\omega}_r \bar{x}_1 \bar{x}_M \bar{i}_{qs} + \bar{x}_2 \bar{v}_{ds})}{\bar{x}_1 \bar{x}_2 - \bar{x}_M^2}$$

$$\frac{d\bar{i}_{qs}}{dt} = \frac{\omega_s (-\bar{\omega}_r \bar{x}_M \bar{i}_{ds} - \bar{r}_1 \bar{x}_2 \bar{i}_{qs} - \bar{\omega}_r \bar{x}_1 \bar{x}_M \bar{i}_{ds} + \bar{r}_2 \bar{x}_M \bar{i}_{qs} + \bar{x}_2 \bar{v}_{qs})}{\bar{x}_1 \bar{x}_2 - \bar{x}_M^2}$$

$$\frac{d\bar{i}_{ds}}{dt} = \frac{\omega_s (\bar{r}_1 \bar{x}_M \bar{i}_{ds} - \bar{\omega}_r \bar{x}_1 \bar{x}_M \bar{i}_{qs} - \bar{r}_2 \bar{x}_1 \bar{i}_{ds} - \bar{\omega}_r \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{i}_{qs} - \bar{x}_M \bar{v}_{ds})}{\bar{x}_1 \bar{x}_2 - \bar{x}_M^2}$$

$$\frac{d\bar{i}_{qs}}{dt} = \frac{\omega_s (\bar{\omega}_r \bar{x}_1 \bar{x}_M \bar{i}_{ds} + \bar{r}_1 \bar{x}_M \bar{i}_{qs} + \bar{\omega}_r \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{i}_{ds} - \bar{r}_2 \bar{x}_1 \bar{i}_{qs} - \bar{x}_M \bar{v}_{qs})}{\bar{x}_1 \bar{x}_2 - \bar{x}_M^2} \quad (15) - (18)$$

$$\bar{i}_{as} = \bar{i}_{qs} + \bar{i}_{0s} \quad (19)$$

$$\bar{i}_{bs} = -\frac{1}{2} \bar{i}_{qs} - \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{i}_{ds} + \bar{i}_{0s} \quad (20)$$

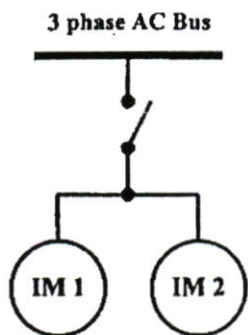
$$\bar{i}_{cs} = -\frac{1}{2} \bar{i}_{qs} + \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{i}_{ds} + \bar{i}_{0s} \quad (21)$$

$$\bar{T}_e = \left(\frac{\bar{x}_M}{\omega_s} \right) (\bar{i}_{qs} \bar{i}_{ds} - \bar{i}_{ds} \bar{i}_{qs}) \quad (22)$$

$$\bar{\omega}_r = \left(\frac{VA_{base}}{J\omega_{m,base}^2} \right) \int (\bar{T}_e - \bar{T}_l) dt \quad (23)$$

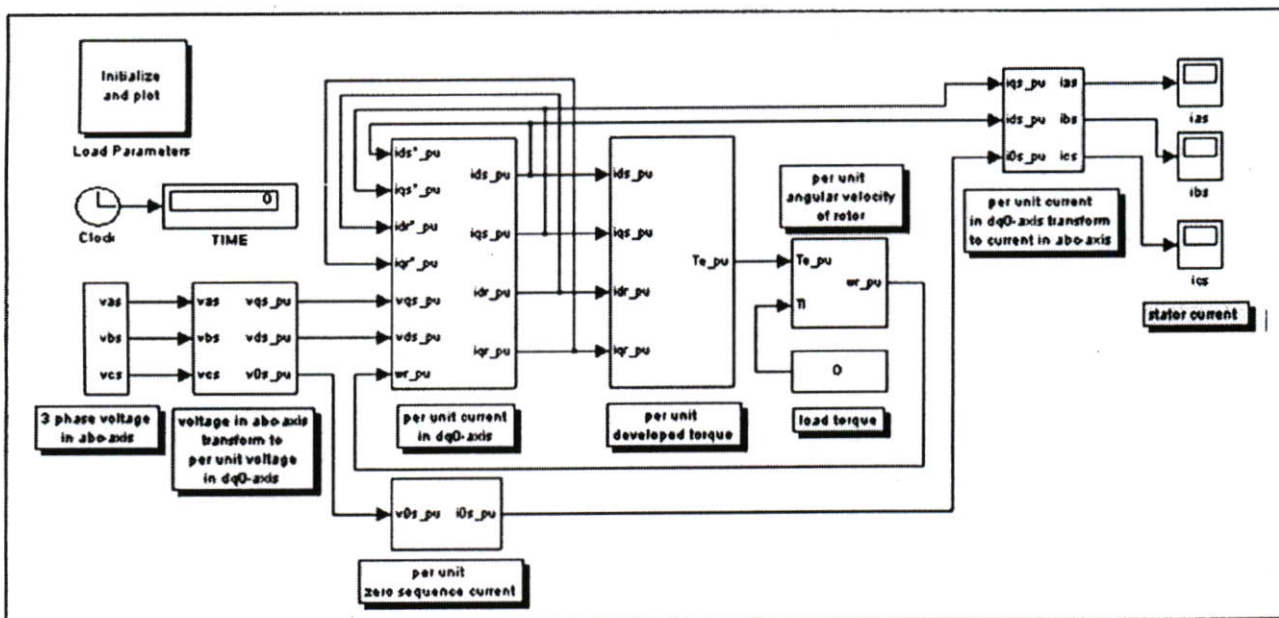
5. การทดสอบแบบจำลองการรวมกลุ่ม

การทดสอบแบบจำลองการรวมกลุ่มโดยนำไปใช้ในการจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นการเริ่มต้นหมุนด้วยวิธี direct-on-line ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานอยู่ในบัสเดียวกัน ดังรูปที่ 1 ใน 2 กรณี คือ



1. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า มีภาระทางกล 1/2 ของแรงบิดที่พิกัดของกลุ่มมอเตอร์ (14.27 N-m) เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการวัด [7]
2. มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีความเร็วเชิงครอนต์ต่างกัน ในสภาวะไม่มีภาระทางกล เปรียบเทียบระหว่างการจำลองแบบแยกเป็นแต่ละตัวและแบบรวมกลุ่ม
ข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่นำมาใช้ทดลองได้แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้มาจาก [2,7]

รูปที่ 1 แผนภาพแสดงลักษณะการต่อวงจรของการทดสอบ



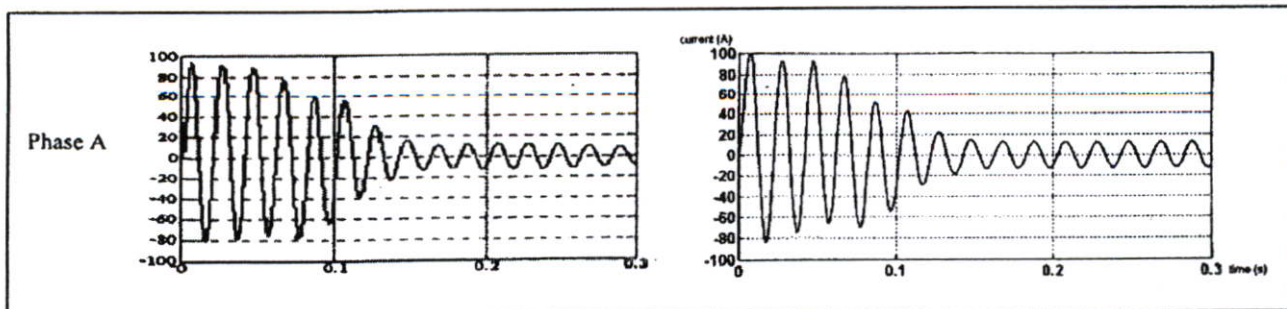
รูปที่ 2 แบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบเปอร์ยูนิตโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

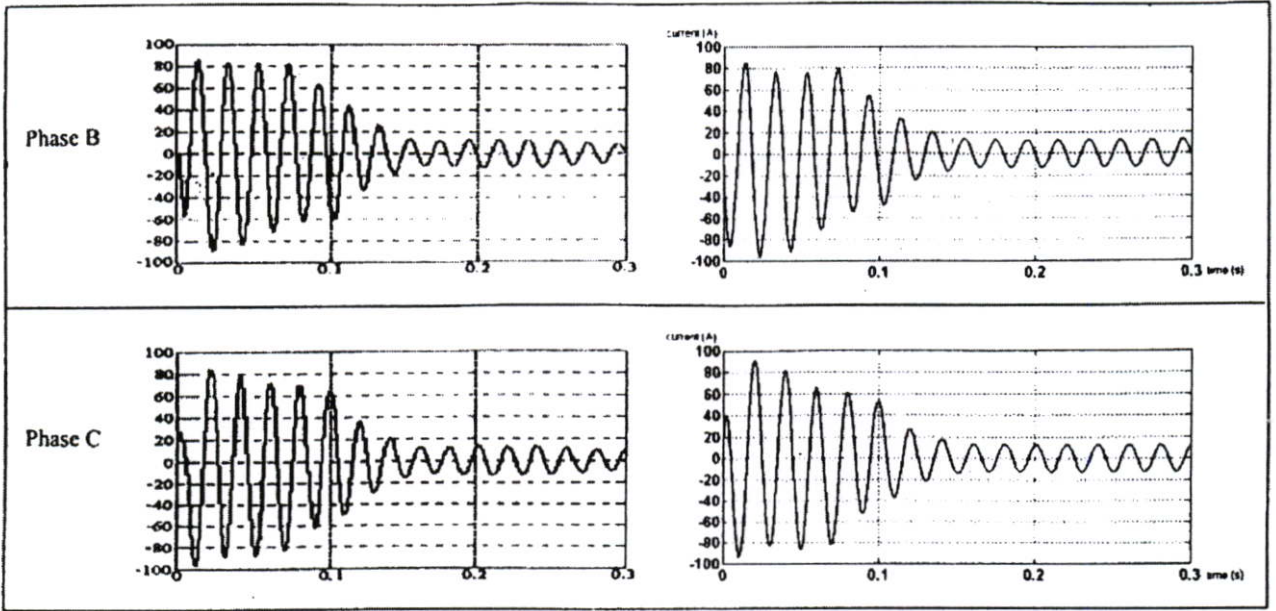
6. เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลอง

