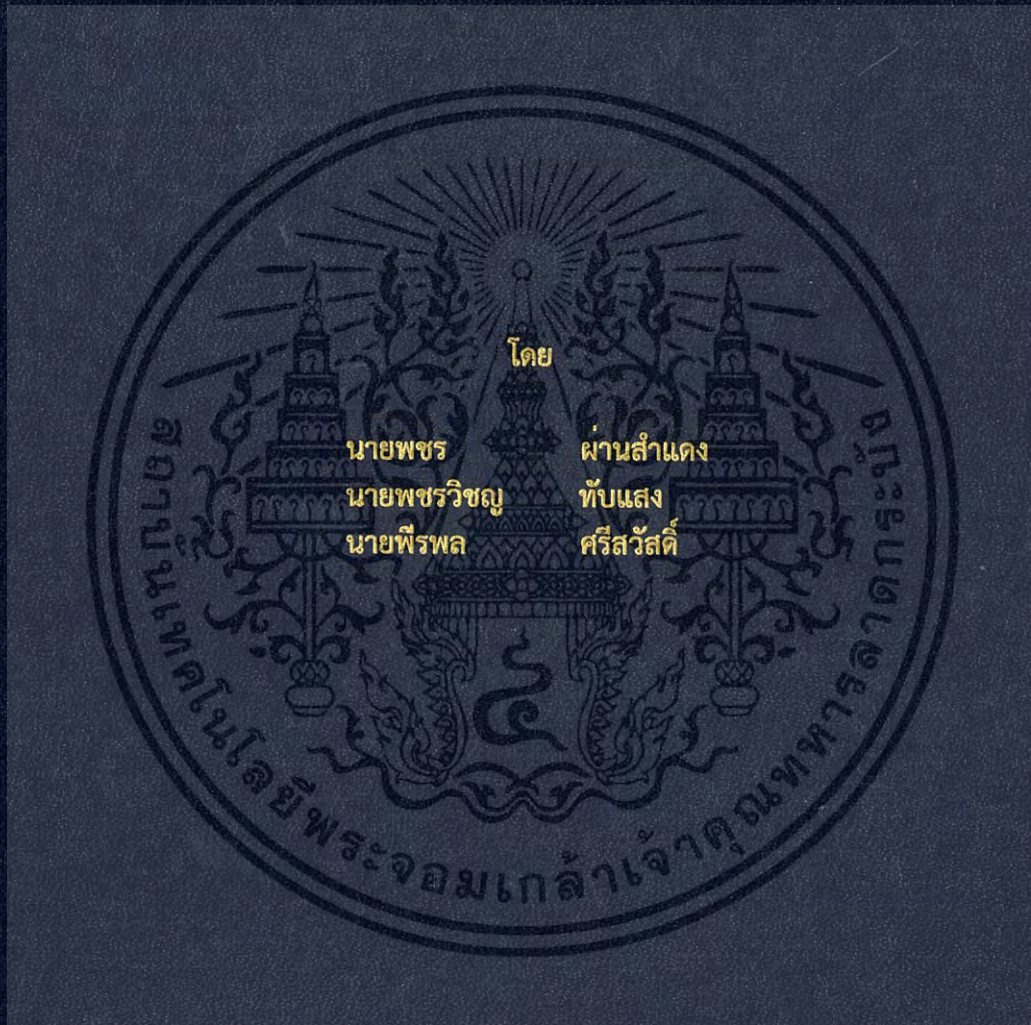


การพัฒนาและทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส  
THE IMPROVEMENT AND TESTING FOR ENHANCING THE EFFICIENCY OF  
3-PHASE INDUCTION MOTOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

การพัฒนาและทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส  
THE IMPROVEMENT AND TESTING FOR ENHANCING THE EFFICIENCY OF  
3-PHASE INDUCTION MOTOR



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE IMPROVEMENT AND TESTING FOR ENHANCING THE EFFICIENCY OF  
3-PHASE INDUCTION MOTOR



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2560

การพัฒนาและทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส  
THE IMPROVEMENT AND TESTING FOR ENHANCING THE EFFICIENCY OF  
3-PHASE INDUCTION MOTOR



อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์

รศ.พิชิต ล้ายอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาและทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

ผู้จัดทำ

1. นายเพชร ผ่านสำแดง
2. นายเพชรวิชญ ทับแสง
3. นายพีรพล ศรีสวัสดิ์



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(รองศาสตราจารย์ พิชิต ล้ายอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การพัฒนาและทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

นายพชร ผ่านสำแดง  
นายพชรวิชญ ทับแสง  
นายพีรพล ศรีสวัสดิ์  
ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
รศ.พิชิต ล้ำยอง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
ปีการศึกษา 2560

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะและปรับปรุงสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้าจากผู้ผลิต โดยการศึกษาจะเริ่มจากการศึกษาคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ได้แก่ การตรวจสอบสนามแม่เหล็กหมุนและหาวงจรมุมูลโดยประมาณ หลังจากนั้นจะทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสทั้งสามขนาดข้างต้น โดยจะทำการลดจำนวนรอบของขดลวดอาร์มาเจอร์และเพิ่มขนาดทองแดงของขดลวดอาร์มาเจอร์ ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพมอเตอร์อย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากการสูญเสียของมอเตอร์ทั้งจากผู้ผลิตมีค่าใกล้เคียงกับมอเตอร์ที่พันขดลวดใหม่ ในขณะที่กำลังไฟฟ้าด้านออกของมอเตอร์ที่พันใหม่มีค่ามากขึ้นเป็นสองเท่า

THE IMPROVEMENT AND TESTING FOR ENHANCING THE EFFICIENCY OF  
3-PHASE INDUCTION MOTOR

Mr. Pojara	Pansamdaeng	
Mr. Pacharawitch	Tubsaeng	
Mr. Peerapol	Srisawas	
Dr. Piampoom	Sarikprueck	Advisor
Assoc.Prof. Pichit	Lumyoung	Co-Advisor

**ABSTRACT**

This thesis has objectives to study the characteristics and to improve the efficiency of the three-phase induction motor. 1 HP, 3 HP and 5 HP from manufacturer are used to test and develop in this study. First of all, the study of induction motor characteristics includes rotating magnetic field investigation and equivalent circuit evaluation. Then, as for the motor efficiency improvement, the stator winding of developed three phase induction motors are rewound by decreasing number of turn and increasing stator copper size. As the results, the developed motor efficiencies are obviously improved comparing to the original motors from manufacturer due to their similar losses for all abovementioned rated induction motors.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ และรองศาสตราจารย์ พิเชิต ล้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ มาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้ทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติให้แก่คณะผู้จัดทำ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	XIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนิน	2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	5
2.2 วงจรแม่เหล็ก	6
2.3 สารแม่เหล็ก	7
2.4 ความต้านทานแม่เหล็ก	9
2.5 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า	10
2.6 ความเหนี่ยวนำร่วม	12
2.7 ความเร็วเชิงโคโรน่า	14
2.8 สนามแม่เหล็กหมุน	15
2.9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสสลับ 3 เฟส	21
2.10 การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ	24
2.11 สัมประสิทธิ์ของการพันขดลวดอาร์มาเจอร์	28
2.12 การคำนวณหาค่า Distribution factor	29
2.13 การคำนวณค่า Pitch	31
2.14 วงจรสมมูลแบบประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	33
2.15 การทดสอบหาวงจรสมมูลแบบประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	36
2.16 คุณสมบัติของกำลังไฟฟ้าและแรงบิด	38

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 วิธีการทดลอง</b>	40
3.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง	40
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง	40
3.1.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการทดลอง	41
3.2 วิธีการทดลอง	42
3.2.1 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน	42
3.2.2 การทดสอบหาวงจรสมมูลแบบประมาณ	42
3.2.3 การทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจากผู้ผลิต	45
3.2.4 การพันขดลวดอาร์มาเจอร์	46
3.2.5 การทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่พันขดลวดใหม่	47
3.2.6 การทดสอบหาการสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านลม	48
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	49
4.1 ผลการทดสอบการศึกษาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน	49
4.1.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า	50
4.1.2 อภิปรายผลการทดลอง	57
4.2 ผลการทดสอบหาวงจรสมมูลแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	57
4.2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้าจากผู้ผลิต	57
4.2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่	62
4.2.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าจากผู้ผลิต	67
4.2.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่	71
4.2.5 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้าจากผู้ผลิต	75
4.2.6 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่	79
4.2.7 อภิปรายผลการทดลอง	82
4.3 ผลการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	83
4.3.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้าจากผู้ผลิต	83
4.3.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่	85
4.3.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าจากผู้ผลิต	88
4.3.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่	91
4.3.5 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้าจากผู้ผลิต	94
4.3.6 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่	96
4.3.7 อภิปรายผลการทดลอง	98

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 กำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	99
4.4.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า	99
4.4.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า	104
4.4.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า	110
4.4.4 อภิปรายผลการทดลอง	114
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	<b>115</b>
5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ	115
5.1.1 การทดสอบหาคุนลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน	115
5.1.2 การทดสอบหาวจรสมมูลแบบประมาณ	115
5.1.3 การทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	115
5.1.4 การคำนวณและทดสอบหาการสูญเสียประเภทต่าง ๆ	116
5.2 ปัญหาของโครงการ	116
5.3 ข้อเสนอแนะ	116
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>117</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>118</b>
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ	119
ภาคผนวก ข คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	121
ภาคผนวก ค ตารางขนาดลวดทองแดงมาตรฐาน	123
ภาคผนวก ง ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจากผู้ผลิต	126
ภาคผนวก จ บทความทางวิชาการ	130
ประวัติผู้เขียนบทความ	135

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	5
2.2 โครงสร้างของโรเตอร์แบบกรงกระรอก	6
2.3 โครงสร้างของโรเตอร์แบบพันขดลวด	6
2.4 ขดลวดพันรอบแกนเหล็กแบบเป็นวงรอบปิด	7
2.5 ขดลวดพันรอบแกนเหล็กแบบมีช่องอากาศบางส่วน	7
2.6 ความสัมพันธ์ของค่า B และ H ของสารแม่เหล็ก	9
2.7 ขดลวดพันรอบแกนเหล็กแบบวงแหวนทอรอยด์	10
2.8 การเกี่ยวค้ำของเส้นแรงแม่เหล็ก	12
2.9 การกระจายของแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศ	16
2.10 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เป็น Traveling wave	17
2.11 ตำแหน่งการวางขดลวดสามเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับสองขั้วแม่เหล็ก	18
2.12 สัญญาณกระแสไฟฟ้าสามเฟส	19
2.13 สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส (ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา)	20
2.14 โรเตอร์แบบขั้วยื่นและโรเตอร์แบบทรงกระบอกของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ	21
2.15 แสดงตำแหน่งวางขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส	22
2.16 การพันขดลวดแบบ Lap coil และ Shell coil	25
2.17 ลักษณะการแผ่ขยายของขดลวดในแต่ละเฟสเท่ากับ 60 องศาทางไฟฟ้า	26
2.18 การพันขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสแบบพิชเต็ม	26
2.19 การพันขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสแบบพิชเศษส่วน	27
2.20 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดแบบพิชเต็มและแบบพิชเศษส่วน	27
2.21 การกระจายของขดลวดในแต่ละเฟส 3 สล็อตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส	29
2.22 ความกว้างของขดลวดน้อยกว่าความกว้างของขั้วแม่เหล็ก	31
2.23 วงจรสมมูลแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	34
2.24 วงจรสมมูลแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะไร้ภาระทางกล	36
2.25 วงจรสมมูลแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะยึดโรเตอร์	37
2.26 Power flow ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ	38
3.1 การใส่ search coil ที่โรเตอร์	43
3.2 วงจรการทดสอบ No-load Test	43
3.3 วงจรการทดสอบ Block-rotor Test	43
3.4 วงจรการทดสอบ V-I Method	44

## สารบัญรูปลูกภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	44
3.6 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ 1 และ 3 แรงม้า จากผู้ผลิต	45
3.7 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ 5 แรงม้า จากผู้ผลิต	46
3.8 ลักษณะการพันขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟส	47
3.9 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ 1 แรงม้า ที่พันขดลวดใหม่	47
3.10 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ 3 แรงม้า และ 5 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่	48
3.11 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหา Rotational loss	48
4.1 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 0° ทางกล	49
4.2 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 15° ทางกล	49
4.3 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 30° ทางกล	50
4.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 45° ทางกล	50
4.5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 60° ทางกล	51
4.6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 75° ทางกล	51
4.7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 90° ทางกล	52
4.8 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 0° ทางกล	52
4.9 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 15° ทางกล	53
4.10 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 30° ทางกล	53
4.11 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 45° ทางกล	54
4.12 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 60° ทางกล	54
4.13 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 75° ทางกล	55
4.14 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 90° ทางกล	55
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับมุมมองทางกลต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจากผู้ผลิตและมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่พันขดลวดใหม่	56
4.16 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล	57
4.17 มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล	57
4.18 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล	58
4.19 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์	59
4.20 มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์	59
4.21 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์	60
4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสของการทดสอบ V-I Method	61

## สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.23	วงจรมุมลทางไฟฟ้าแบบประมาณ	61
4.24	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล	62
4.25	มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล	62
4.26	วงจรมุมลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล	63
4.27	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบยัดโรเตอร์	64
4.28	มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล	64
4.29	วงจรมุมลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบยัดโรเตอร์	65
4.30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสของการทดสอบ V-I Method	66
4.31	วงจรมุมลทางไฟฟ้าแบบประมาณ	66
4.32	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล	67
4.33	วงจรมุมลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล	68
4.34	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบยัดโรเตอร์	68
4.35	วงจรมุมลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบยัดโรเตอร์	69
4.36	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสของการทดสอบ V-I Method	70
4.37	วงจรมุมลทางไฟฟ้าแบบประมาณ	70
4.38	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล	71
4.39	วงจรมุมลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล	72
4.40	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบยัดโรเตอร์	72
4.41	วงจรมุมลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบยัดโรเตอร์	73
4.42	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสของการทดสอบ V-I Method	74
4.43	วงจรมุมลทางไฟฟ้าแบบประมาณ	74
4.44	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล	75
4.45	วงจรมุมลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล	76
4.46	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบยัดโรเตอร์	76
4.47	วงจรมุมลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบยัดโรเตอร์	77
4.48	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสของการทดสอบ V-I Method	78
4.49	วงจรมุมลทางไฟฟ้าแบบประมาณ	78
4.50	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล	79
4.51	วงจรมุมลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล	80
4.52	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบยัดโรเตอร์	80

## สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.53 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์	81
4.54 ค่าความต้านทานขดลวดอาร์มาเจอร์	81
4.55 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณ	82
4.56 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 25% ของพิกัด	83
4.57 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 50% ของพิกัด	83
4.58 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 75% ของพิกัด	84
4.59 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 100% ของพิกัด	84
4.60 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 25% ของพิกัด	85
4.61 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 50% ของพิกัด	86
4.62 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 75% ของพิกัด	86
4.63 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 100% ของพิกัด	87
4.64 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและโหลดต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 1 แรงม้า จากผู้ผลิตและที่พันขดลวดใหม่	88
4.65 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 25% ของพิกัด	88
4.66 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 50% ของพิกัด	89
4.67 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 75% ของพิกัด	89
4.68 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 100% ของพิกัด	90
4.69 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 25% ของพิกัด	91
4.70 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 50% ของพิกัด	91
4.71 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 75% ของพิกัด	92
4.72 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 100% ของพิกัด	92
4.73 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและโหลดต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 3 แรงม้า จากผู้ผลิตและที่พันขดลวดใหม่	93
4.74 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 25% ของพิกัด	94
4.75 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 50% ของพิกัด	94
4.76 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 75% ของพิกัด	95
4.77 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 25% ของพิกัด	96
4.78 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 50% ของพิกัด	96
4.79 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 75% ของพิกัด	97

## สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.80 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและโหลดต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 5 แรงม้า จากผู้ผลิตและที่พันขดลวดใหม่	98
4.81 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับที่พันขดลวดใหม่ ที่โหลด 25% ของพิกัด	99
4.82 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับที่พันขดลวดใหม่ ที่โหลด 50% ของพิกัด	100
4.83 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับที่พันขดลวดใหม่ ที่โหลด 75% ของพิกัด	101
4.84 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับที่พันขดลวดใหม่ ที่โหลด 100% ของพิกัด	102
4.85 กราฟค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้าจากผู้ผลิต	103
4.86 กราฟค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า ที่พันขดลวดใหม่	104
4.87 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับที่พันขดลวดใหม่ ที่โหลด 25% ของพิกัด	105
4.88 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับที่พันขดลวดใหม่ ที่โหลด 50% ของพิกัด	106
4.89 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับที่พันขดลวดใหม่ ที่โหลด 75% ของพิกัด	107
4.90 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับที่พันขดลวดใหม่ ที่โหลด 100% ของพิกัด	108
4.91 กราฟค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าจากผู้ผลิต	109
4.92 กราฟค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า ที่พันขดลวดใหม่	109
4.93 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับที่พันขดลวดใหม่ ที่โหลด 25% ของพิกัด	110
4.94 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับที่พันขดลวดใหม่ ที่โหลด 50% ของพิกัด	111
4.95 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับที่พันขดลวดใหม่ ที่โหลด 75% ของพิกัด	112

## สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.96 กราฟค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้าจากผู้ผลิต	113
4.97 กราฟค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า ที่พื้นที่ทดลองใหม่	114