กรณีที่ 1

กระแสที่ได้จากการทดลอง

กระแสที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลอง

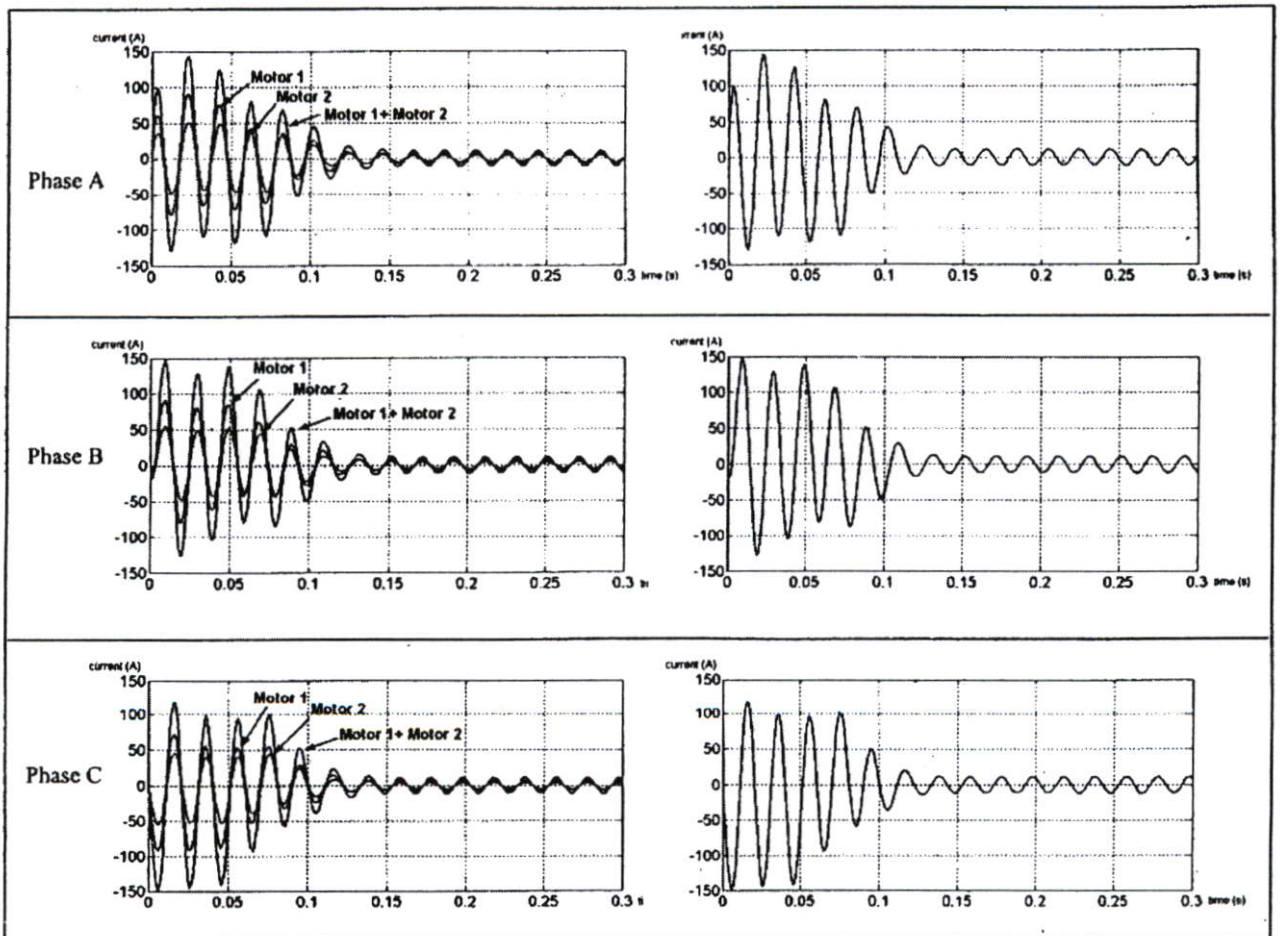




กรณีที่ 2

กระแสที่ได้จากแบบจำลองมอเตอร์แต่ละตัว

กระแสที่ได้จากแบบจำลองการรวมกลุ่ม



7. สรุป

บทความฉบับนี้นำเสนอแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พัฒนาขึ้นจากการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิตเพื่อแก้ปัญหาในการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีความเร็วซิงโครนิสแตกต่างกัน จากนั้น ทำการทดสอบแบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้ด้วยการนำไปจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีความเร็วซิงโครนิสเท่ากันและแตกต่างกัน โดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่สร้างด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งใช้สมการในระบบพิกัดแกน d-q และระบบเปอร์ยูนิต

จากผลจากการจำลองที่ได้ พบว่า แบบจำลองการรวมกลุ่มให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ได้จากการวัดจริงและผลการจำลองที่ได้จากแบบจำลองแบบแยกเป็นแต่ละตัว คือ มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ หรืออาจกล่าวได้ว่าแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ปรับปรุงโดยใช้ระบบเปอร์ยูนิตที่ได้นำเสนอมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ในการศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบ เช่น การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรหรือการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อขนานอยู่ในบัสเดียวกันได้ ไม่ว่าจะมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัวในกลุ่มจะมีความเร็วซิงโครนิสเท่ากันหรือแตกต่างกัน

8. ภาคผนวก

ข้อมูลมอเตอร์ที่ใช้ในกรณีที่ 1

1 hp : 220/380 V, 3.1/2.0 A, 50 Hz, 4 poles, 1400 rpm,
 $r_1 = 10.5 \Omega$, $r_2 = 10.1312 \Omega$, $X_1 = 9.8056 \Omega$,
 $X_2 = 9.8056 \Omega$, $X_M = 216.6351 \Omega$, $J = 0.0105 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
 5 hp : 220/380 V, 13.7/7.9 A, 50 Hz, 4 poles, 1420 rpm,
 $r_1 = 2.054 \Omega$, $r_2 = 1.9645 \Omega$, $X_1 = 2.0896 \Omega$,
 $X_2 = 2.0896 \Omega$, $X_M = 55.2515 \Omega$, $J = 0.0318 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