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	2
3.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า	41
3.2 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า	41
3.3 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า	42
4.1 ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจากผู้ผลิตและมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่พันขดลวดใหม่	56
4.2 ผลการทดสอบ No-load test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า จากผู้ผลิต	58
4.3 ผลการทดสอบ Block-rotor test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า จากผู้ผลิต	59
4.4 ผลการทดสอบ V-I Method ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า จากผู้ผลิต	60
4.5 ผลการทดสอบ No-load test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่	63
4.6 ผลการทดสอบ Block-rotor test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่	64
4.7 ผลการทดสอบ V-I Method ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่พันขดลวดใหม่ขนาด 1 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่	65
4.8 ผลการทดสอบ No-load test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า จากผู้ผลิต	67
4.9 ผลการทดสอบ Block-rotor test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า จากผู้ผลิต	68
4.10 ผลการทดสอบ V-I Method ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า จากผู้ผลิต	69
4.11 ผลการทดสอบ No-load test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่	71
4.12 ผลการทดสอบ Block-rotor test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่	72
4.13 ผลการทดสอบ V-I Method ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่	73
4.14 ผลการทดสอบ No-load test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า จากผู้ผลิต	75
4.15 ผลการทดสอบ Block-rotor test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า จากผู้ผลิต	76
4.16 ผลการทดสอบ V-I Method ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า จากผู้ผลิต	77
4.17 ผลการทดสอบ No-load test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่	79

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.18 ผลการทดสอบ Block-rotor test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า ที่พื่นขดลวดใหม่	80
4.19 ผลการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า จากผู้ผลิต ที่แรงดัน 220 V 50 Hz	85
4.20 ผลการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า ที่พื่นขดลวดใหม่ ที่แรงดัน 220 V 100 Hz	87
4.21 ผลการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า จากผู้ผลิต ที่แรงดัน 220 V 50 Hz	90
4.22 ผลการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า ที่พื่นขดลวดใหม่ ที่แรงดัน 220 V 100 Hz	93
4.23 ผลการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า จากผู้ผลิต ที่แรงดัน 220 V 50 Hz	95
4.24 ผลการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า ที่พื่นขดลวดใหม่ ที่แรงดัน 220 V 100 Hz	97
4.25 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ที่โหลด 25% ของพิกัด	99
4.26 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ที่โหลด 50% ของพิกัด	100
4.27 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ที่โหลด 75% ของพิกัด	101
4.28 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ที่โหลด 100% ของพิกัด	102
4.29 ค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า	103
4.30 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ที่โหลด 25% ของพิกัด	104
4.31 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ที่โหลด 50% ของพิกัด	105
4.32 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ที่โหลด 75% ของพิกัด	106
4.33 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ที่โหลด 100% ของพิกัด	107
4.34 ค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า	108
4.35 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ที่โหลด 25% ของพิกัด	110
4.36 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ที่โหลด 50% ของพิกัด	111
4.37 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ที่โหลด 75% ของพิกัด	112
4.38 ค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า	113

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมหรือสิ่งอำนวยความสะดวกรอบตัวเรา ได้นำเครื่องจักรกลไฟฟ้ามาใช้ขับเคลื่อนเป็นต้นกำลังทางกลแทนการใช้แรงงานมนุษย์และสัตว์มากขึ้น โดยเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง และเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายคือเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ เพราะมีข้อดีกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง ทั้งในเรื่องของราคาที่ถูกกว่าเมื่อขนาดพิกัดกำลังเท่ากัน มีความแข็งแรงทนทาน มีการบำรุงรักษาน้อย หาซื้อได้ง่าย และมีประสิทธิภาพสูงกว่า

เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับแบ่งออกตามลักษณะการทำงานได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ เครื่องจักรกลซิงโครนัส (Synchronous machines) และเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ (Induction machines) เพื่อให้เข้าใจหลักการการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ โดยเฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล และกำลังทางกลที่ได้จะถูกนำไปใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรมต่อไป จึงจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น วงจรแม่เหล็ก ความต้านทานแม่เหล็ก แรงเคลื่อนแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหมุนภายในช่องอากาศ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก ความเหนี่ยวนำร่วม ฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้ว และวงจรสมมูลแบบประมาณ

โครงการนี้จึงทำการศึกษา พัฒนา และทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก (Squirrel-cage rotor) โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ (Efficiency) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจากผู้ผลิตกับมอเตอร์ที่ได้รับการพัฒนาใหม่ ซึ่งเป็นต้นแบบของการพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสให้ดีขึ้นเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ โดยเฉพาะรถยนต์ไฟฟ้า ที่ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นตัวขับเคลื่อน ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่กำลังได้รับความสนใจ และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้มีความรู้และความเข้าใจในหลักการการทำงานของสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และสามารถอธิบายคุณลักษณะของสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้น
2. เพื่อให้มีความรู้และความเข้าใจในการพัฒนาตัวอาร์มาเจอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
3. เพื่อให้มีความรู้และความเข้าใจในการบำรุงรักษาและแก้ไขปัญหาอันเนื่องมาจากการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ศึกษาทฤษฎีเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่เกี่ยวข้องได้แก่ วงจรแม่เหล็ก แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ความเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กหมุน และวงจรสมมูลแบบประมาณ เป็นต้น
2. หาโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อความเข้าใจในมอเตอร์ต้นแบบที่จะทำการศึกษาได้แก่ การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ และวัดขนาด (dimension) ที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลอง
3. ศึกษาพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนไปเนื่องจากขนาดขดลวดอาร์มาเจอร์ที่เปลี่ยนไปเพื่อเปรียบเทียบผลคุณลักษณะ สมรรถนะและประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และเริ่มวางแผนทำการทดลอง
2. ทดสอบหาค่าสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
3. ทดสอบหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลแบบประมาณ
4. ทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
5. ทำการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสใหม่
6. ทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสตัวที่พันขดลวดใหม่ และทำการเปรียบเทียบ สมรรถนะและประสิทธิภาพกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจากผู้ผลิต

### 1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินการงาน	ปีการศึกษา 2560									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย	พ.ค.
ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	←—————→ ←-----→									
ทดสอบหาวงจรสมมูลแบบประมาณ สมรรถนะ และประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า จากผู้ผลิต	←————→ ←-----→									
ทำการออกแบบและพันขดลวดอาร์มาเจอร์ใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า	←————→ ←-----→									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. ทำให้เข้าใจโครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
2. ทำให้เข้าใจวิธีการปรับปรุงและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
3. เป็นต้นแบบของการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

เพื่อนำไปใช้กับโรงงานอุตสาหกรรม



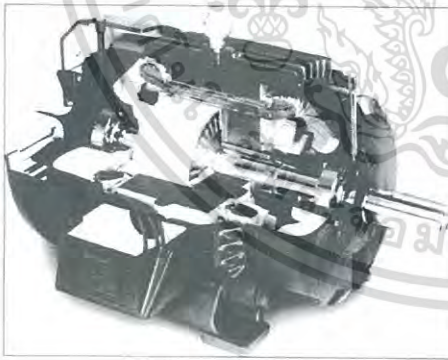
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

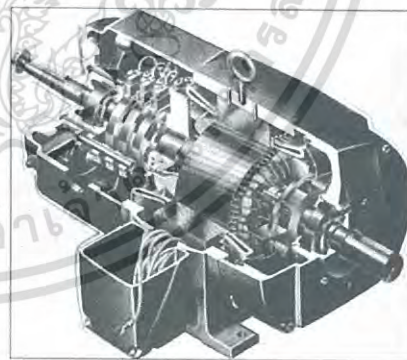
การพัฒนาและทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ เกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เช่น วงจรแม่เหล็ก, แรงเคลื่อนแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหมุนภายในช่องอากาศ, แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, ค่าความเหนี่ยวนำร่วม, ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดในย่านเชิงเส้นและย่านการอิ่มตัวของแกนเหล็ก, วงจรสมมูลแบบประมาณ เพื่อให้เข้าใจหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ตลอดจนศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเรียนรู้ปัญหาที่เกิดขึ้นของผู้ที่วิจัยก่อนหน้านี้

### 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor Construction)

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยอาศัยหลักการเกิดของสนามแม่เหล็กหมุน มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะมีโครงสร้างสำคัญสองส่วน คือ สเตเตอร์ และโรเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าโครงสร้างของโรเตอร์จะมีลักษณะเป็นแท่งตัวนำวางเรียงอยู่ในแนวตามความยาวของโรเตอร์ และมีการเชื่อมต่อถึงกันทางไฟฟ้าโดยการลัดวงจรที่ปลายทั้งสองข้างดังรูปที่ 2.2 โดยโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบ่งเป็นสองชนิดคือ โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel-cage rotor) และโรเตอร์แบบพันขดลวด (Wound rotor) ซึ่งโรเตอร์แบบพันขดลวดนี้จะสามารถเชื่อมต่อกับวงจรไฟฟ้าภายนอกได้โดยผ่านวงแหวนสลิป (Slip rings) และแปรงถ่าน (Carbon brush)

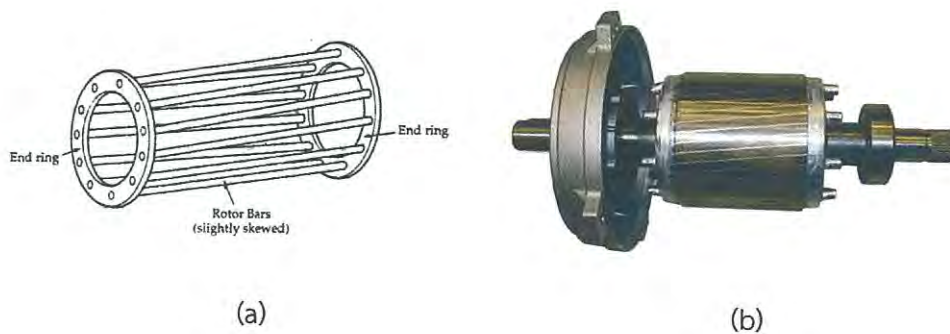


(a)



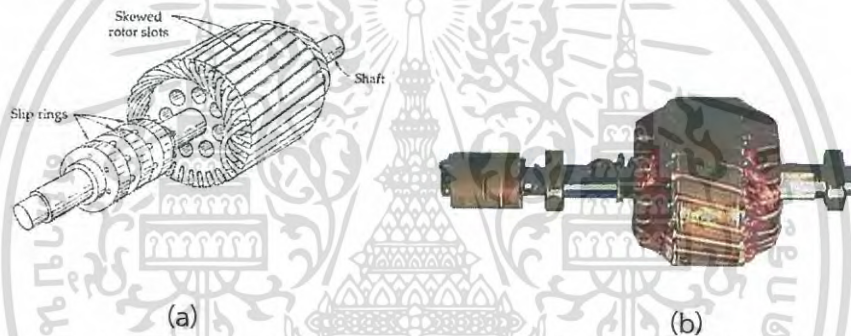
(b)

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (a) แบบกรงกระรอก (b) แบบพันขดลวด



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของโรเตอร์แบบกรงกระรอก (a) Drawing of Squirrel-cage rotor  
(b) Squirrel-cage rotor

(ที่มา: <http://circuitglobe.com/construction-of-induction-motor.html> และ  
<http://www.machinedesign.com/metals/what-s-difference-between-aluminum-and-copper-electrical-applications>)



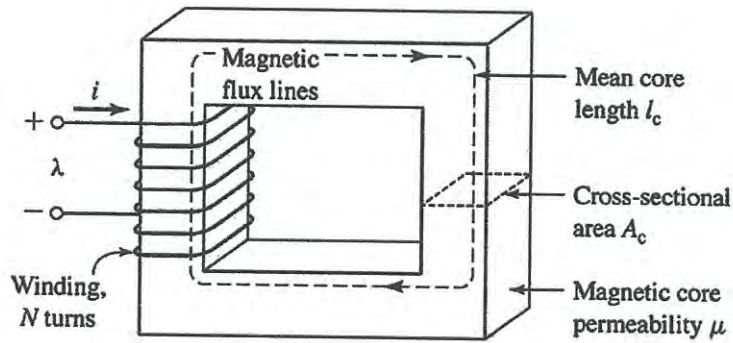
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของโรเตอร์แบบพันขดลวด (a) Drawing of Wound rotor (b) Wound rotor

(ที่มา: <http://circuitglobe.com/construction-of-induction-motor.html> และ  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Engine\\_rotor.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Engine_rotor.png))

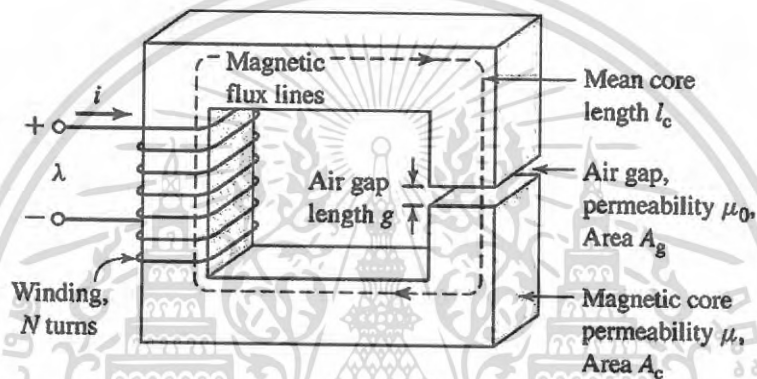
## 2.2 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit)

ในการศึกษาเครื่องจักรกลไฟฟ้า วงจรแม่เหล็กนับเป็นส่วนประกอบสำคัญเพราะสำหรับการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าต้องอาศัยวงจรแม่เหล็กเป็นทางผ่านในการเปลี่ยนรูปพลังงาน เพื่อให้สามารถสร้างและควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ตามต้องการ และถูกต้องตามหลักการพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งในวงจรแม่เหล็กจะมีค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก (Reluctance) เช่นเดียวกับค่าความต้านทาน (Resistance) ในวงจรไฟฟ้า ซึ่งค่าเหล่านี้จะทำให้เกิดความสูญเสียทางด้านพลังงานในแกนเหล็ก ดังนั้นเป้าหมายของวงจรแม่เหล็กที่ดีคือมีค่าความต้านทานทางแม่เหล็กต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้และค่าความสูญเสียทางด้านพลังงานในแกนเหล็กหรือวงจรแม่เหล็กควรมีค่าน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ขดลวดพันรอบแกนเหล็กแบบเป็นวงรอบปิด  
(ที่มา: <http://slideplayer.com/slide/10933678/>)



รูปที่ 2.5 ขดลวดพันรอบแกนเหล็กแบบมีช่องอากาศบางส่วน  
(ที่มา: <http://slideplayer.com/slide/10933678/>)

### 2.3 สารแม่เหล็ก (Magnetic Material)

ปัจจัยที่ต้องนำมาใช้ในการสร้างวงจรแม่เหล็กคือสารแม่เหล็ก และสิ่งที่สามารถจำแนกสารแม่เหล็กออกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ คือค่า  $\mu$  ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) ของสารแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์ต่อแอมแปร์-เมตร (Wb/A-m) หรือเฮนรีต่อเมตร (H/m) หาได้จากสมการที่ 2.1

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.1)$$

เมื่อ	$\mu$ คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability)	หน่วย Wb/A-m
	$\mu_0$ คือ ความซึมซาบทางแม่เหล็กของอากาศมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$	หน่วย Wb/A-m
	$\mu_r$ คือ ความซึมซาบทางแม่เหล็กสัมพัทธ์	ไม่มีหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสารแม่เหล็กสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ โดยการพิจารณาจากพฤติกรรมของค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์  $\mu_r$  ของสารนั้น ๆ แบ่งได้เป็น 4 ประเภทดังนี้

1. สาร Diamagnetic เป็นสารที่มีค่า  $\mu_r$  น้อยกว่า 1 เช่น น้ำ บิสมัท ทองแดง เงิน เป็นต้น สารประเภทนี้จะเกิดค่าสนามแม่เหล็กได้น้อย

2. สาร Nonmagnetic เป็นสารที่มีค่า  $\mu_r$  เท่ากับ 1 ได้แก่ Vacuum สารประเภทนี้จะกำหนดให้มีค่า  $\mu$  ประมาณเท่ากับค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของอากาศ ( $\mu_0$ )

3. สาร Paramagnetic เป็นสารที่มีค่า  $\mu_r$  มากกว่า 1 เล็กน้อย เช่น อากาศ อะลูมิเนียม แมงกานีส เป็นต้น สารประเภทนี้จะกำหนดให้มีค่า  $\mu$  ประมาณเท่ากับค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของอากาศ ( $\mu_0$ )

4. สาร Ferromagnetic เป็นสารที่มีค่า  $\mu_r$  ประมาณมากกว่า  $1 (10^2-10^6)$  เช่น เหล็ก นิกเกิล ซิลิกอน เป็นต้น สารประเภทนี้จะเกิดค่าสนามแม่เหล็กได้มาก แต่อย่างไรก็ตามพฤติกรรมค่า  $\mu_r$  จะไม่คงที่

อย่างไรก็ตามค่า  $\mu_r$  จะไม่คงที่ เมื่อความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity :  $H$ ) เปลี่ยนแปลงไป และยังสามารถแบ่งสารแม่เหล็กได้อีก 2 ประเภทคือ

1. Ferromagnetic เป็นสารเฟอร์ไรท์ที่มีส่วนประกอบเป็น Iron oxide เช่น Barium ferrite เป็นต้น มีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูง เหมาะสำหรับการใช้งานที่ย่านความถี่สูง

2. Amorphous เป็นสารแม่เหล็กชนิดใหม่ที่มีโครงสร้างแตกต่างจากประเภทอื่น ๆ เป็นสารสังเคราะห์ ไม่มีในธรรมชาติ สามารถให้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูง เหมาะสำหรับการใช้งานในย่านความถี่ต่าง ๆ ได้ดี

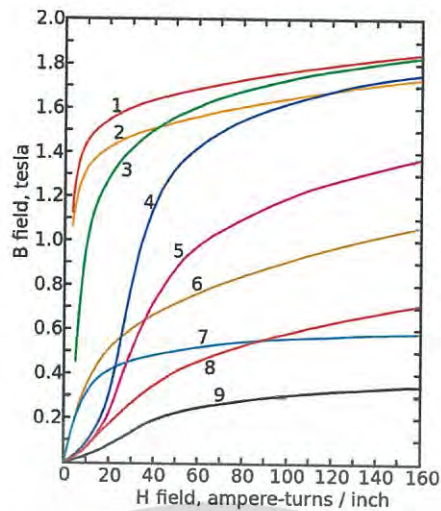
ดังนั้นความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในสารแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของค่าความซึมซาบแม่เหล็กและค่าความเข้มสนามแม่เหล็กดังสมการที่ 2.2

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\mathbf{B}$  คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก หน่วย T (Tesla, Wb/m<sup>2</sup>)

$\mathbf{H}$  คือ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก หน่วย A-t/m

โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density :  $B$ ) กับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity :  $H$ ) ที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็กเรียกว่า เส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก ซึ่งแสดงถึงการอิมิตัวของวัสดุตัวนำแม่เหล็กและพฤติกรรม การเกิดสนามแม่เหล็กของสารแม่เหล็กประเภทต่าง ๆ กราฟแสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของค่า  $B$  และ  $H$  ของสารแม่เหล็ก (1. Sheet steel, 2. Silicon steel, 3. Cast steel, 4. Tungsten steel, 5. Magnet steel, 6. Cast iron, 7. Nickel, 8. Cobalt, 9. Magnetite)

(ที่มา: [https://en.wikipedia.org/wiki/Saturation\\_\(magnetic\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Saturation_(magnetic)))

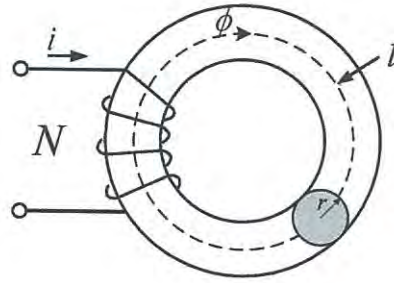
จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าเมื่อกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น จนถึงจุดหนึ่งที่เมื่อเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กแต่ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกลับเพิ่มขึ้นน้อยมากหรือไม่เพิ่มขึ้น เรียกว่า ย่านแกนเหล็กอิ่มตัว (Saturated Region)

#### 2.4 ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance)

เมื่อป้อนแรงเคลื่อนทางแม่เหล็ก (Magneto-motive force :  $\text{mmf}$  หรือ  $Ni$ ) ให้กับวงจรแม่เหล็กจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux :  $\phi$ ) ในแกนเหล็กที่ใช้เป็นวงจรแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.7 เป็นแกนทอรอยด์ (Toroid) มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ  $A$  ซึ่งเมื่อพันขดลวดกระตุ้นสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กกระจายไปเป็นวงตามแนวแกน ซึ่งความต่อเนื่องของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กจะทำให้สนามแม่เหล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอโดยสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $Ni$  กับ  $\phi$  จาก Ampere's law จะได้ว่า

$$Ni = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = Hl \quad (2.3)$$

ในกรณีที่มีการกระจายสนามแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กอย่างสม่ำเสมอจะทำให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแกนเหล็กคงที่ตลอดวงจรสามารถคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ( $H$ ) ที่ระยะทางเฉลี่ยตามแนวของวงจรแม่เหล็ก ( $l$ )



รูปที่ 2.7 ขดลวดพันรอบแกนเหล็กแบบวงแหวนทอรอยด์

ในกรณีที่ความสัมพันธ์ระหว่าง  $B$  กับ  $H$  เป็นเชิงเส้น

$$Ni = \frac{B}{\mu} l = \frac{\phi}{\mu A} l \quad (2.4)$$

$$\phi = BA = \frac{\mu Ni}{l} A \quad (2.5)$$

จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Ni$  กับ  $\phi$  เป็นเชิงเส้น

$$Ni = \phi \mathcal{R} \quad (2.6)$$

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (2.7)$$

เมื่อ	$Ni$ คือ Magneto-motive force (mmf)	หน่วย A-t
	$\phi$ คือ Magnetic flux	หน่วย Wb
	$\mathcal{R}$ คือ Reluctance of magnetic circuit	หน่วย A-t/Wb
	$l$ คือ Average length	หน่วย m
	$A$ คือ Average area	หน่วย $m^2$

## 2.5 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance)

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปในขดลวดที่มีจำนวนรอบ  $N$  รอบ จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องขดลวดทั้งหมด  $N\phi(t)$  จาก Faraday's law สามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ (Induced voltage) ขึ้นที่ขดลวดตามสมการที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e(t) = v(t) = N \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.8)$$

ซึ่งจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่จำนวน  $N$  รอบ โดย  $N\phi(t)$  นั้นขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดนั้นคือ

$$\lambda = N\phi = Li \quad (2.9)$$

ดังนั้น

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\phi}{i} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $L$  คือ ความเหนี่ยวนำ (Inductance) หน่วย H  
 $\lambda$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้อง (Flux Linkage) หน่วย Wb-t

ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขดลวดจะเป็นค่าของจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องต่อหนึ่งหน่วยกระแสตรงสมการที่ 2.11

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\phi}{i} = \frac{NBA}{i} = \frac{NA\mu H}{i} = NA\mu \left(\frac{H}{i}\right) = NA\mu \left(\frac{N}{l}\right) = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (2.11)$$

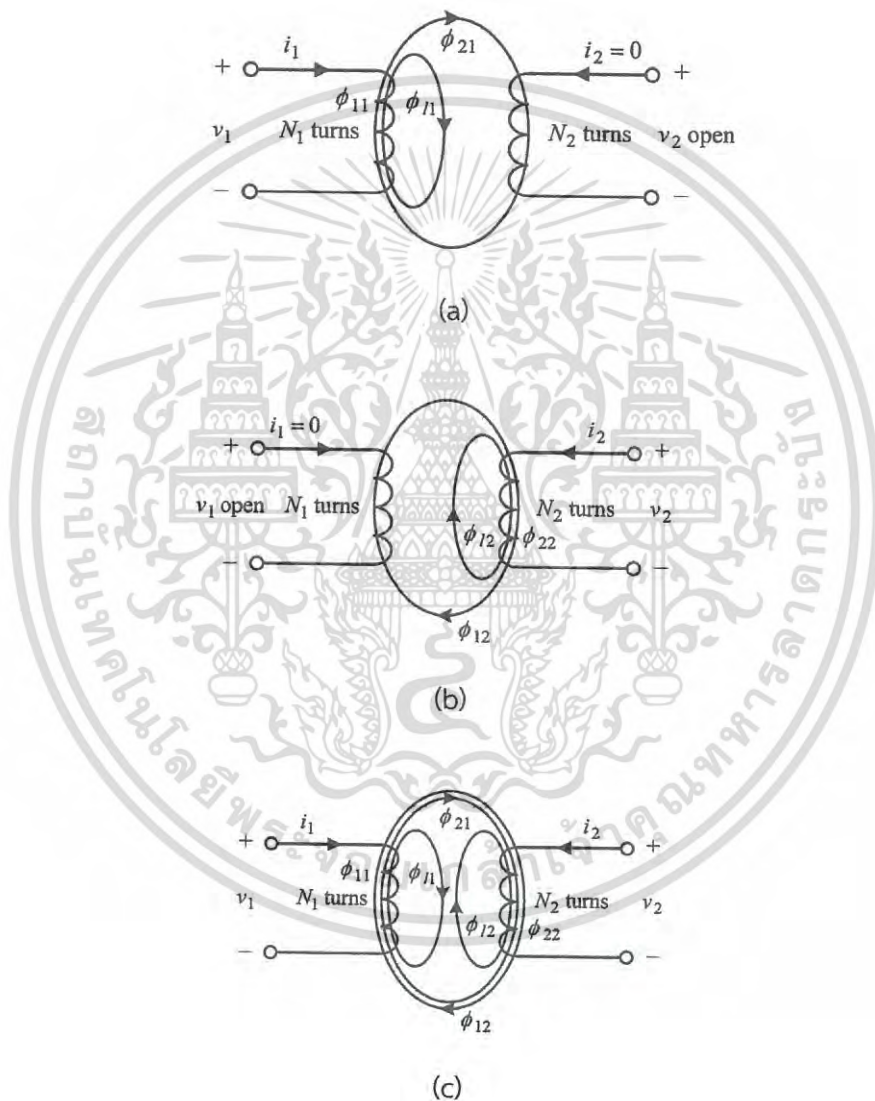
เพราะฉะนั้น ถ้าเลือกแกนเหล็กที่ใช้สาร Ferromagnetic ที่มีค่า  $\mu$ , สูงมาก ๆ จะทำให้ค่า  $\mathfrak{R}_g \gg \mathfrak{R}_c$  ( $\mathfrak{R}_c = 0$ ) จะได้สมการหาค่าความเหนี่ยวนำใหม่คือ

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_g} = \frac{N^2 \mu_0 A_g}{l_g} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.12 จะมีค่าคงที่ โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่ากระแสแต่ค่า  $L$  จะมีค่าแปรผันตรงกับค่า  $N^2$  และแปรผกผันกับค่า  $l_g$  ดังนั้นเราจึงสามารถปรับค่า  $L$  ได้ตามความต้องการ เช่นถ้าต้องการค่า  $L$  ที่เปลี่ยนแปลงอย่างมากก็สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่าจำนวนรอบของขดลวด  $N$  แต่ถ้าต้องการค่า  $L$  ที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนระยะช่องว่างอากาศ  $l_g$  ดังรูปที่ 2.5

## 2.6 ความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance)

ในกรณีที่ขดลวดแม่เหล็กมีขดลวดมากกว่าหนึ่งขด จะทำให้ค่าของจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่มาเกี่ยวค้ำล้อมขดลวดทั้งหมด (Total flux linkage) ประกอบด้วยเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำล้อมตัวเอง (Self-flux linkage) และเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำล้อมรอบข้าง (Mutual flux linkage) จึงสามารถแบ่งค่าความเหนี่ยวนำในขดลวดออกได้เป็น 2 แบบ เพื่อใช้ในการหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำล้อม คือ ค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self-inductance) และค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual-inductance) รูปที่ 2.8 แสดงแนวทางของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำล้อมขดลวด 2 ขด



รูปที่ 2.8 การเกี่ยวค้ำล้อมของเส้นแรงแม่เหล็ก (a) เส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวด 1 เกี่ยวค้ำล้อมขดลวด 2

(b) เส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวด 2 เกี่ยวค้ำล้อมขดลวด 1

(c) เส้นแรงแม่เหล็กจากทั้งสองขดลวดเกี่ยวค้ำล้อมซึ่งกันและกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถหาค่า  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  ได้ดังสมการที่ 2.13 และ 2.14

$$\lambda_1 = \lambda_{11} + \lambda_{12} \quad (2.13)$$

$$\lambda_2 = \lambda_{21} + \lambda_{22} \quad (2.14)$$

เมื่อ	$\lambda_1$ : Total flux linkage of coil 1	หน่วย Wb-t
	$\lambda_2$ : Total flux linkage of coil 2	หน่วย Wb-t
	$\lambda_{11}$ : ฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวกับขดลวดที่ 1 ซึ่งเกิดจากกระแส $i_1$	หน่วย Wb-t
	$\lambda_{12}$ : ฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวกับขดลวดที่ 1 ซึ่งเกิดจากกระแส $i_2$	หน่วย Wb-t
	$\lambda_{21}$ : ฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวกับขดลวดที่ 1 ซึ่งเกิดจากกระแส $i_1$	หน่วย Wb-t
	$\lambda_{22}$ : ฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวกับขดลวดที่ 1 ซึ่งเกิดจากกระแส $i_2$	หน่วย Wb-t

เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับ  $\lambda_{12}$  ซึ่งขดลวด 1 ถูกกระทำจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลในขดลวด 2 และเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi_{22}$  ไม่จำเป็นต้องคล้องขดลวด 1 ทั้งหมด จึงกำหนดสัมประสิทธิ์ของการเกี่ยวค้ำ  $K$  เพื่อกำหนดเป็นอัตราส่วนของการเกี่ยวค้ำระหว่างขดลวด 1 และ 2 ออกมา

$$\lambda_1 = N_1\phi_{11} + N_1K_{12}\phi_{22} \quad (2.15)$$

$$\lambda_2 = N_2K_{21}\phi_{11} + N_2\phi_{22} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $\phi_{11} = \frac{N_1 i_1}{\mathcal{R}_1}$  และ  $\phi_{22} = \frac{N_2 i_2}{\mathcal{R}_2}$

แทนค่า  $\phi_{11}$  และ  $\phi_{22}$  ลงในสมการที่ 2.15 และ 2.16 จะได้

$$\lambda_1 = \frac{N_1^2 i_1}{\mathcal{R}_1} + K_{12} \frac{N_1 N_2 i_2}{\mathcal{R}_2} \quad (2.17)$$

$$\lambda_2 = K_{21} \frac{N_1 N_2 i_1}{\mathcal{R}_1} + \frac{N_2^2 i_2}{\mathcal{R}_2} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เมื่อกำหนดให้ } L_{11} = \frac{N_1^2}{\mathfrak{R}_1}, \quad L_{22} = \frac{N_2^2}{\mathfrak{R}_2}, \quad L_{12} = K_{12} \frac{N_1 N_2}{\mathfrak{R}_2}, \quad L_{21} = K_{21} \frac{N_1 N_2}{\mathfrak{R}_1},$$

$$\lambda_1 = L_{11}i_1 + L_{12}i_2 \quad \text{และ} \quad \lambda_2 = L_{21}i_1 + L_{22}i_2$$

เมื่อ	$L_{11}$ : Self-inductance ของขดลวด 1	หน่วย H
	$L_{22}$ : Self-inductance ของขดลวด 2	หน่วย H
	$L_{12}$ : Mutual inductance ของขดลวด 1 ถูกกระทำโดยขดลวดที่ 2	หน่วย H
	$L_{21}$ : Mutual inductance ของขดลวด 2 ถูกกระทำโดยขดลวดที่ 1	หน่วย H
	$K_{12}$ : Coupling coefficient ของขดลวด 1 ถูกกระทำโดยขดลวดที่ 2	
	$K_{21}$ : Coupling coefficient ของขดลวด 2 ถูกกระทำโดยขดลวดที่ 1	

โดย  $K$  จะอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ( $0 \leq K \leq 1$ ) และมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อสนามแม่เหล็กจากขดลวดทั้งสองไม่เกี่ยวคล้องซึ่งกันและกัน เท่ากับ 1 เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดหนึ่งเกี่ยวคล้องอีกขดลวดหนึ่งทั้งหมดและเท่ากันทุกวงรอบ

ในกรณีที่ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์มีค่าสูงมากจนเข้าใกล้อนันต์ ( $\mu_r \rightarrow \infty$ ) ค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็กจะน้อยมาก เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแส  $i_1$  และ  $i_2$  จะอยู่ภายในแกนเหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กรั่ว

## 2.7 ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed)

เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับจะทำงานโดยอาศัยสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับจะเรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed :  $n_s$ )

ในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ มี  $P$  ขั้วแม่เหล็ก จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างมุมทางกล ( $\theta_m$ ) กับมุมทางไฟฟ้า ( $\theta_e$ ) หน่วย rad

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad (2.19)$$

ถ้ากำหนดให้ค่า  $\theta_e$  และ  $\theta_m$  ในสมการที่ 2.19 เป็นค่าของมุมที่เกิดจากการหมุนตัวโรเตอร์ในเวลา 1 วินาที และสามารถเขียนเป็นความเร็วเชิงมุมซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมทางกลและความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าหน่วย rad/s ได้

$$\omega_e = \frac{P}{2} \omega_m \quad (2.20)$$

และถ้านำสมการที่ 2.20 มาหารด้วย  $2\pi$  จะสามารถเขียนเป็นความถี่ของไฟฟ้า ( $f_e$ ) และความถี่เชิงกล ( $f_m$ ) หน่วย Hz หรือ รอบ/วินาที

$$f_e = \frac{P}{2} f_m \quad (2.21)$$

และถ้านำสมการที่ 2.21 มาทำการแปลงหน่วยความถี่ให้เป็นหน่วย รอบ/นาที จะได้สมการที่ 2.22

$$f_e = \frac{P}{2} \left( \frac{n_s}{60} \right) \quad (2.22)$$

จะได้สมการของความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนหรือความเร็วซิงโครนัส

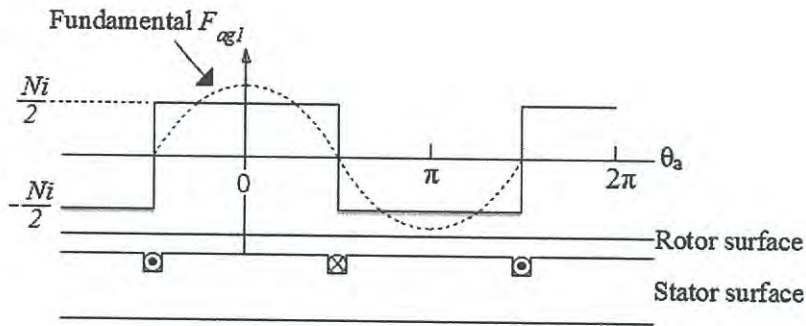
$$n_s = \frac{120 f}{P} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $n_s$  คือ ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) หน่วย rpm  
 $f$  คือ ความถี่ของไฟฟ้าที่ป้อนขดลวดอาร์มาเจอร์ หน่วย Hz  
 $P$  คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

## 2.8 สนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetic Fields)

ในการศึกษาทฤษฎีการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน จำเป็นที่จะต้องศึกษาแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ตกคร่อมที่ช่องอากาศ เมื่อทำการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีตัวโรเตอร์เป็นลักษณะทรงกระบอก ซึ่งทำให้ความกว้างของช่องอากาศคงที่ เมื่อเรากล่าวว่าค่า Relative permeability ของแกนเหล็กที่ใช้ทำแกนสเตเตอร์และโรเตอร์มีค่าสูงมาก ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ตกคร่อมแม่เหล็กถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอากาศ โดยแรงเคลื่อนทั้งหมดที่เกิดจะถือว่าตกคร่อมที่ช่องอากาศทั้งหมด