ข้อมูลมอเตอร์ที่ใช้ในกรณีที่ 2

3.7 kW : 380 V, 50 Hz, 6 poles

$r_1 = 1.40 \Omega$, $r_2 = 2.00 \Omega$, $X_1 = 1.8124 \Omega$,
 $X_2 = 2.0138 \Omega$, $X_M = 68.1726 \Omega$, $J = 0.0922 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
 2.2 kW : 380 V, 50 Hz, 4 poles
 $r_1 = 2.978 \Omega$, $r_2 = 2.209 \Omega$, $X_1 = 3.5725 \Omega$,
 $X_2 = 3.5725 \Omega$, $X_M = 106.6068 \Omega$, $J = 0.0227 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
 ค่าฐานที่ใช้ $V_{s,base} = 310.27 \text{ V}$, $I_{s,base} = 11.17 \text{ A}$

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Piroomthum and A. Kunakorn, "A Study of Starting Current due to a Group of Induction Motors Using an Aggregation Model," IEEE Power Electronics and Drive Systems (PEDS 2003), Singapore, November 2003, pp.1054-1057
- [2] T. Kataoka, H. Uchida, S. Nishikata, T. Kai, T. Funabashi, "A Method for Aggregation of a Group of Induction Motor Loads," POWERCON 2000, Perth, Australia, December 2000, pp.1683-1688
- [3] P. Pillay, S.M.A. Sabur, M.M. Haq, "A model for induction motor aggregation for power system studies," Electric Power Systems Research, November 1996, pp.225-228
- [4] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink," Prentice Hall, 1998
- [5] P. Kundur, "Power system stability and control," McGraw-Hill, 1994.
- [6] R. Krishnan, "Electric Motor Drives : Modeling, Analysis, and Control," Prentice Hall, 2001.
- [7] โปธิฐ ภิรมย์ธรรม, "การศึกษากระแสขณะเริ่มต้นหมุนสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้แบบจำลองการรวมกลุ่ม", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546

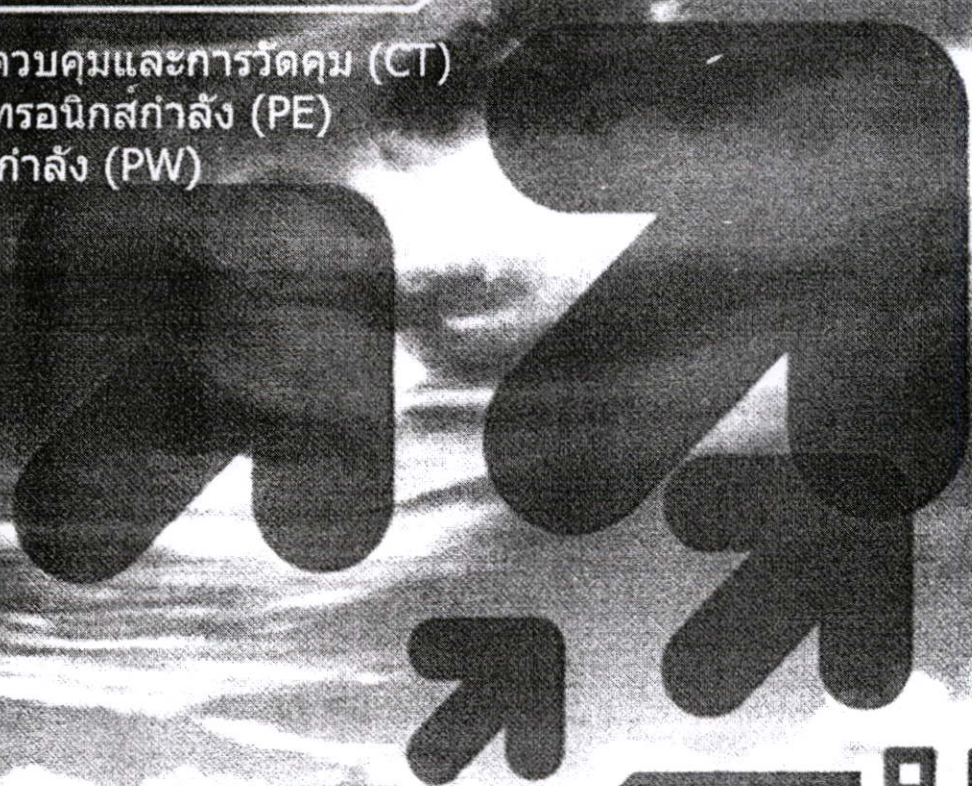
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 28th Electrical Engineering Conference



Volume I

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

Electrical Engineering
Electrical Engineering



Western Digital



ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
20 - 21 ตุลาคม 2548
ณ โรงแรม เฟิร์ด วิลเลจ กรุงเทพฯ

แบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิตสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

Per Unit Aggregation Model for a Group of Induction Motors

ทีปกร บัญญัติสินทร์ณ์ อานันท์วัฒน์ คุณากร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร. 0-2326-4550 E-mail : teepakorn_bu@yahoo.com, kkananta@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิตสำหรับเทคนกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่เชื่อมต่อกันในบัสเดียวกัน ตัวแปรทั้งหมดของแบบจำลองหาได้จากอาศัยหลักการของการทดสอบขณะไม่มีภาระและการทดสอบยึดโรเตอร์ และพัฒนาให้สามารถใช้ในการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีความเร็วเชิงครีนิสแตกต่างกัน จากนั้น ทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยนำไปใช้จำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดพบว่าแบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้นำเสนอให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องเป็นที่ยอมรับได้โดยมีความผิดพลาดน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์และนำไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังได้

คำสำคัญ : แบบจำลองการรวมกลุ่ม, มอเตอร์เหนี่ยวนำ

Abstract

This paper presents a per unit aggregation model for representing a group of three phase induction motors connected in the same bus. All parameters in the model are derived based on no load test and block rotor test, and are developed for an aggregation of induction motors with different synchronous speeds. The validity of model, then, is verified by simulating the starting current due to a group of induction motors using MATLAB/SIMULINK. The results are compared with measurements. It is found that the proposed aggregation model gives acceptably accurate results with an error of less than 10%, and will be useful for power system studies.