ในการพันขดลวดแบบเป็นชุด (Concentric coil) ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่กระจายโดยรอบของช่องอากาศจะมีขนาดคงที่ตลอดช่วงของขั้วแม่เหล็กค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จึงเป็นในรูปแบบ Square wave



รูปที่ 2.9 การกระจายของแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศ

จากการกระจายของแรงเคลื่อนแม่เหล็กโดยใช้ Fourier series ของสัญญาณแบบ Square wave ที่มีขนาดเท่ากับ  $K$  จะทำให้สามารถแยกสัญญาณออกเป็นสัญญาณมูลฐาน (Fundamental) กับฮาร์โมนิก (Harmonic) ได้ดังนี้

$$F(\theta) = \frac{4}{\pi} K \left[ \cos\theta - \frac{1}{3} \cos 3\theta + \frac{1}{5} \cos 5\theta - \frac{1}{7} \cos 7\theta + \frac{1}{9} \cos 9\theta - \dots \right] \quad (2.24)$$

ในกรณีที่ขดลวดสเตเตอร์มี  $P$  ขั้วแม่เหล็กขดลวดที่พื้นแบบกระจายจะทำให้เกิดค่า Winding factor เท่ากับ  $K_w$  และมีจำนวนรอบของแต่ละเฟสเท่ากับ  $N_{ph}$  และมีกระแสป้อนเข้าขดลวด เท่ากับ  $i(t)$

$$K = \frac{N_{ph} i(t) K_w}{P} \quad (2.25)$$

เมื่อกำหนดให้แกนของขดลวดสเตเตอร์อยู่ที่  $0^\circ$  และป้อนกระแส  $i(t)$  ที่ขดลวดสเตเตอร์โดยมีสมการของกระแสดังนี้

$$i(t) = I_m \cos(\omega t) \quad (2.26)$$

โดยจะพิจารณาเฉพาะแรงเคลื่อนทางแม่เหล็กมูลฐานซึ่งจะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็ก  $F_a(\theta, t)$  ที่มุม  $\theta$  และเวลา  $t$  ใดๆ จะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กมูลฐาน

$$F(\theta, t) = F_{\max} \cos(\theta) \cos(\omega t) \quad (2.27)$$

$$F(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t) \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่า

$$F_{\max} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_{ph} I_m}{P} \quad (2.29)$$

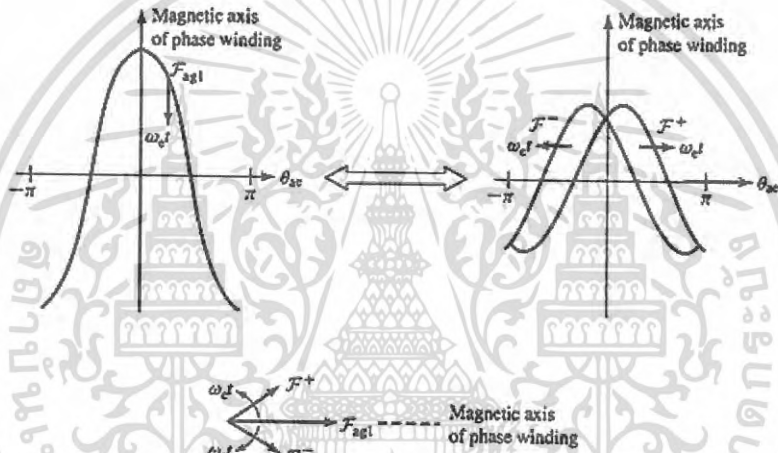
เมื่อ  $\frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t)$  เทอมแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เคลื่อนตัวทิศบวก

$\frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t)$  เทอมแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เคลื่อนตัวทิศลบ

$F(\theta, t)$  คือ ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์ที่มุม  $\theta$  และเวลา  $t$  ใด ๆ

$I_m$  คือ ค่าสูงสุดของกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก

$\theta$  คือ ตำแหน่งมุมใด ๆ ในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับโดยมีแกนของเฟส a เป็นแกนอ้างอิง

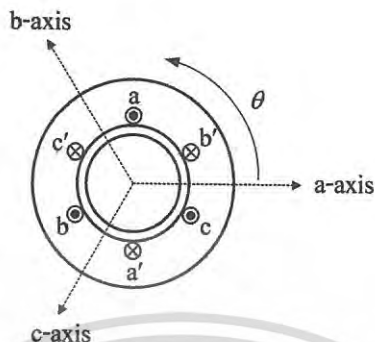


รูปที่ 2.10 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เป็น Traveling wave

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ จะมีทิศทางอยู่ในแนวแกนของขดลวด โดยขนาดและทิศทางจะสลับตามค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ป้อนเข้า ซึ่งจะทำให้เกิดทิศทางของแรงเคลื่อนแม่เหล็กเป็นสองเทอม คือเทอมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เคลื่อนเคลื่อนตัวในทิศทางด้านบวก (Traveling of mmf wave in positive direction) และเทอมแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เคลื่อนเคลื่อนตัวในทิศทางด้านลบ (Traveling of mmf wave in negative direction) การที่สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ในทิศทางดังกล่าวจะทำให้เกิดการหักล้างกันของแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็ก ดังนั้นถ้าต้องการสนามแม่เหล็กที่หมุนในทิศทางเดียวจะต้องมีขดลวดที่สามารถจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับมากกว่าหนึ่งเฟส เพื่อมาทำหน้าที่หักล้างสนามแม่เหล็กในทิศที่ไม่ต้องการออก โดยปกติจะเป็นสามชุด วางทำมุมระหว่างกันให้เท่ากันและต้องป้อนด้วยกระแสสลับสามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟส  
อยู่ที่สเตเตอร์ โดยที่ขดลวดจะวางห่างกัน  $120^\circ$  ทางไฟฟ้าดังรูป ( $\theta_e = \frac{P}{2}\theta_m$ )



รูปที่ 2.11 ตำแหน่งการวางขดลวดสามเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับสองขั้วแม่เหล็ก

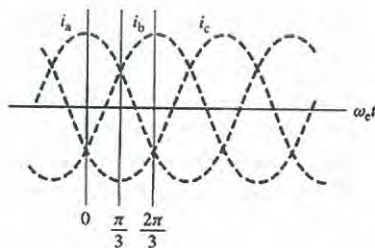
โดยกำหนดให้ แกนของขดลวดเฟส a อยู่ที่ตำแหน่ง  $0^\circ$   
แกนของขดลวดเฟส b อยู่ที่ตำแหน่ง  $120^\circ$   
แกนของขดลวดเฟส c อยู่ที่ตำแหน่ง  $240^\circ$

เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า  
กระแสสลับที่ตำแหน่งวางขดลวดแต่ละเฟส แกนของขดลวดจะห่างกันเท่ากับ  $120^\circ$  ทางไฟฟ้า  
โดยมีค่าของกระแสสามเฟสดังนี้

$$i_a = I_m \cos(\omega t) \quad (2.30)$$

$$i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2.31)$$

$$i_c = I_m \cos(\omega t - 240^\circ) \quad (2.32)$$



รูปที่ 2.12 สัญญาณกระแสไฟฟ้าสามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวดเฟส a เมื่อแกนของขดลวดอยู่ที่  $0^\circ$  ทางไฟฟ้า

$$F_a(\theta, t) = F_{\max} \cos(\theta) \cos(\omega t) \quad (2.33)$$

$$F_a(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t) \quad (2.34)$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวดเฟส b เมื่อแกนของขดลวดอยู่ที่  $120^\circ$  ทางไฟฟ้า

$$F_b(\theta, t) = F_{\max} \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2.35)$$

$$F_b(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t - 240^\circ) \quad (2.36)$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวดเฟส c และแกนของขดลวดอยู่ที่  $240^\circ$  ทางไฟฟ้า

$$F_c(\theta, t) = F_{\max} \cos(\theta - 240^\circ) \cos(\omega t - 240^\circ) \quad (2.37)$$

$$F_c(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t - 120^\circ) \quad (2.38)$$

เมื่อรวมทั้งสามเทอมเข้าด้วยกันจะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กกลิ้ง (Rotating mmf wave) ตามสมการที่ 2.39

$$F_{\text{total}} = F_a(\theta, t) + F_b(\theta, t) + F_c(\theta, t) \quad (2.39)$$

โดยที่เทอม

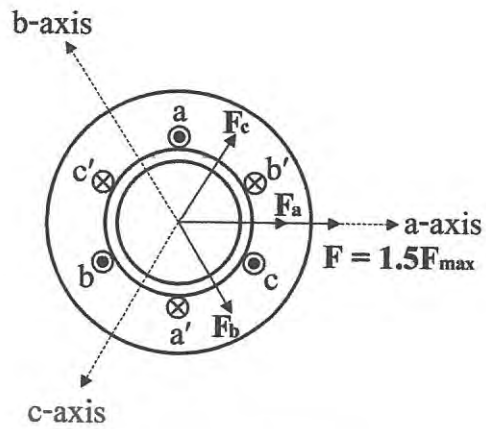
$$\frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t) + \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t - 240^\circ) + \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t - 120^\circ) = 0$$

ทำให้

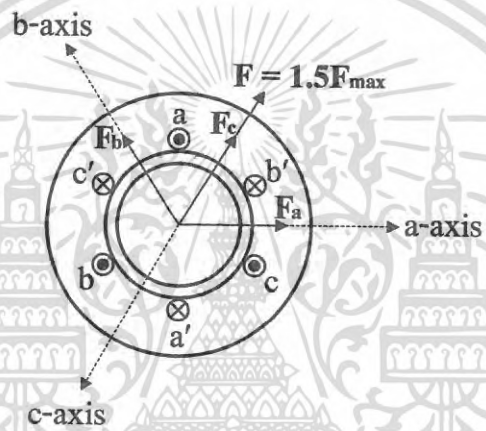
$$F_{\text{total}}(\theta, t) = \frac{3}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (2.40)$$

เมื่อ  $F_{\text{total}}(\theta, t)$  คือค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กกลิ้ง (Rotating mmf wave) ที่มีมุม  $\theta$  และเวลา  $t$  ใดๆ

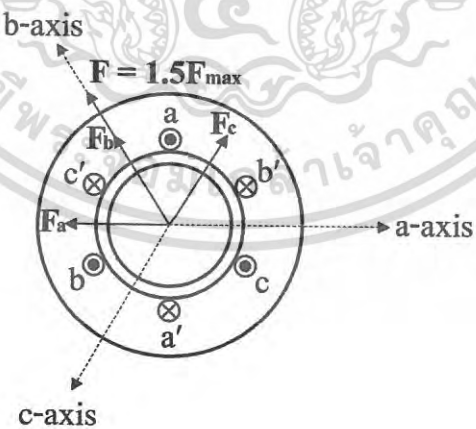
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)



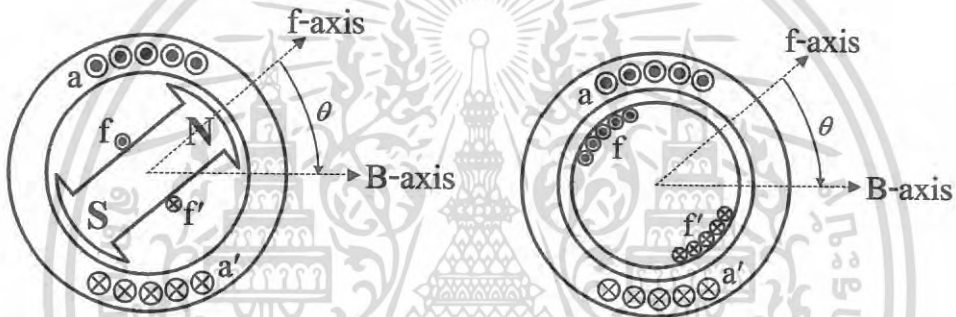
(c)

รูปที่ 2.13 สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส (ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสสลับสามเฟส

การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับนั้น เพื่อต้องการสร้างไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส โดยที่ลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าเป็นแบบรูปคลื่นไซน์ (sine wave) แต่ละเฟสห่างกันเท่ากับ  $120^\circ$  โดยที่การกระจายของค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับจะมีการเปลี่ยนแปลงตามแบบ sine function ขั้วแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการกระจายความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเป็นแบบไซน์ฟังก์ชัน สามารถสร้างได้ทั้งโครงสร้างโรเตอร์แบบขั้วยื่น (Salient pole) หรือตัวโรเตอร์แบบทรงกระบอก (Cylindrical rotor) โดยแบบขั้วยื่นจะใช้ความกว้างของช่องอากาศเป็นตัวกำหนดค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่มุมต่าง ๆ ของขั้วแม่เหล็ก ส่วนที่โรเตอร์แบบทรงกระบอกจะอาศัยการกระจายแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กที่มุมต่าง ๆ จากการพันกระจาย (Distribution winding)



รูปที่ 2.14 โรเตอร์แบบขั้วยื่นและโรเตอร์แบบทรงกระบอกของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ

การกระจายค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่มุม  $\theta$  ใด ๆ เมื่อเทียบจากจุดกึ่งกลางของขั้วแม่เหล็กเป็นแกนอ้างอิงที่  $\theta = 0^\circ$  จะได้ว่า

$$B(\theta) = B_m \cos\theta \quad (2.41)$$

ซึ่งสามารถหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว ( $\phi_p$ ) ในกรณีที่มี 2 ขั้วแม่เหล็ก จะต้องทำการหาปริพันธ์ (Integrate) ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตลอดหนึ่งขั้วแม่เหล็กตั้งแต่มุม  $-\frac{\pi}{2}$  ถึง  $\frac{\pi}{2}$

$$\phi_p = \int B(\theta) dA = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} B_m \cos(\theta) l r d\theta = 2B_m l r \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $l$  เป็นความยาวตามแนวแกนและ  $r$  เป็นรัศมีของช่องอากาศ และในกรณีที่มี  $P$  ขั้วแม่เหล็ก ถ้าโครงสร้างของเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวตามแนวแกนเท่ากัน พบว่าพื้นที่ของขั้วแม่เหล็กจะลดลงทำให้ค่าเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วลดลงตามจำนวนขั้ว

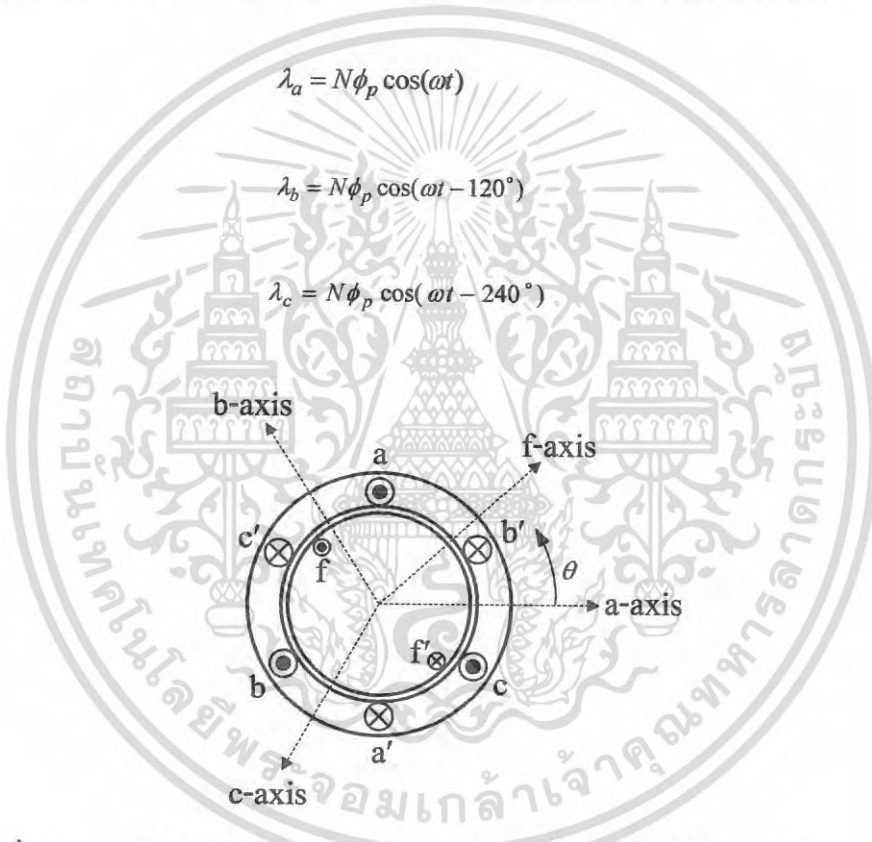
$$\phi_p = \frac{2}{P} 2B_m l r \quad (2.43)$$

เมื่อมีการพันขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสที่สเตเตอร์ โดยขดลวดแต่ละเฟสวางห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า ดังแสดงตามรูปที่ 2.15 จะได้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องของขดลวดแต่ละเฟสที่พันแบบเป็นชุดที่มีจำนวนรอบของขดลวดเท่ากับ  $N$  และความกว้างของขดลวดเท่ากับ 180 องศาไฟฟ้า

$$\lambda_a = N\phi_p \cos(\omega t) \quad (2.44)$$

$$\lambda_b = N\phi_p \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2.45)$$

$$\lambda_c = N\phi_p \cos(\omega t - 240^\circ) \quad (2.46)$$



รูปที่ 2.15 แสดงตำแหน่งวางขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดในกรณีที่มีเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องในขดลวด (Flux linkage:  $\lambda$ ) โดยที่  $\lambda = N\phi_p \cos(\omega t)$