Keywords : Aggregation model, Induction motors

1. บทนำ

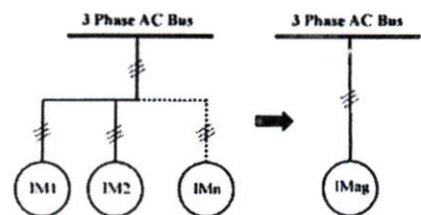
ในระบบไฟฟ้ากำลังมีภาระไฟฟ้าหลายประเภท การสร้างแบบจำลองของภาระไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรมมีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการสร้างแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ซึ่งในทางปฏิบัติ การวิเคราะห์

ระบบด้วยแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัวเป็นสิ่งที่ไม่สะดวกและอาจใช้เวลาในการคำนวณมาก จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองสมมูลหนึ่งหน่วยที่ใช้แทนกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกันในบัสเดียวกัน แบบจำลองเหล่านี้รู้จักกันในชื่อ "แบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ" [1-3] ซึ่งมีวิธีการที่แตกต่างกันแต่แบบจำลองเหล่านี้ก็ยังมีข้อจำกัด คือใช้ได้กับเฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีความเร็วเชิงครีนิสเท่ากัน

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองการรวมกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งพิจารณาเพิ่มเติมมาจากวิธีการของ [1-2] โดยพัฒนาให้เป็นแบบเปอร์ยูนิตซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลัง และพัฒนาให้สามารถใช้ในการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีความเร็วเชิงครีนิสแตกต่างกันได้ การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำได้โดยการนำไปจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการ direct-on-line โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลที่ได้จากการวัด

2. แบบจำลองการรวมกลุ่มแบบเปอร์ยูนิต

ตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองการรวมกลุ่ม ได้แก่ ความต้านทานของสเตเตอร์และโรเตอร์ รีแอกแตนซ์รีวไหลของสเตเตอร์และโรเตอร์ และรีแอกแตนซ์กระแสคืนแม่เหล็ก การหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของวงจรมูลยู่เป็นการพิจารณานบนพื้นฐานของการทดสอบขณะไม่มีภาระและการทดสอบยึดโรเตอร์เช่นเดียวกัน [1-2] โดยพัฒนาแบบจำลองการรวมกลุ่มให้เป็นแบบเปอร์ยูนิต



รูปที่ 1 การแทนมอเตอร์เหนี่ยวนำ N ตัวด้วยแบบจำลองการรวมกลุ่ม

ค่าฐานที่ใช้ในการเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ให้เป็นเปอร์ยูนิต กำหนดดังนี้
 V_{base} = ค่า peak ของแรงดันเฟสที่กักที่จ่ายให้กลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 I_{base} = ค่า peak ของกระแสฟลักซ์ของมอเตอร์ที่มีกำลังพิกัดสูงสุด
 จะได้

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} \quad (1)$$

2.1 ตัวแปรต่าง ๆ ของวงจรมอเตอร์

อิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิคขณะไม่มีภาระของมอเตอร์แต่ละตัว

$$\bar{Z}_{n,j} = \bar{r}_{1,j} + j(\bar{x}_{l1,j} + \bar{x}_{M,j}) \quad (2)$$

อิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิคขณะชัตโรเตอร์ของมอเตอร์แต่ละตัว

$$\bar{Z}_{l,j} = (\bar{r}_{1,j} + \bar{r}_{2,j}) + j(\bar{x}_{l1,j} + \bar{x}_{l2,j}) \quad (3)$$

อิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิคขณะไม่มีภาระของแบบจำลองการรวมกลุ่ม

$$\bar{Z}_{n,ag} = \frac{\prod_{i=1}^N \bar{Z}_{n,i}}{\sum_{i=1}^N \left[\prod_{k=1, k \neq i}^N \bar{Z}_{n,k} \right]} \quad (4)$$

จะได้ $\bar{Z}_{n,ag} = \bar{r}_{1,ag} + j(\bar{x}_{l1,ag} + \bar{x}_{M,ag}) \quad (5)$

อิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิคขณะชัตโรเตอร์ของแบบจำลองการรวมกลุ่ม

$$\bar{Z}_{l,ag} = \frac{\prod_{i=1}^N \bar{Z}_{l,i}}{\sum_{i=1}^N \left[\prod_{k=1, k \neq i}^N \bar{Z}_{l,k} \right]} \quad (6)$$

จะได้ $\bar{Z}_{l,ag} = (\bar{r}_{1,ag} + \bar{r}_{2,ag}) + j(\bar{x}_{l1,ag} + \bar{x}_{l2,ag}) \quad (7)$

การหาตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองการรวมกลุ่ม ทำได้ดังนี้

- 1) จัดตัวแปรต่าง ๆ ของมอเตอร์แต่ละตัวตามสมการ (2) และ (3)
- 2) คำนวณแบบจำลองการรวมกลุ่มโดยใช้สมการ (4) และ (6) จะได้ผลลัพธ์อยู่ในรูปแบบตามสมการ (5) และ (7)
- 3) $\bar{r}_{1,ag}$ และ $\bar{r}_{2,ag}$ หาได้จากสมการ (5) และ (7) $\bar{x}_{l1,ag}$ และ $\bar{x}_{l2,ag}$ ใช้มาตรฐาน IEEE Standard 112-1996 [5] ประมาณค่าการกระจายรีแอกแตนซ์รั่วไหลซึ่งขึ้นอยู่กับ class ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ส่วน $\bar{x}_{M,ag}$ หาได้จากส่วนจินตภาพของสมการ (5) ลบด้วย $\bar{x}_{l1,ag}$

2.2 ตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการรวมกลุ่ม

2.2.1 กำลังพิกัดของการรวมกลุ่ม

กำลังพิกัดของการรวมกลุ่ม เท่ากับ ผลรวมกำลังพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัว

$$P_{ag} = \sum_{i=1}^N P_i \quad (8)$$

2.2.2 จำนวนขั้วแม่เหล็กของการรวมกลุ่ม

จำนวนขั้วแม่เหล็กของการรวมกลุ่มหาได้โดยใช้แนวความคิดคือ ความเร็วเชิงโคโรนัสของการรวมกลุ่ม เท่ากับ ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของความเร็วเชิงโคโรนัสกับกำลังพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัว [4]

$$pole_{ag} = \frac{120/P_{ag}}{\sum_{i=1}^N N_{s,i} P_i} \quad (9)$$

2.2.3 โมเมนต์ความเฉื่อยของการรวมกลุ่ม

โมเมนต์ความเฉื่อยของการรวมกลุ่ม หาได้จากหลักการอนุรักษ์พลังงานของการหมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนัส [4]

$$J_{ag} = \frac{\sum_{i=1}^N J_i N_{s,i}^2}{N_{s,ag}^2} \quad (10)$$

- เมื่อ \bar{r}_1, \bar{x}_{l1} = per unit stator resistance, leakage reactance
 \bar{r}_2, \bar{x}_{l2} = per unit rotor resistance, leakage reactance ที่เข้าสมาทางด้านสเตเตอร์
 \bar{x}_M = per unit magnetizing reactance
 P = กำลังพิกัดของมอเตอร์
 N_s = ความเร็วเชิงโคโรนัสของมอเตอร์
 f = ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์
 J = โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์

(สัญลักษณ์ “ - ” แทน ค่าเปอร์ยูนิค , “ i ” แทน มอเตอร์ตัวที่ i และ “ ag ” แทน แบบจำลองการรวมกลุ่ม)

3. แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ MATLAB/SIMULINK

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการรวมกลุ่มสร้างโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งใช้สมการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงแบบ stationary [6] โดยทำการเปลี่ยนตัวแปรให้เป็นเปอร์ยูนิคในระบบพิกัดแกน d-q

$$\bar{v}_{qs} = \frac{2}{3} \bar{v}_{as} - \frac{1}{3} \bar{v}_{bs} - \frac{1}{3} \bar{v}_{cs} \quad (11)$$

$$\bar{v}_{ds} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\bar{v}_{cs} - \bar{v}_{bs}) \quad (12)$$

$$\bar{v}_{0s} = \frac{1}{3} (\bar{v}_{as} + \bar{v}_{bs} + \bar{v}_{cs}) \quad (13)$$

$$\frac{d\bar{i}_{ds}}{dt} = \frac{\omega(\bar{r}_1 \bar{x}_{l2} \bar{i}_{ds} + \omega_r \bar{x}_M \bar{i}_{qs} + \bar{r}_2 \bar{x}_M \bar{i}_{dr} + \omega_r \bar{x}_{l2} \bar{x}_M \bar{i}_{qr} + \bar{x}_{l2} \bar{v}_{ds})}{\bar{x}_{l1} \bar{x}_{l2} - \bar{x}_M^2} \quad (14)$$

$$\frac{d\bar{i}_{qs}}{dt} = \frac{\omega(-\omega_r \bar{x}_M \bar{i}_{ds} - \bar{r}_1 \bar{x}_{l2} \bar{i}_{qs} - \omega_r \bar{x}_{l2} \bar{x}_M \bar{i}_{dr} + \bar{r}_2 \bar{x}_M \bar{i}_{qr} + \bar{x}_{l2} \bar{v}_{qs})}{\bar{x}_{l1} \bar{x}_{l2} - \bar{x}_M^2} \quad (15)$$

$$\frac{d\bar{i}_{qr}}{dt} = \frac{\omega(\omega_r \bar{x}_M \bar{i}_{ds} + \bar{r}_1 \bar{x}_M \bar{i}_{qs} + \omega_r \bar{x}_M \bar{x}_{l2} \bar{i}_{dr} - \bar{r}_2 \bar{x}_M \bar{i}_{qr} - \bar{x}_M \bar{v}_{qs})}{\bar{x}_M \bar{x}_{l2} - \bar{x}_M^2} \quad (16)$$

$$\frac{d\bar{i}_{dr}}{dt} = \frac{\omega(\bar{r}_1 \bar{x}_M \bar{i}_{ds} - \omega_r \bar{x}_M \bar{x}_M \bar{i}_{qs} - \bar{r}_2 \bar{x}_M \bar{i}_{dr} - \omega_r \bar{x}_M \bar{x}_{l2} \bar{i}_{qr} - \bar{x}_M \bar{v}_{ds})}{\bar{x}_M \bar{x}_{l2} - \bar{x}_M^2} \quad (17)$$

$$\bar{i}_{0s} = \frac{\omega}{\omega_l} \int (\bar{v}_{0s} - \bar{i}_{0s} \bar{r}_1) dt \quad (18)$$

$$\bar{T}_e = \bar{x}_M (\bar{i}_{qs} \bar{i}_{dr} - \bar{i}_{ds} \bar{i}_{qr}) \quad (19)$$

$$\bar{\omega}_r = \frac{3}{2} \left(\frac{pole^2}{4} \right) \left(\frac{V_{base} I_{base}}{J \omega^2} \right) \int (\bar{T}_e - \bar{T}_l) dt \quad (20)$$

$$\bar{i}_{as} = \bar{i}_{qs} + \bar{i}_{0s} \quad (21)$$

$$\bar{i}_{bs} = -\frac{1}{2} \bar{i}_{qs} - \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{i}_{ds} + \bar{i}_{0s} \quad (22)$$

$$\bar{i}_{cs} = -\frac{1}{2} \bar{i}_{qs} + \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{i}_{ds} + \bar{i}_{0s} \quad (23)$$