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = N \frac{d(\phi_p \cos \omega t)}{dt} \quad (2.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e = N \left( \frac{d\phi_p}{dt} \right) \cos \omega t - \omega N \phi_p \sin \omega t \quad (2.48)$$

ผลของการหาอนุพันธ์ (Differentiate) จะได้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด ออกมาเป็น 2 เทอม ที่เกิดจาก  $\phi_p$  และ  $\cos(\omega t)$  โดยเรียกชื่อจากที่มาของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังนี้

เทอมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดสนามแม่เหล็ก  $N \left( \frac{d\phi_p}{dt} \right) \cos \omega t$  เรียกเทอมนี้ว่า Transformer voltage ถึงแม้ว่าขดลวดหรือขั้วแม่เหล็กจะไม่เคลื่อนที่แต่ถ้าขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว ( $\phi_p$ ) มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาจะเกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า และเทอมที่เกิดจากการเคลื่อนที่ตัดของสนามแม่เหล็ก  $\omega N \phi_p \sin \omega t$  เรียกเทอมนี้ว่า Speed voltage ไม่ว่าจะ เป็นขดลวดอาร์มาเจอร์เคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็กหรือขั้วแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดขดลวดจะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจาก  $\frac{d(\cos \omega t)}{dt}$

การกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับโดยเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตัดกับขดลวด ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า โดยให้ค่าเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว ( $\phi_p$ ) มีค่าคงที่ ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับจึงใช้เทอมที่เป็น Speed voltage เป็นตัวทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$$e = -\omega N \phi_p \sin \omega t \quad (2.49)$$

จากการพันขดลวดอาร์มาเจอร์แบบกระจายและมีความกว้างของขดลวดน้อยกว่า 180 องศาทางไฟฟ้า โดยมีจำนวนรอบของขดลวดในแต่ละเฟสเท่ากับ  $N_{ph}$  มีค่า Winding factor เท่ากับ  $K_w$  ซึ่งสามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดของเฟส a ดังนี้

$$e_a = \omega N_{ph} \phi_p K_w \sin \omega t = E_{a, \max} \sin \omega t \quad (2.50)$$

ซึ่งสามารถหาค่า rms (root mean square) ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดเฟส a ที่เกิดจากกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก ( $E_{af}$ ) ได้จาก

$$E_{af} = \frac{E_{a, \max}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_{ph} \phi_p K_w}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_{ph} \phi_p K_w}{\sqrt{2}} \quad (2.51)$$

หรือ

$$E_{af} = 4.44 f N_{ph} \phi_p K_w \quad (2.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ของ  $E_{af}$  กับ  $\phi_p$  และ  $f$  โดยที่แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ( $E_{af}$ ) สามารถหาค่าได้ดังสมการ 2.53

$$E_{af} = Kf\phi_p \quad (2.53)$$

เมื่อ  $K$  คือ ค่าคงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_{af}$  กับ  $\phi_p$  และ  $f$

ในทำเดียวกันสามารถหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด b และ c

$$e_b = \omega N_{ph} \phi_p K_w \sin(\omega t - 120^\circ) = E_{b,\max} \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (2.54)$$

$$e_c = \omega N_{ph} \phi_p K_w \sin(\omega t - 240^\circ) = E_{c,\max} \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (2.55)$$

## 2.10 การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ

การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส ต้องมีข้อมูลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้คือ จำนวนช่องสำหรับพันขดลวดหรือเรียกว่าจำนวนสลิต (Slot number :  $S$ ) จำนวนขั้วแม่เหล็ก ( $P$ ) จำนวนของเฟส (phase number :  $m$ ) จำนวนรอบของขดลวดในแต่ละขุด ( $N_c$ ) และ มุมการแผ่ขยายของเฟส (Spread of phase group :  $\sigma$ )

ในการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส ต้องคำนวณหาค่าความกว้างของสลิต (Slot width :  $\gamma$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\gamma = \frac{180^\circ P}{S} \quad (2.56)$$

ซึ่งสมมติให้เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับมีจำนวนสลิตต่อจำนวนเท่ากับ 48 และมีจำนวนขั้วเท่ากับ 4 Pole จะทำให้ค่าความกว้างของสลิต ( $\gamma$ ) มีค่าเท่ากับ (องศาไฟฟ้า)

$$\gamma = \frac{180^\circ P}{S} = \frac{180^\circ \times 4}{48} = 15^\circ \quad (2.57)$$

จำนวนสลิตต่อจำนวนขั้วแม่เหล็ก (Slot/pole :  $g$ ) สามารถหาได้จาก

$$g = \frac{S}{P} \quad (2.58)$$

จำนวนสล็อตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส (Slot/pole/phase :  $g'$ ) สามารถหาได้จาก

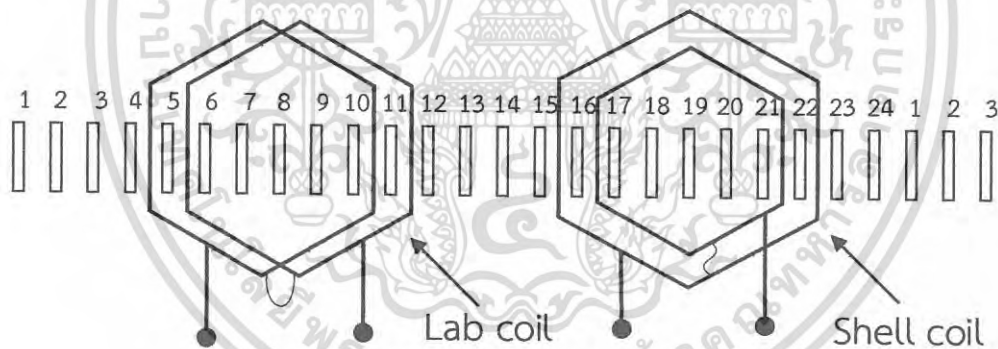
$$g' = \frac{S}{P \times m} \quad (2.59)$$

ซึ่งความกว้างของขั้วแม่เหล็ก (Pole pitch :  $Y_p$ ) ถ้าแสดงเป็นจำนวนสล็อตจะเท่ากับจำนวนสล็อตต่อจำนวนขั้วแม่เหล็ก ( $g$ ) ถ้าคิดเป็นมุมทางไฟฟ้าจะเท่ากับ 180 องศาไฟฟ้า และถ้าเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่มีจำนวนสล็อตเท่ากับ 48 และมีจำนวนขั้วแม่เหล็กเท่ากับ 4 ดังนั้นจะมี

$$g = \frac{S}{P} = \frac{48}{4} = 12 \quad \text{slots/pole}$$

$$g' = \frac{S}{P \times m} = \frac{48}{4 \times 3} = 4 \quad \text{slots/pole/phase}$$

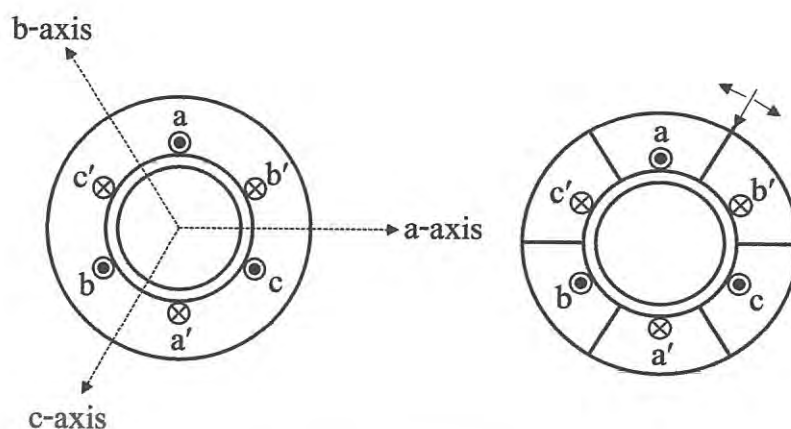
ขดลวดที่ใช้ในการพันอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับแบ่งเป็นแล็ปคอยล์ (Lap coil) และเชลล์คอยล์ (Shell coil) ดังแสดงตามรูปที่ 2.16 ในการนำเสนอนี้จะแสดงเฉพาะที่เป็นแบบแล็ปคอยล์เป็นหลัก



รูปที่ 2.16 การพันขดลวดแบบ Lap coil และ Shell coil

การแผ่ขยายของขดลวดในแต่ละเฟส (Spread of phase group :  $\sigma$ ) ของการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส จะสามารถพันได้ทั้งแบบที่เป็น 60 และ 120 องศาทางไฟฟ้า การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสส่วนใหญ่จะมีค่าการแผ่ขยายของขดลวดแต่ละเฟสเท่ากับ 60 องศาทางไฟฟ้า ดังนั้นจะนำเสนอเฉพาะ  $\sigma = 60^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

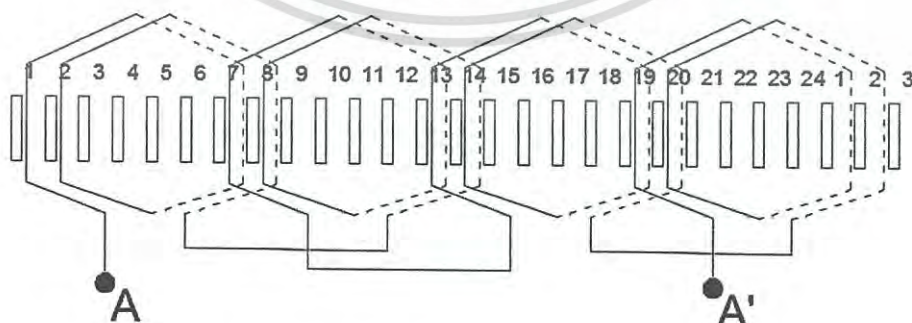


รูปที่ 2.17 ลักษณะการแผ่ขยายของขดลวดในแต่ละเฟสเท่ากับ 60 องศาไฟฟ้า

การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสยังมีลักษณะที่ใน 1 สล็อต จะมีด้านของขดลวดอยู่ 2 แบบ คือ แบบที่ใน 1 สล็อตมี 1 ด้านขดลวด (Coil side) ซึ่งจะเรียกการพันที่มี 1 ด้านขดลวดใน 1 สล็อตว่าเป็นแบบชั้นเดียว (Single layer) และแบบที่ใน 1 สล็อตมี 2 ด้านขดลวดซึ่งจะเรียกการพันที่มี 2 ด้านขดลวดใน 1 สล็อตว่าเป็นแบบสองชั้น (Double layer)

ในการพันขดลวดอาร์มาเจอร์แบบชั้นเดียวความกว้างของขดลวด (Coil pitch:  $Y_s$ ) จะเท่ากับ ความกว้างของขั้วแม่เหล็ก ( $Y_p$ ) ซึ่งจะมีเท่ากับ 180 องศาไฟฟ้า แต่ถ้าพันขดลวดอาร์มาเจอร์แบบสองชั้น ความกว้างของขดลวดอาจกับหรือน้อยกว่าความกว้างของขั้วแม่เหล็ก ( $Y_s \leq Y_p$ ) ซึ่งในการพันขดลวดที่มีความกว้างของขดลวดเท่ากับความกว้างของขั้วแม่เหล็ก ( $Y_s = Y_p$ ) จะเรียกการพันแบบนี้ว่า Full pitch winding และถ้าความกว้างของขดลวดน้อยกว่าความกว้างของขั้วแม่เหล็ก ( $Y_s < Y_p$ ) จะเรียกการพันแบบนี้ว่า Fractional pitch winding

#### 2.10.1 ขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดสามเฟสแบบพิชเต็ม (Full Pitch)



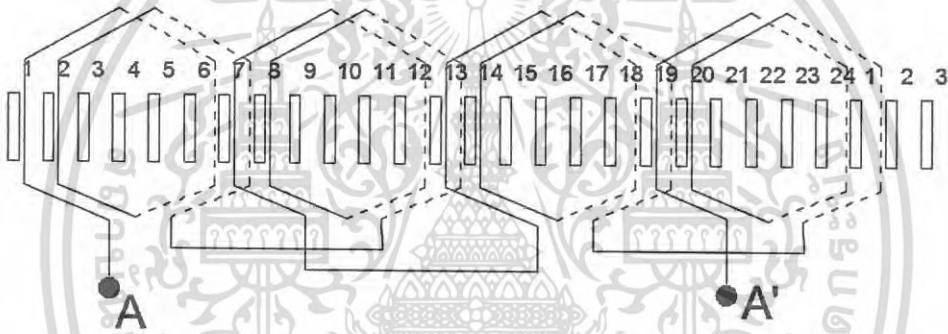
รูปที่ 2.18 การพันขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสแบบพิชเต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.18 ขดลวดแต่ละชุดจะพันลงในสลิตห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า จำนวนสลิตต่อหนึ่งขั้วแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 12 สลิต ดังนั้นจำนวนสลิตต่อหนึ่งขั้วแม่เหล็กต่อหนึ่งเฟส มีค่าเท่ากับ 4 สลิตและขั้วแม่เหล็ก 1 ขั้วกว้าง 180 องศาไฟฟ้าหรือต้นและปลายของขดลวดเดียวกัน พันห่างกัน 180 องศาไฟฟ้า ดังนั้นระยะห่างระหว่างสลิตเท่ากับ  $180/12 = 15$  องศาไฟฟ้า การพันขดลวดในเฟส a จะเริ่มที่สลิตที่ 1 ส่วนปลายของคอยล์ที่ 1 จะพันลงในด้านล่างของสลิตที่ 13 ในทำนองเดียวกัน ต้นของคอยล์ที่ 2 จะเริ่มที่สลิตที่ 2 และปลายคอยล์จะลงสลิตที่ 14 เป็นอย่างนี้เรื่อย ๆ พันจนหมดทุกเฟส ขดลวดที่พันจะเป็นเฟสเดียวกันทั้งชุดที่อยู่ด้านบนและชุดที่อยู่ด้านล่าง

### 2.10.2 ขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดสามเฟสแบบพิชเศษส่วน (Short Pitch)

คือระยะห่างระหว่างต้นและปลายของคอยล์เดียวกันที่พันลงในสลิตของขดลวดอาร์มาเจอร์มีค่าน้อยกว่า 180 องศาไฟฟ้าหรือระยะห่างน้อยกว่า 6 สลิตมีระยะห่างเพียง 5 สลิต นั่นคือระยะห่างหรือพิชเป็น  $5/6$  ของขดลวดดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การพันขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสแบบพิชเศษส่วน

จากรูปการพันขดลวดของแต่ละเฟสต้นของเฟส a มีปลายของเฟส a มาลงเพียง 2 คอยล์เท่านั้น ส่วนอีกสองสลิตต้นของเฟส a ที่เหลือไปทางขวามือจะมีปลายของเฟส c มาลงอีก 2 คอยล์เมื่อนำการพันขดลวดทั้งสองแบบไปใช้งานแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตออกมาโดยขดลวดแต่ละชุด จะมีความแตกต่างกันดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดแบบพิชเต็มและแบบพิชเศษส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.11 สัมประสิทธิ์ของการพันขดลวดอาร์มาเจอร์

การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ที่จำนวนสลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส ( $g'$ ) มากกว่า 1 สลิต แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำในขดลวดของเฟสเดียวกันแต่อยู่ต่างสลิตจะมีขนาดเท่ากันแต่จะมีการเลื่อนเฟสระหว่างขดลวด จากสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด ในกรณีที่ขดลวดมีความกว้างเท่ากับ ความกว้างของขั้วแม่เหล็ก ( $Y_s = Y_p$ ) โดยจะมีความกว้างเท่ากับ 180 องศาไฟฟ้า

$$E = 4.44 f N \phi_p \quad (2.60)$$

และถ้าจำนวนรอบของขดลวดในแต่ละเฟสเป็นจำนวน  $N_{ph}$  จะไม่สามารถหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแต่ละเฟส ( $E_{ph}$ )

$$E_{ph} = 4.44 f N_{ph} \phi_p K_w \quad (2.61)$$

ซึ่งค่าของสัมประสิทธิ์ของการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ (Winding factor:  $K_w$ ) เป็นตัวคูณที่จะมาปรับตัวเลขให้ถูกต้องเนื่องมาจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าของขดลวดในแต่ละเฟสจะต้องรวมแบบเวกเตอร์ และความกว้างของขดลวดแต่ละขดอาจน้อยกว่า 180 องศาไฟฟ้า โดยกำหนดให้

$$K_w = K_d K_p \quad (2.62)$$

ซึ่งจะสามารถหาค่า Distribution factor ( $K_d$ ) ได้จาก

$$K_d = \frac{\text{Phasor sum of each phase}}{\text{Arithmetic sum of each phase}} \quad (2.63)$$

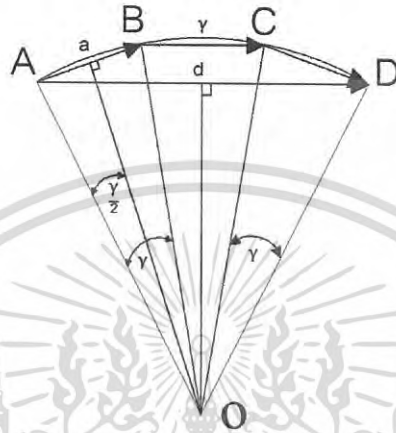
และค่า Pitch factor ( $K_p$ )

$$K_p = \frac{\text{Induced emf of fractional pitch coil}}{\text{Induced emf of full pitch coil}} \quad (2.64)$$

ในการพันขดลวดที่มีความกว้างของขดลวดที่มีความกว้างของขดลวดเท่ากับ ความกว้างของขั้วแม่เหล็ก และมี 1 สลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส ค่าของสัมประสิทธิ์ของการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ ( $K_w$ ) จะเท่ากับ 1 แต่ถ้าความกว้างของขดลวดน้อยกว่าความกว้างของขั้วแม่เหล็ก ค่าของ Pitch factor จะมีค่าน้อยกว่า 1 ( $K_p < 1$ ) และถ้ามีจำนวนสลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส ( $g'$ ) มากกว่า 1 สลิต จะทำให้ค่าของ Distribution factor มีค่าน้อยกว่า 1 ( $K_d < 1$ )