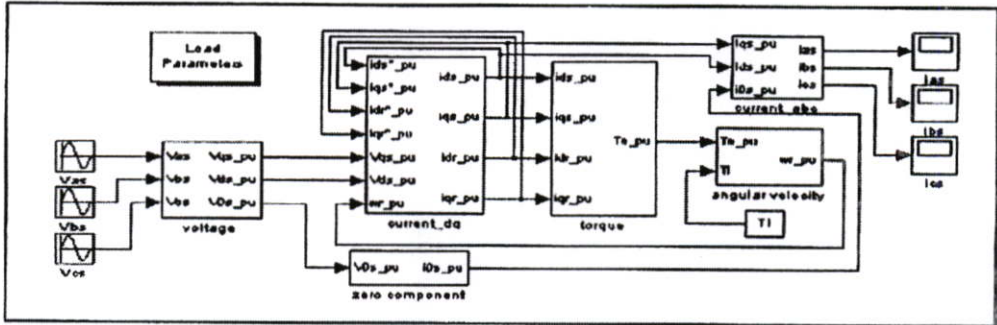
4. การทดสอบแบบจำลองการรวมกลุ่มและผลที่ได้

การทดสอบแบบจำลองการรวมกลุ่มได้นำไปใช้ในการจำลองกระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานอยู่ในบัสเดียวกัน ด้วยวิธีการเริ่มต้นหมุนแบบ direct-on-line เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัด เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ คือ analyzing recorder YOKOGAWA รุ่น AR1100A และ Power analyzer รุ่น PZ4000

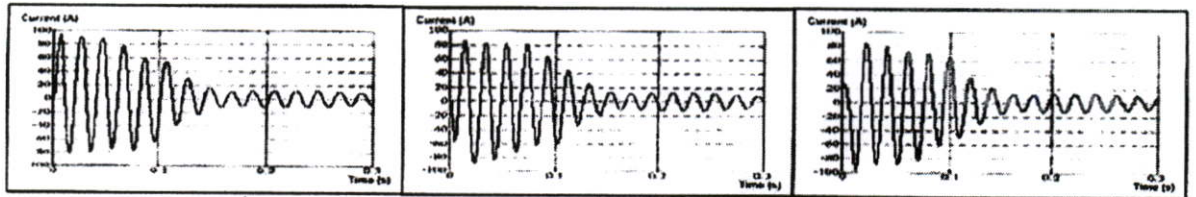
กรณีที่ 1 กลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า และ 5 แรงม้า ที่มีความเร็วเชิงโรตัทต่างกัน ในสภาวะมีการะทางกล 1/2 ของแรงบิดที่กัก (14.27 N-m)

กรณีที่ 2 กลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า ที่มีความเร็วเชิงโรตัทต่างกัน ในสภาวะไม่มีการะทางกล

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สร้างด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK แสดงดังรูปที่ 2 และผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4



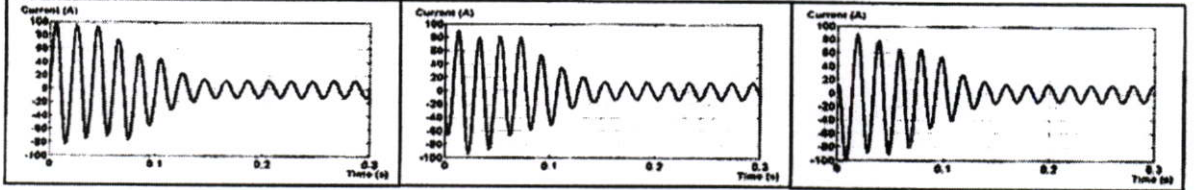
รูปที่ 2 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK



(ก) กระแส Phase A ที่ได้จากการวัด

(ข) กระแส Phase B ที่ได้จากการวัด

(ค) กระแส Phase C ที่ได้จากการวัด

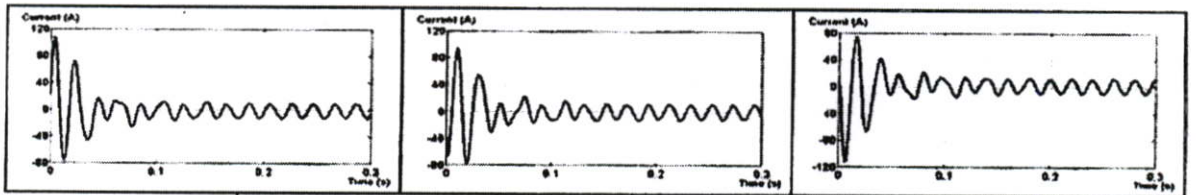


(ง) กระแส Phase A ที่ได้จากการจำลอง

(จ) กระแส Phase B ที่ได้จากการจำลอง

(ฉ) กระแส Phase C ที่ได้จากการจำลอง

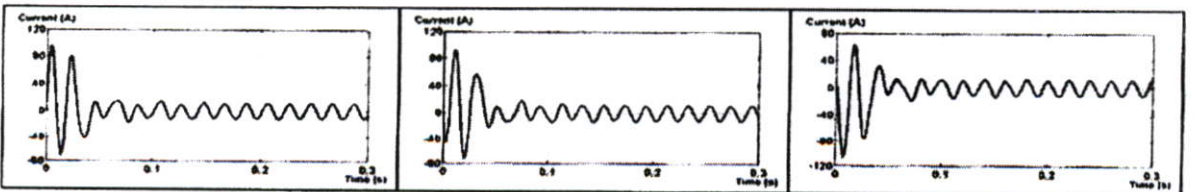
รูปที่ 3 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรณีที่ 1