## 2.12 การคำนวณหาค่า Distribution factor ( $K_d$ )

จากการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส โดยมีจำนวนสลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส ( $g'$ ) มากกว่า 1 สลิต ในรูปที่ 2.19 จะมีค่าจำนวนสลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส เท่ากับ 3 สลิต ซึ่งจะแสดงถึงเวกเตอร์ 3 ตัวรวมกัน โดยแต่ละเวกเตอร์แต่ละตัวจะทำมุมกับค่าความกว้างของสลิต ( $\gamma$ ) และหาเวกเตอร์ลัพธ์



รูปที่ 2.21 การกระจายของขดลวดในแต่ละเฟส 3 สลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส

จาก  $\triangle OAa$  ;

$$OA = \frac{Aa}{\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)} = \frac{AB}{2\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)} \quad (2.65)$$

จาก  $\triangle OAd$  ;

$$OA = \frac{Ad}{\sin\left(\frac{3\gamma}{2}\right)} = \frac{AD}{2\sin\left(\frac{3\gamma}{2}\right)} \quad (2.66)$$

เนื่องจากสมการที่ (2.65) เท่ากับ (2.66) จะได้

$$\frac{AB}{2\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)} = \frac{AD}{2\sin\left(\frac{3\gamma}{2}\right)} \quad (2.67)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AD = AB \times \left( \frac{\sin\left(\frac{3\gamma}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)} \right) \quad (2.68)$$

จากสมการข้างต้น สามารถคำนวณหาค่า Distribution Factor ( $K_d$ )

$$K_d = \frac{\text{Phasor sum of each phase}}{\text{Arithmetic sum of each phase}} \quad (2.69)$$

$$K_d = \frac{AD}{3 \times AB} = \frac{\sin\left(\frac{3\gamma}{2}\right)}{3 \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)} \quad (2.70)$$

ดังนั้นค่า Distribution Factor ( $K_d$ ) ของการกระจายในสล็อตเมื่อเป็นของ Fundamental จะได้ค่า Distribution Factor of Fundamental ( $K_{d,1}$ )

$$K_{d,1} = \frac{\sin\left(\frac{\sigma}{2}\right)}{\left(\frac{\sigma}{\gamma}\right) \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)} \quad (2.71)$$

สำหรับ Harmonic order  $n$ ; จะได้ค่า Distribution Factor of Harmonic Order  $h$  ( $K_{d,n}$ )

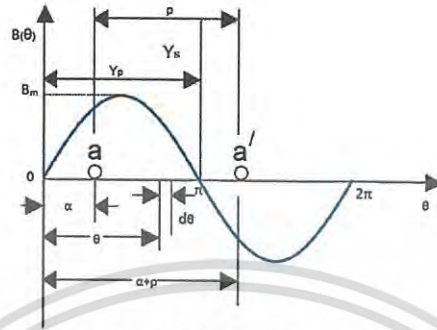
$$K_{d,n} = \frac{\sin\left(\frac{n\sigma}{2}\right)}{\left(\frac{\sigma}{\gamma}\right) \sin\left(\frac{n\gamma}{2}\right)} \quad (2.72)$$

ในการออกแบบการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ต้องดูความเหมาะสมของทั้งค่า Distribution Factor of Fundamental ( $K_{d,1}$ ) และค่า Distribution Factor of Harmonic Order  $n$  ( $K_{d,n}$ ) เพราะค่า  $K_{d,1}$  จะไปลดขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของ Fundamental ซึ่งจะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จะนำไปใช้งานส่วนค่า  $K_{d,n}$  จะเป็นตัวคูณที่ไปคูณกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจาก Harmonic order  $n$  ที่ต้องการไม่ให้มีเพื่อค่าสัญญาณขาออกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำรวมที่ได้จากการพันขดลวดอาร์มาเจอร์จะออกมาเป็นคลื่นไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.13 การคำนวณค่า Pitch

การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส ที่มีความกว้างของขดลวดน้อยกว่า 180 องศาไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ความกว้างของขดลวดน้อยกว่าความกว้างของขั้วแม่เหล็ก

มุมของความกว้างของขดลวด ( $\rho$ ) สามารถคำนวณได้จาก

$$\rho = \frac{Y_s}{Y_p} \pi \quad (2.73)$$

เมื่อ  $Y_s$  คือ ความกว้างของขดลวด (Coil pitch)

$Y_p$  คือ ความกว้างของขั้วแม่เหล็ก (Pole pitch)

โดยที่  $Y_s$  และ  $Y_p$  เป็นจำนวนสล็อตที่พันขดลวดอาร์มาเจอร์ ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องขดลวดได้จากสมการที่ 2.74

$$d\lambda = NB_m \sin \theta \left( \frac{l r d\theta}{\frac{P}{2}} \right) \quad (2.74)$$

เมื่อ  $B_m$  คือ เป็นค่าสูงสุดของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็ก

$l$  คือ เป็นความยาวตามแนวแกนของขั้วแม่เหล็ก

$r$  คือ เป็นรัศมีจากจุดศูนย์กลางของเครื่องจักรถึงช่องอากาศ

$N$  คือ เป็นจำนวนรอบของขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Total flux linkage ( $\lambda$ )

$$\lambda = \int_{\alpha}^{\alpha+\rho} NB_m \sin \theta lr \frac{2}{P} d\theta$$

$$\lambda = NB_m lr \frac{2}{P} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \rho)] \quad (2.75)$$

แทนค่า  $\alpha$  ด้วย  $\omega t$  เมื่อเครื่องจักรหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม  $\omega$

$$\lambda = NB_m lr \frac{2}{P} [\cos \omega t - \cos(\omega t + \rho)] \quad (2.76)$$

จากสมการผลต่างของ cosine

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \rho) = 2 \cos \left( \frac{\pi - \rho}{2} \right) \cos \left( \alpha - \frac{\pi - \rho}{2} \right)$$

จะได้ว่า

$$\lambda = NB_m lr \frac{4}{P} \cos \left( \frac{\pi - \rho}{2} \right) \cos \left( \alpha - \frac{\pi - \rho}{2} \right) \quad (2.77)$$

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.78)$$

$$= -\omega NB_m lr \frac{4}{P} \cos \left( \frac{\pi - \rho}{2} \right) \sin \left( \alpha - \frac{\pi - \rho}{2} \right) \quad (2.79)$$

เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว

$$\phi_p = \int_0^{\pi} (B_m \sin \theta) lr \frac{2}{P} d\theta \quad (2.80)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้เป็น

$$e = -\omega N \phi_p \cos\left(\frac{\pi - \rho}{2}\right) \sin\left(\omega t - \frac{\pi - \rho}{2}\right) \quad (2.81)$$

หาค่า rms ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้จาก

$$E_{rms} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega}{\sqrt{2}} N \phi_p \cos\left(\frac{\pi - \rho}{2}\right) = 4.44 f N \phi_p K_p \quad (2.82)$$

เมื่อ  $K_p$ : เป็นค่า Pitch Factor

ในกรณีที่ เป็น Fundamental flux ; จะได้ค่า Pitch Factor of Fundamental ( $K_{p,1}$ )

$$K_{p,1} = \cos\left(\frac{\pi - \rho}{2}\right) = \sin\left(\frac{\rho}{2}\right) \quad (2.83)$$

และสำหรับ Harmonic Flux Order  $n$ ; ค่า Pitch Factor of Harmonic Flux Order  $n$  ( $K_{p,n}$ )

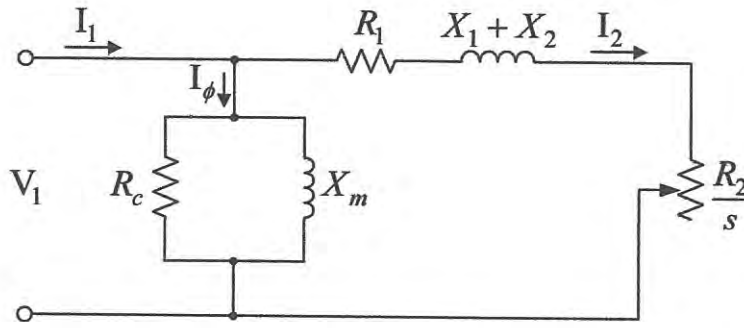
$$K_{p,n} = \sin\left(\frac{n\rho}{2}\right) \quad (2.84)$$

การเลือกความกว้างของขดลวดต้องดูความเหมาะสมของทั้งสองค่า Pitch Factor of Fundamental ( $K_{p,1}$ ) และค่า Pitch Factor of Harmonic Flux Order  $n$  ( $K_{p,n}$ ) เพราะค่า  $K_{p,1}$  จะไปลดขนาดของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของ Fundamental ซึ่งจะเป็นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จะไปใช้งาน ส่วนค่า  $K_{p,n}$  จะเป็นตัวคูณที่ไปคูณกับแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำของ Harmonic Order  $n$  ที่ต้องการไม่ให้มี เพื่อให้สัญญาณขาออกของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะออกมาเป็นคลื่นไซน์

#### 2.14 วงจรสมมูลแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (Approximated Equivalent Circuit of Three-Phase Induction Motor)

การหาวงจรมูลแบบประมาณ (Approximated Equivalent Circuit) เป็นการย้ายส่วนที่เป็นกระแสด้านสนามแม่เหล็กและส่วนของความสูญเสียในแกนเหล็กให้อยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าป้อนเข้าแสดงดังรูปที่ 2.23 ซึ่งในการทดสอบเพื่อหาวงจรมูล ค่าความสูญเสียทางกลเนื่องจากการหมุนจะรวมกับค่าความสูญเสียจากแกนเหล็กแสดงออกมาเป็นค่ากำลังสูญเสียคงที่ (Constant power loss :  $P_{c,loss}$ ) เมื่อป้อนเข้าด้วยพิกัดแรงดันไฟฟ้าที่ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 วงจรสมมูลแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

ค่ากระแสไฟฟ้าป้อนเข้า ( $I_1$ )

$$I_1 = I_2 + I_\phi \quad (2.85)$$

ค่ากระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก ( $I_\phi$ ) ในกรณีวงจรสมมูลแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

$$I_\phi = \frac{V_1}{R_c} + \frac{V_1}{jX_m} \quad (2.86)$$

และค่ากระแสทางด้านโรเตอร์ที่โอนย้ายมาอยู่ทางด้านตัวสเตเตอร์ ( $I_2$ )

$$I_2 = \frac{V_1}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right) + j(X_1 + X_2)} \quad (2.87)$$

เมื่อนำมาคำนวณหาค่ากำลังส่งผ่านช่องอากาศ ( $P_g$ )

$$P_g = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.88)$$

ซึ่งสามารถหาค่า Electromagnetic torque ( $T_e$ )

$$T_e = \frac{1}{\omega_s} P_g = \frac{1}{\omega_s} \times 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.89)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_e = \frac{1}{\omega_s} \times \frac{3V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + j(X_1 + X_2)^2} \times \frac{R_2}{s} \quad (2.90)$$

กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า ( $P_{i/p}$ )

$$P_{i/p} = 3V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (2.91)$$

กำลังทางกลขาออก ( $P_{o/p}$ )

$$P_{o/p} = T_e \omega_r \quad (2.92)$$

ดังนั้นประสิทธิภาพ (Efficiency) หาได้จากสมการที่ 2.93

$$\eta = \frac{P_{o/p}}{P_{i/p}} \times 100\% \quad (2.93)$$

สรุปจากการคำนวณวงจรสมมูลแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะได้ว่า ค่าของแรงบิดขาออก ( $T_{o/p}$ ) เท่ากับค่าแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก ( $T_e$ ) และยังสามารถคำนวณหาค่าสลิปที่ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุด ( $s_{max,T}$ ) ได้จากสมการที่ 2.94

$$s_{max,T} = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (2.94)$$

แรงบิดสูงสุดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก ( $T_{e,max}$ ) จากสมการที่ 2.95

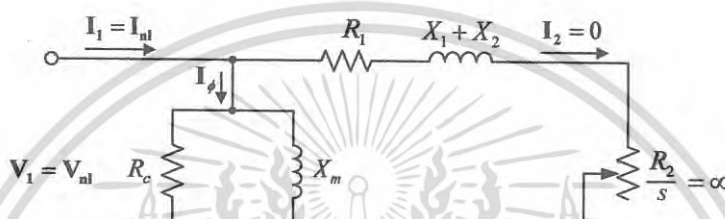
$$T_{e,max} = \frac{1}{\omega_s} \times \frac{3|V_1|^2 (R_1^2 + (X_1 + X_2)^2)^{\frac{1}{2}}}{\left(R_1 + (R_1^2 + (X_1 + X_2)^2)^{\frac{1}{2}}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2} \quad (2.95)$$

ในการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าป้อนเข้าและแรงบิดที่ความเร็วต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยทราบค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งต้องระบุให้ชัดเจนว่าค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลเป็นแบบใด เป็นวงจรสมมูลแบบมาตรฐานหรือวงจรสมมูลแบบประมาณ

## 2.15 การทดสอบหาวจรสมมูลแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

### 2.15.1 No-load test

จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดของมอเตอร์ให้กับมอเตอร์ที่อยู่ในภาวะไร้ภาระ ทำให้มอเตอร์มีความเร็วรอบในการหมุนใกล้เคียงกับ Synchronous speed ( $n_s$ ) กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์จะสูญเสียเนื่องจาก Core loss ( $P_c$ ), Stator copper loss ( $P_{s, cu}$ ) และ Mechanical loss ( $P_m$ ) ซึ่งเรียกรวมว่าเป็น Fix loss ข้อมูลที่ได้จากการทำ No-load test คือ  $P_{nl}$ ,  $V_{nl}$  และ  $I_{nl}$  เป็นค่าต่อเฟส และความเร็วโรเตอร์ ( $n_r$ ) เข้าใกล้  $n_s$  ทำให้  $s \rightarrow 0$  ดังนั้น  $\frac{R_2}{s} \rightarrow \infty$  จึงเปรียบเสมือนปิดวงจรทางด้านโรเตอร์ซึ่งกระแส  $I_2 = 0$



รูปที่ 2.24 วงจรสมมูลแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะไร้ภาระทางกล

โดย

$$\phi_{nl} = \cos^{-1} \left( \frac{P_{nl}}{V_{nl} I_{nl}} \right) \quad (2.96)$$

$$I_{\phi} = I_{nl} \quad (2.97)$$

$$I_m = I_{nl} \sin \phi_{nl} \quad (2.98)$$

$$I_c = I_{nl} \cos \phi_{nl} \quad (2.99)$$

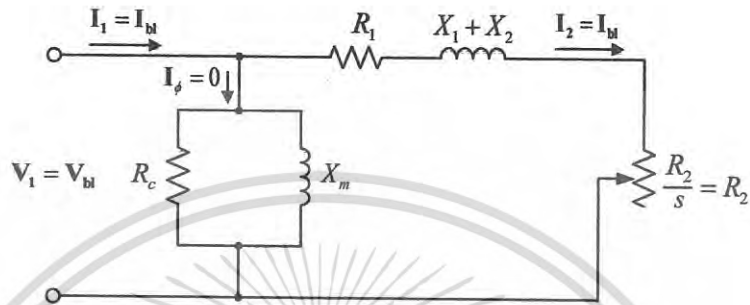
$$R_c = \frac{V_{nl}}{I_c} \quad (2.100)$$

$$X_m = \frac{V_{nl}}{I_m} \quad (2.101)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.15.2 Block-rotor test

ทดสอบโดยการยึดโรเตอร์ของมอเตอร์ให้หยุดอยู่กับที่ ( $n_r = 0$ ) แล้วค่อย ๆ ปรับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าจนกระแสไฟฟ้าที่ไหลในมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นค่าที่พิกัด (Rated current) ข้อมูลที่ได้จาก Block-rotor test คือ  $P_{bl}$ ,  $V_{bl}$ ,  $I_{bl}$  เป็นค่าต่อเฟส เมื่อ  $n_r = 0$  ทำให้  $s \rightarrow 1$  และเนื่องจาก  $V_{bl}$  มีค่าต่ำกว่าพิกัด ส่งผลให้กระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กมีค่าน้อย จึงกำหนดว่า  $I_\phi = 0$



รูปที่ 2.25 วงจรสมมูลแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะยึดโรเตอร์

กำหนดให้

$$R_{bl} = R_1 + R_2 \quad (2.102)$$

$$X_{bl} = X_1 + X_2 \quad (2.103)$$

$$X_{bl} = \sqrt{Z_{bl}^2 - R_{bl}^2} \quad (2.104)$$

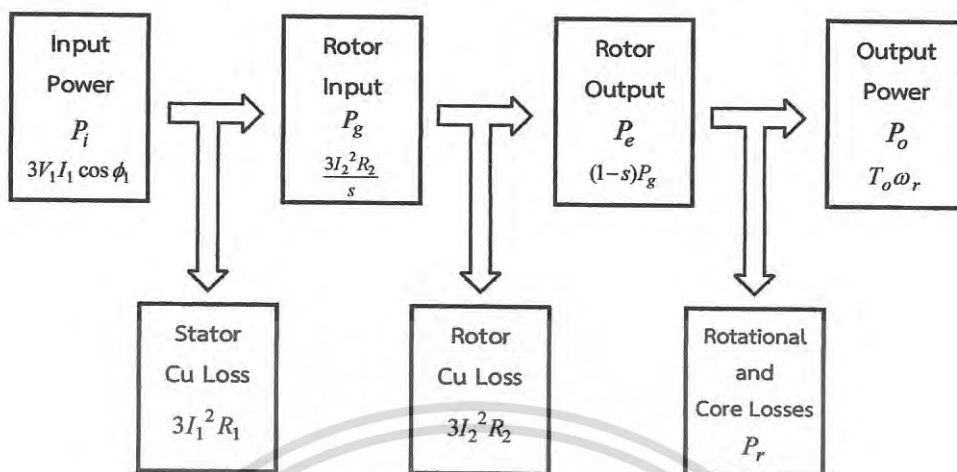
$$Z_{bl} = \frac{V_{bl}}{I_{bl}} = R_{bl} + jX_{bl} \quad (2.105)$$