(ก) กระแส Phase A ที่ได้จากการวัด

(ข) กระแส Phase B ที่ได้จากการวัด

(ค) กระแส Phase C ที่ได้จากการวัด



(ง) กระแส Phase A ที่ได้จากการจำลอง

(จ) กระแส Phase B ที่ได้จากการจำลอง

(ฉ) กระแส Phase C ที่ได้จากการจำลอง

รูปที่ 4 กระแสขณะเริ่มต้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรณีที่ 2

ทำการเปรียบเทียบค่าสูงสุดของกระแสขณะเริ่มคั้นหมุนที่ได้จากการวัดและจากการจำลอง แสดงดังตาราง

กระแสขณะเริ่มคั้นหมุน	การวัด	การจำลอง	Error (%)
Phase A	96.32 A	98.42 A	2.18
Phase B	-91.57 A	-95.26 A	4.03
Phase C	-93.98 A	-97.34 A	3.57

ตารางที่ 1 ค่าสูงสุดของกระแสขณะเริ่มคั้นหมุน กรณีที่ 1

กระแสขณะเริ่มคั้นหมุน	การวัด	การจำลอง	Error (%)
Phase A	107.10 A	96.30 A	7.49
Phase B	95.04 A	92.46 A	2.71
Phase C	-112.60 A	-107.80 A	4.26

ตารางที่ 2 ค่าสูงสุดของกระแสขณะเริ่มคั้นหมุน กรณีที่ 2

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองการรวมกลุ่มแม่เหล็กเหนี่ยวนำสำหรับกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และพัฒนาให้สามารถใช้ในการรวมกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีความเร็วเชิงโรตอร์แตกต่างกันได้ จากนั้นทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการรวมกลุ่มที่ได้นำเสนอด้วยการนำไปใช้จำลองกระแสขณะเริ่มคั้นหมุนของกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่อขนานอยู่ในบัสเดียวกัน เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลที่ได้จากการวัดจริง โดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่สร้างด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

จากผลการทดสอบที่ได้ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 พบว่า รูปคลื่นกระแสที่ได้จากการจำลองโดยใช้แบบจำลองการรวมกลุ่มทั้งสองกรณี มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นกระแสที่ได้จากการวัดจริง คือ มีความแตกต่างน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ (ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าแบบจำลองการรวมกลุ่มที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องเชื่อถือได้ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการสร้างแบบจำลองการไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังที่มีกลุ่มของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อขนานอยู่ในบัสเดียวกันได้ เช่น การศึกษาผลตอบสนองของลวดการคำนวณค่ากระแสตกตวง และการศึกษาเสถียรภาพของระบบ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] W.Suwanvej and A.Kunakorn, "Estimation of short circuit current due to a group of induction motors using an aggregation model", IEEE POWERCON'2004, Singapore, November 2004, pp.559-563
- [2] P.Piranthum and A.Kunakorn, "A study of starting current due to a group of induction motors using an aggregation model", IEEE Power Electronics and Drive Systems (PEDS 2003), Singapore, November 2003, pp.1054-1057

- [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, November 1996, pp.225-228
- [4] M.Akbaba and S.Q.Fakhro, "New model for single-unit representation of induction motor loads, including skin effect, for power system transient stability studies", IEE Proceedings-B, Vol.139, No.6, November 1992, pp.521-533
- [5] IEEE standard 112-1996, "Test procedures for polyphase induction motors and generators"
- [6] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink", Prentice Hall, 1998

ภาคผนวก (ข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ)

- 1 hp : 220/380 V, 3.4/2.0 A, 50 Hz, 4 poles, 1400 rpm,
 $R_1 = 10.5$ ohms, $R_2 = 10.1312$ ohms, $X_{T1} = 9.8056$ ohms,
 $X_{T2} = 9.8056$ ohms, $X_M = 216.6351$ ohms, $J = 0.0028$ kg·m²
- 3 hp : 220/380 V, 8.7/5.0 A, 50 Hz, 4 poles, 1420 rpm,
 $R_1 = 3.780$ ohms, $R_2 = 3.2899$ ohms, $X_{T1} = 3.8575$ ohms,
 $X_{T2} = 3.8575$ ohms, $X_M = 81.1024$ ohms, $J = 0.0056$ kg·m²
- 5 hp : 220/380 V, 13.7/7.9 A, 50 Hz, 4 poles, 1420 rpm,
 $R_1 = 2.054$ ohms, $R_2 = 1.9645$ ohms, $X_{T1} = 2.0896$ ohms,
 $X_{T2} = 2.0896$ ohms, $X_M = 55.2515$ ohms, $J = 0.0101$ kg·m²
- 1 hp : 220/380 V, 4.0/2.3 A, 50 Hz, 6 poles, 940 rpm,
 $R_1 = 6.95$ ohms, $R_2 = 6.74$ ohms, $X_{T1} = 9.425$ ohms,
 $X_{T2} = 9.425$ ohms, $X_M = 142.78$ ohms, $J = 0.0049$ kg·m²
- ค่า J ของมอเตอร์ในกรณีที่ 1 : J ของ 1 hp = 0.0077, J ของ 5 hp = 0.0217

ประวัติผู้เขียน



ที่ปกร บัญญัติสินทร์ณ์ สำเร็จการศึกษาด้านวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยม) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิตที่สถาบันเดียวกัน และทำงานในตำแหน่งวิศวกรระดับ 4 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



อานันท์วัฒน์ คุณากร สำเร็จการศึกษาด้านวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (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 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ Electromagnetic transients in power systems, Dynamic models of electrical machines