จากการทำ Block-rotor test ได้ค่าความต้านทานออกมาเป็นค่ารวมคือ  $R_1 + R_2$  ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องแยกหาค่า  $R_2$  เพื่อใช้ในการคำนวณหา Output Power และ Electromagnetic torque ในกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ไม่สามารถวัดค่า  $R_2$  โดยตรง จึงใช้ V-I method ในการวัดค่า  $R_1$  ที่ตัวสเตเตอร์ และสามารถหาค่า  $R_2$  ตามสมการที่ 2.107

$$R_2 = R_1 - R_{bl} \quad (2.107)$$

ในกรณีที่มีแหล่งจ่ายความถี่ไฟฟ้าที่ปรับความถี่ได้ จะทำให้สามารถหาค่า  $R_2$  ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น โดยการลดความถี่ที่ใช้ในการทำการทดสอบ ซึ่งจะได้ Approximated equivalent

## 2.16 คุณสมบัติของกำลังไฟฟ้าและแรงบิด (Power and Torque Characteristics)



รูปที่ 2.26 Power flow ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ (Input power) จะมีการสูญเสียจากลวดทองแดงที่สเตเตอร์ (Stator copper loss) ก่อนจ่ายกำลังให้กับโรเตอร์ (Rotor input power) และมีการสูญเสียจากลวดทองแดงที่โรเตอร์ (Rotor copper loss) ก่อนจ่ายกำลังไฟฟ้าออกจากโรเตอร์ (Rotor output power) และมีการสูญเสียจากการหมุน (Rotational losses) ก่อนจ่ายกำลังทางกลทั้งหมดออกจากมอเตอร์ (Output power) ซึ่งการสูญเสียจากการหมุน เกิดจากการเสียดสีของโรเตอร์ (Friction loss) และแรงต้านลมของใบพัด (Windage loss) เรียกว่า Friction and windage loss

จากรูปที่ 2.26 ค่ากำลังไฟฟ้าสามเฟสทั้งหมดที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (Input power – electrical power) พิจารณาได้จาก

$$P_i = V_1 I_1 \cos \phi \quad (2.108)$$

ค่าสูญเสียจากลวดทองแดงที่สเตเตอร์ (Stator copper loss)

$$P_{s,cu} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.109)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโรเตอร์ (Rotor input – power across air gap)

$$P_g = 3I_1^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.110)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสูญเสียจากลวดทองแดงที่โรเตอร์ (Rotor copper loss)

$$P_{r,cu} = 3I_2^2 R_2 = sP_g \quad (2.111)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าที่ออกจากโรเตอร์ (Rotor output – electromagnetic power)

$$P_e = P_g - P_{cu,2} = 3I_2^2 R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) \quad (2.112)$$

$$P_e = P_g - sP_g = (1-s)P_g \quad (2.113)$$

ค่าแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque)

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (2.114)$$

ค่ากำลังทางกลทั้งหมดที่ออกจากรอเตอร์ (Output power – mechanical power)

$$P_o = P_e - P_r \quad (2.115)$$

เมื่อเป็นค่ารวมของค่าสูญเสียจากการหมุน (Rotational loss) และค่าสูญเสียในแกนเหล็ก ดังนั้นค่าแรงบิดทางกลของมอเตอร์ (Output torque) พิจารณาได้จาก

$$T_e = \frac{P_o}{\omega_r} \quad (2.116)$$

## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานสำคัญของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งในบทนี้เป็นการนำทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ เหล่านั้น มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบวิธีการทดลอง เพื่อศึกษาคุณลักษณะและทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบพันขดลวดแต่ละขนาด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจากผู้ผลิตกับมอเตอร์ที่พันขดลวดใหม่

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

##### 3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

1. Multi-meter
2. Junction box
3. 3-Phase Variac
4. Torque detector
5. Torque meter
6. DC Generator
7. Permanent Magnet Synchronous Generator
8. Wirewound Resistors
9. Lighting Load
10. Voltage probe
11. Current probe
12. Oscilloscope
13. Power Analyzer
14. Inverter
15. Digital Low Resistance Ohmmeter
16. DC power supply
17. Squirrel-cage rotor (No conductor)
18. 3-Phase Induction Motor 1 HP
19. 3-Phase Induction Motor 3 HP
20. 3-Phase Induction Motor 5 HP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการทดลอง

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบ Squirrel-cage rotor มี 3 ขนาดคือ 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า ซึ่งมีรายละเอียดและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.1, 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า

Parameter	มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 1 แรงม้า	
	จากผู้ผลิต	พันขดลวดใหม่
แรงดัน (V)	220	220
กระแส (A)	1.9	3.8
กำลัง (W)	750	1500
ความถี่ (Hz)	50	100
ความเร็ว (rpm)	1400	2800
จำนวนขั้ว (Pole)	4	4
จำนวนร่อง (slots)	36	36
ขนาดขดลวดอาร์มาเจอร์	SWG 22 (0.3973 mm <sup>2</sup> )	SWG 22 (0.3973 mm <sup>2</sup> ) 2 เส้น
จำนวนรอบขดลวดอาร์มาเจอร์	72	36

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า

Parameter	มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 3 แรงม้า	
	จากผู้ผลิต	พันขดลวดใหม่
แรงดัน (V)	220	220
กระแส (A)	5.0	10.0
กำลัง (W)	2250	4500
ความถี่ (Hz)	50	100
ความเร็ว (rpm)	1420	2840
จำนวนขั้ว (Pole)	4	4
จำนวนร่อง (slots)	36	36
ขนาดขดลวดอาร์มาเจอร์	SWG 20 (0.6576 mm <sup>2</sup> )	SWG 20 (0.6576 mm <sup>2</sup> ) 2 เส้น
จำนวนรอบขดลวดอาร์มาเจอร์	44	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า

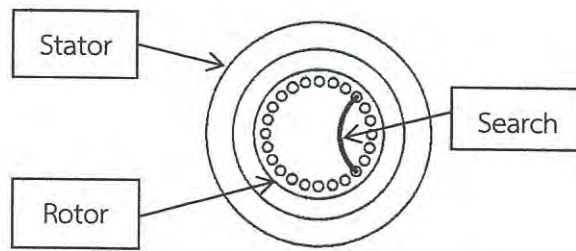
Parameter	มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 5 แรงม้า	
	จากผู้ผลิต	พันขดลวดใหม่
แรงดัน (V)	220	220
กระแส (A)	7.9	15.8
กำลัง (W)	3700	7400
ความถี่ (Hz)	50	100
ความเร็ว (rpm)	1420	2840
จำนวนขั้ว (Pole)	4	4
จำนวนร่อง (slots)	36	36
ขนาดขดลวดอาร์มาเจอร์	SWG 21 (0.5189 mm <sup>2</sup> ) 2 เส้น	SWG 21 (0.5189 mm <sup>2</sup> ) 4 เส้น
จำนวนรอบขดลวดอาร์มาเจอร์	31	16

### 3.2 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนและวิธีการทดลองจะอาศัยทฤษฎีและพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับในการออกแบบการทดลอง ซึ่งทุก ๆ การทดลองจะทำการทดลองกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสทั้ง 3 ขนาด คือ 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า ทั้งจากผู้ผลิตและที่พันขดลวดใหม่ ให้ได้ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เพื่อใช้ในการคำนวณและศึกษาคุณลักษณะต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

#### 3.2.1 การทดสอบหาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน

การทดสอบนี้ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าที่ขั้วเทอร์มินอลของมอเตอร์ โดยกระแสไฟฟ้าสามเฟสจะสร้างฟลักซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาไปตัดกับขดลวดค้นหาที่โรเตอร์ ดังรูปที่ 3.1 โดยพันขดลวดค้นหาจำนวน 1 รอบ ระหว่างระหว่างขดลวด 11 slots ทำการวัดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดค้นหาโดยหมุนโรเตอร์จากมุม 0° ถึง 180° ทางกล หมุนทีละ 15° ทางกล โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ 220 V 50 Hz สำหรับมอเตอร์จากผู้ผลิต และ 110 V 50 Hz สำหรับมอเตอร์ที่พันขดลวดใหม่ และพันขดลวดค้นหาจำนวน 1 รอบ เพื่อนำค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่วัดได้จากเครื่อง Oscilloscope มาวิเคราะห์หาขนาดของสนามแม่เหล็กตามสมการที่ 2.52



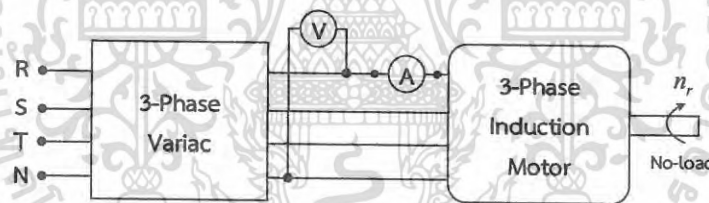
รูปที่ 3.1 การใส่ search coil ที่โรเตอร์

### 3.2.2 การทดสอบทางจรสมมูลแบบประมาณ

การพิจารณาสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะทำงานที่ภาระทางกลต่าง ๆ สามารถพิจารณาได้จากวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรสมมูลสามารถหาได้จากการทดสอบ 3 แบบ ดังนี้

#### (1) No-load Test

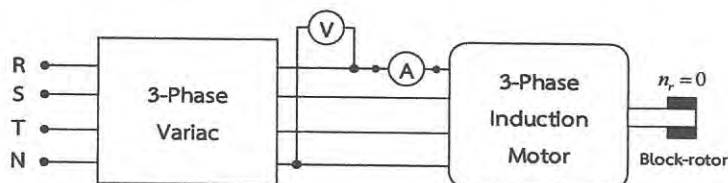
เป็นการทดสอบเพื่อหาค่า  $R_c$  และ  $X_m$  โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ โดยที่มอเตอร์ไม่มีการต่อกับภาระทางกลใด ๆ จะทำให้ความเร็วของโรเตอร์ ( $n_r$ ) มีค่าใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัส ( $n_s$ ) แล้วทำการวัดค่า  $V_{nl}$ ,  $I_{nl}$ ,  $\phi_{nl}$  โดยกำหนดให้ค่าแรงดันและกระแสเป็นค่าต่อเฟสดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรการทดสอบ No-load Test

#### (2) Block-rotor Test

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่า  $R_1 + R_2$  และ  $X_1 + X_2$  โดยทำการยึดโรเตอร์ให้อยู่กับที่แล้วค่อย ๆ ปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขาเข้าจนค่ากระแสขาเข้าเท่ากับค่ากระแสพิคคของมอเตอร์ แล้วทำการวัดค่า  $V_{bl}$ ,  $I_{bl}$ ,  $\phi_{bl}$  โดยกำหนดให้ค่าแรงดันและกระแสเป็นค่าต่อเฟสดังรูปที่ 3.3

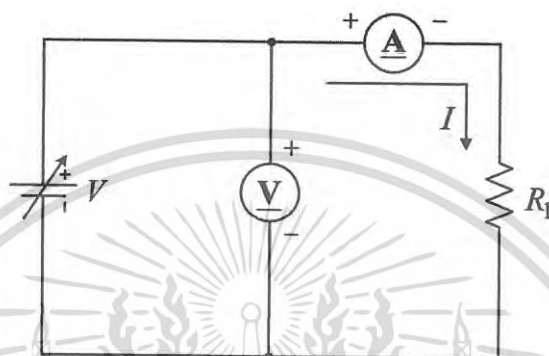


รูปที่ 3.3 วงจรการทดสอบ Block-rotor Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

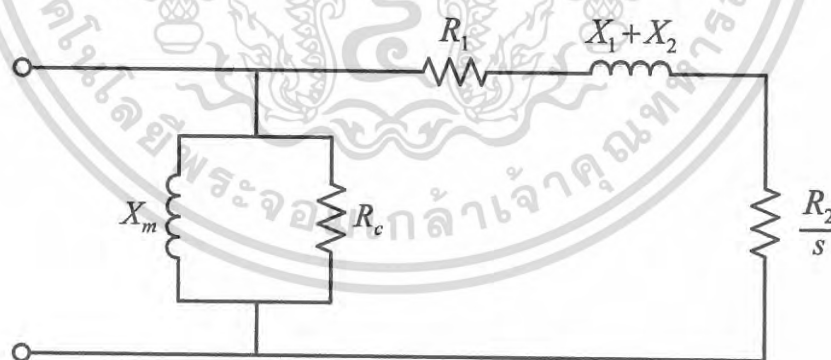
## (3) V-I Method

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานขดลวดอาร์มาเจอร์ ( $R_1$ ) โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ แล้วทำการปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจนถึงค่ากระแสฟลักซ์ของมอเตอร์ พร้อมทั้งวัดแรงดัน ( $V$ ) และกระแส ( $I$ ) ที่ป้อนเข้า เพื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $V$  กับ  $I$  ซึ่งค่า slope ระหว่าง  $V$  กับ  $I$  เป็นค่าความต้านทานขดลวดอาร์มาเจอร์ ( $R_1$ ) โดยมีวงจรทดสอบดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรการทดสอบ V-I Method

จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล แบบยึดโรเตอร์ และการทำ V-I Method ทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสดังรูปที่ 3.5



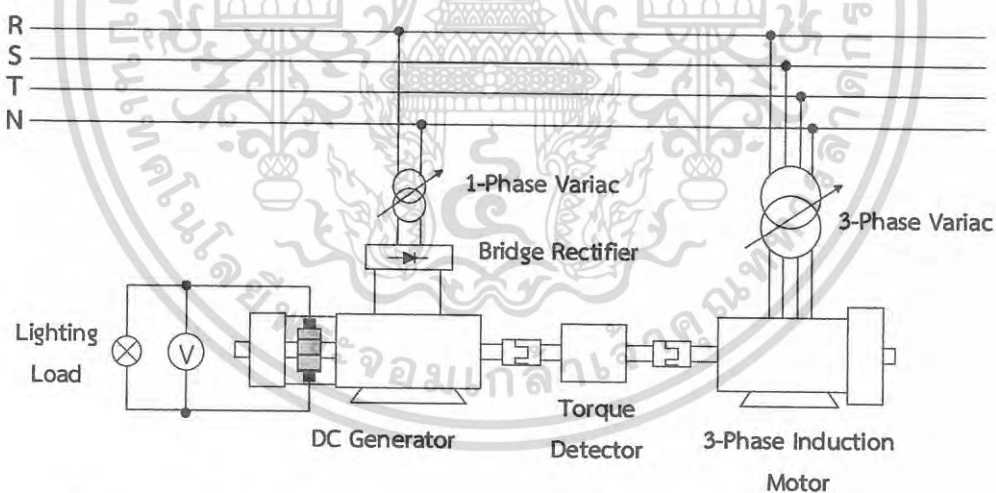
รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 การทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจากผู้ผลิต

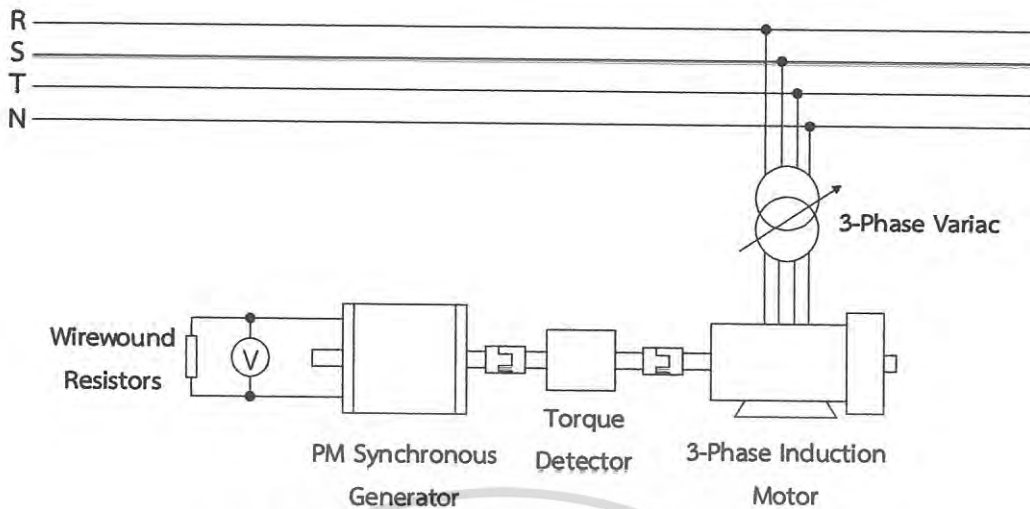
การทดสอบนี้เป็นการหาค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจากผู้ผลิต เพื่อนำค่าประสิทธิภาพมาเปรียบเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่พันขดลวดใหม่ ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส 220 V 50 Hz จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและใช้ Coupling เชื่อมต่อเพลลาของมอเตอร์กับเพลลาของ DC Generator โดยใช้เครื่อง Torque Detector วัดค่าแรงบิด (Kg-m) และความเร็ว (rpm) อยู่ระหว่างมอเตอร์เหนี่ยวนำกับ DC Generator หรือ Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) ซึ่ง DC Generator จะต่อวงจรแบบกระตุ้นสนามแม่เหล็กแยกส่วน (Separately Excited) และจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 220 V ในการกระตุ้นให้ขดลวดสนาม (Field Coils) โดยใช้หลอดไฟและ Wirewound Resistors เป็นโหลดในการทดสอบซึ่งจะทดสอบการทำงานของมอเตอร์ที่ 25%, 50%, 75% และ 100% ของพิกัด

ทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V) กระแสไฟฟ้าขาเข้า (A) กำลังไฟฟ้าขาเข้า (W) และค่าตัวประกอบกำลัง (p.f.) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้เครื่อง Power Analyzer และวัดค่าแรงบิด (Kg-m) และความเร็ว (rpm) จากเครื่อง Torque Meter เพื่อหาค่ากำลังขาออก (W) ตามสมการ  $P_{out} = T_m \omega_r$  ซึ่งจะสามารถหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้ตามสมการ  $\eta = \frac{P_{out}}{P_m} \times 100\%$  โดยมีวงจรทดสอบดังรูปที่ 3.6 และ 3.7



รูปที่ 3.6 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ 1 และ 3 แรงม้า จากผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ 5 แรงม้า จากผู้ผลิต

### 3.2.4 การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature winding)

การศึกษาวงจรการพันขดลวดอาร์มาเจอร์จากผู้ผลิตจำเป็นต้องถอดขดลวดออกมาจากสเตเตอร์เพื่อศึกษาวงจรการพันขดลวด พบว่ามีลักษณะการพันแบบเชลล์คอยล์ (Shell coil) เต็มพิทช์ (Full pitch) ชนิดหนึ่งชั้น (Single layer) จากนั้นวัดขนาดของขดลวดเดิมแล้วเลือกขนาดขดลวดใหม่ให้มีขนาดประมาณเป็น 2 เท่าจากขดลวดเดิม หรือใช้ขดลวดขนาดเท่าเดิม แต่พันเป็น 2 เส้นคู่กัน จะทำให้พื้นที่ตัดของขดลวดเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า และลดจำนวนรอบของการพันขดลวดใหม่ลง 2 เท่าจากจำนวนรอบขดลวดเดิม แล้วทำการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ใหม่ โดยมีขั้นตอนการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ดังนี้

1.) หา  $SPP$  เพื่อกำหนดร่องสล็อตต่อขั้วต่อเฟส เนื่องจากมี 36 slots 4 ขั้วแม่เหล็ก ไฟฟ้า 3 เฟส จึงได้  $SPP = \frac{36}{4 \times 3} = 3$

2.) ทหาระยะห่างระหว่าง slots เนื่องจาก  $\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m = \frac{4}{2} \times 360^\circ = 720^\circ$  จะได้ความกว้างระหว่าง slots  $\gamma = \frac{720^\circ}{36} = 20^\circ$  ดังนั้นขดลวดเฟสเดียวกันจะวางห่างกัน  $180^\circ$  หรือ 9 slots และขดลวดแต่ละเฟสวางห่างกัน  $120^\circ$  หรือ 6 slots

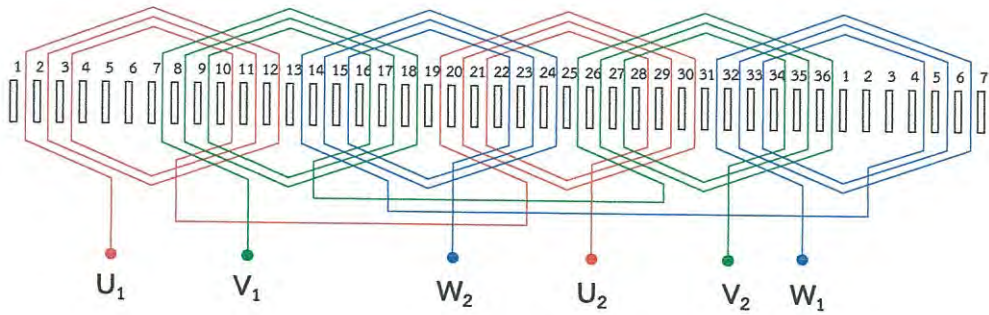
3.) วัดความกว้างของ slots ที่จะวางขดลวด และขึ้นรูปขดลวดให้ได้ความกว้างตามขนาดความกว้างของ slots ขดลวด 1 ชุดแบ่งความกว้างเป็น 3 ขนาดคือ 6 slots 8 slots และ 10 slots จำนวนรอบ 36 รอบ ทำทั้งหมด 6 ชุด

4.) วางขดลวดแต่ละชุดลงในสเตเตอร์ดังรูปที่ 3.8

5.) ทำการต่อปลายขดลวดแต่ละเฟสแบบอนุกรม (Series)

6.) จัดแต่งขดลวดแต่ละชุดให้เรียบร้อยและเคลือบด้วยน้ำยาเคลือบความเป็นฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

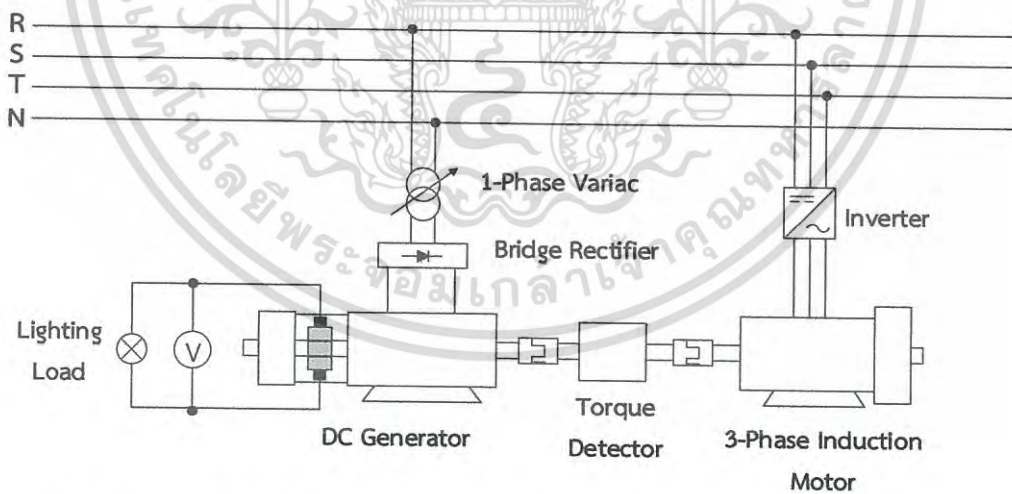


รูปที่ 3.8 ลักษณะการพันขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟส

### 3.2.5 การทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่พันขดลวดใหม่

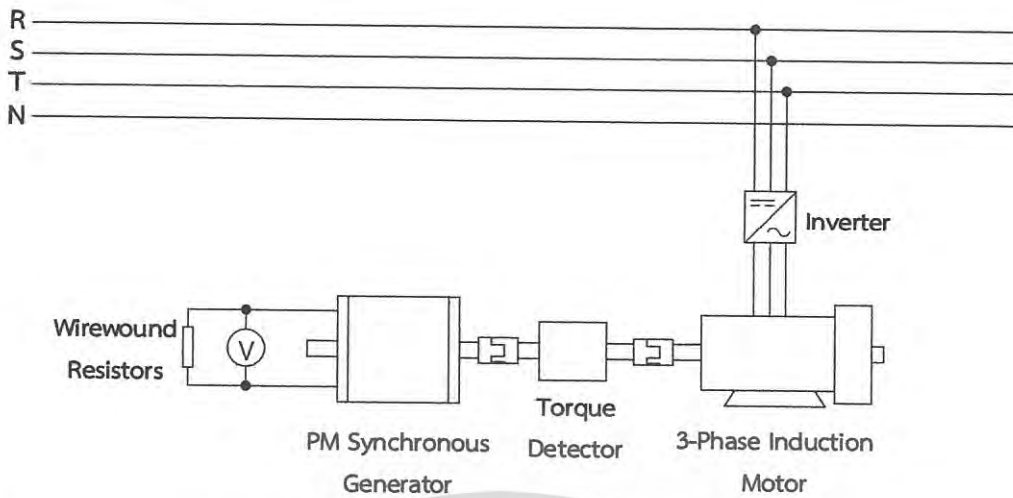
ทำการทดสอบคล้ายกับหัวข้อ 3.2.3 แต่ใช้อินเวอร์เตอร์ในการปรับความถี่ไฟฟ้าให้ได้ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส 220 V 100 Hz จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และทดสอบการทำงานของมอเตอร์ที่ 25% 50% 75% และ 100% ของพิกัด

ทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V) กระแสไฟฟ้าขาเข้า (A) กำลังไฟฟ้าขาเข้า (W) และค่าตัวประกอบกำลัง (p.f.) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้เครื่อง Power Analyzer และวัดค่าแรงบิด (Kg-m) และความเร็ว (rpm) จากเครื่อง Torque Meter เพื่อหาค่ากำลังขาออก (W) ตามสมการ  $P_{out} = T_m \omega_r$  ซึ่งจะสามารถหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้ ตามสมการ  $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$  โดยมีวงจรทดสอบดังรูปที่ 3.9 และ 3.10



รูปที่ 3.9 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ 1 แรงม้า ที่พันขดลวดใหม่

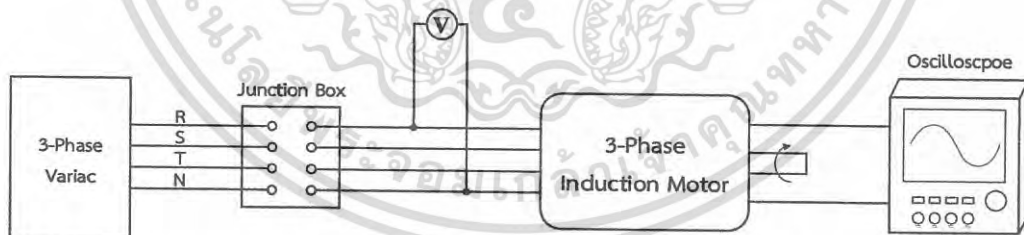
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า ที่พันขดลวดใหม่

### 3.2.6 การทดสอบหาการสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านลม

การสูญเสียจากการหมุน (Rotational loss) เกิดจากการเสียดสีของโรเตอร์ (Friction loss) และแรงต้านลมของใบพัด (Windage loss) ซึ่งการทดสอบหา Friction and windage loss จะทำการทดสอบที่สภาวะ No-load โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่พิกัดให้กับมอเตอร์ แล้วทำการค่อย ๆ ปรับลดแรงดันลงจนความเร็วเกิดการเปลี่ยนแปลง (มีค่า slip เกิดขึ้น) พร้อมกับบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้า (W) และแรงดันไฟฟ้า (V) แล้วนำไปพลอตกราฟระหว่างกำลังไฟฟ้าขาเข้า (W) และแรงดันไฟฟ้า (V) ทำการหาจุดตัดบนแกนกำลังไฟฟ้าขาเข้า ซึ่งคือค่า Friction and windage loss โดยมีวงจรทดสอบดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหา Rotational loss

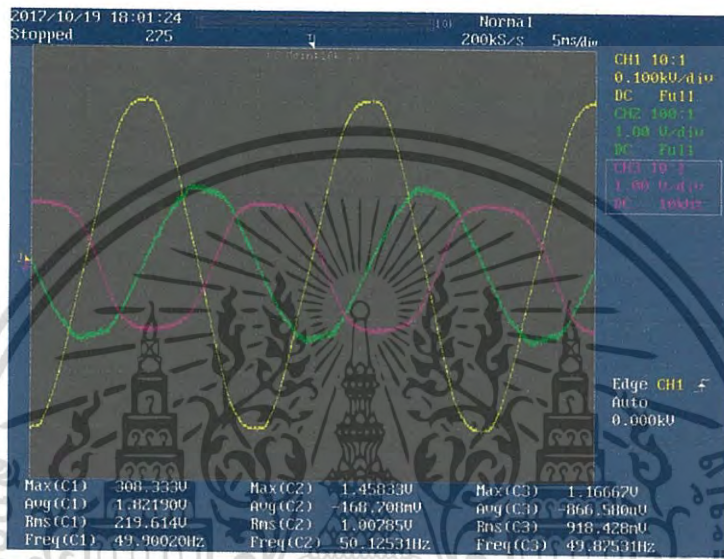
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4 ผลการทดลอง

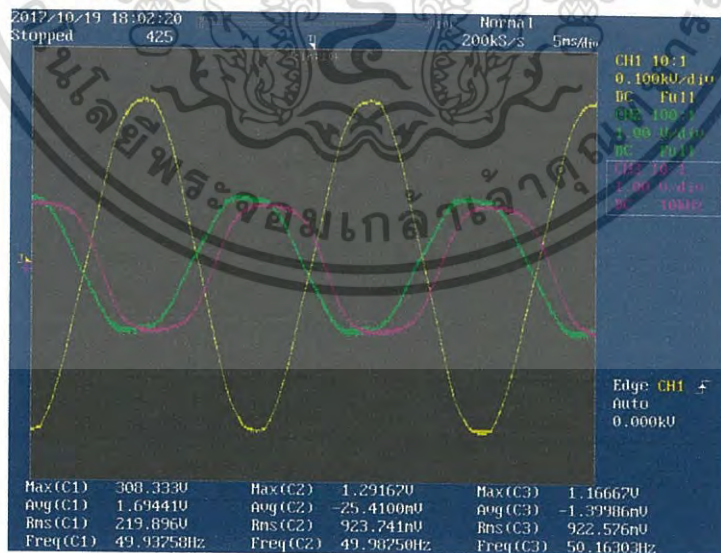
### 4.1 ผลการทดสอบการศึกษาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน

#### 4.1.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า

##### (1) มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจากผู้ผลิต

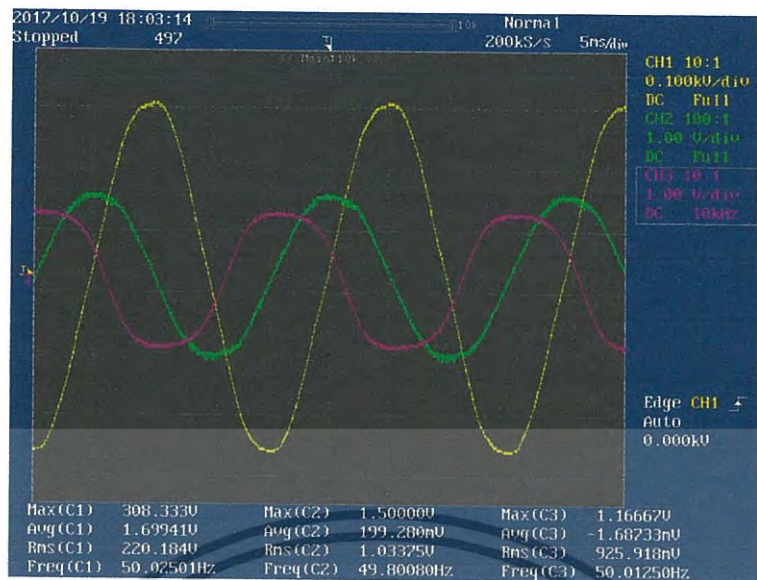


รูปที่ 4.1 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม  $0^\circ$  ทางกล

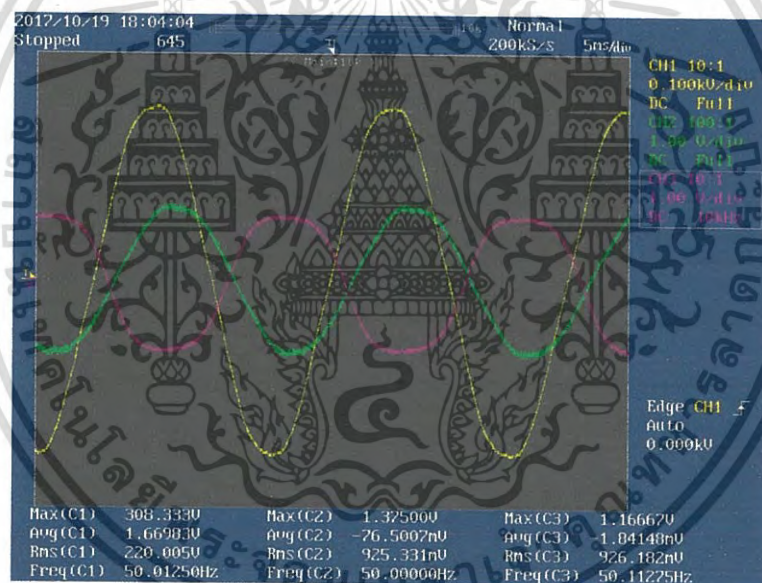


รูปที่ 4.2 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม  $15^\circ$  ทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

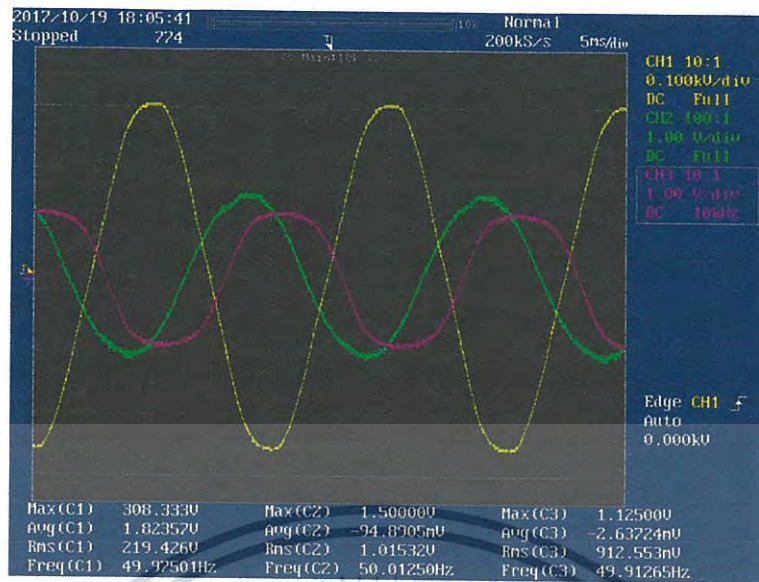


รูปที่ 4.3 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 30° ทางกล

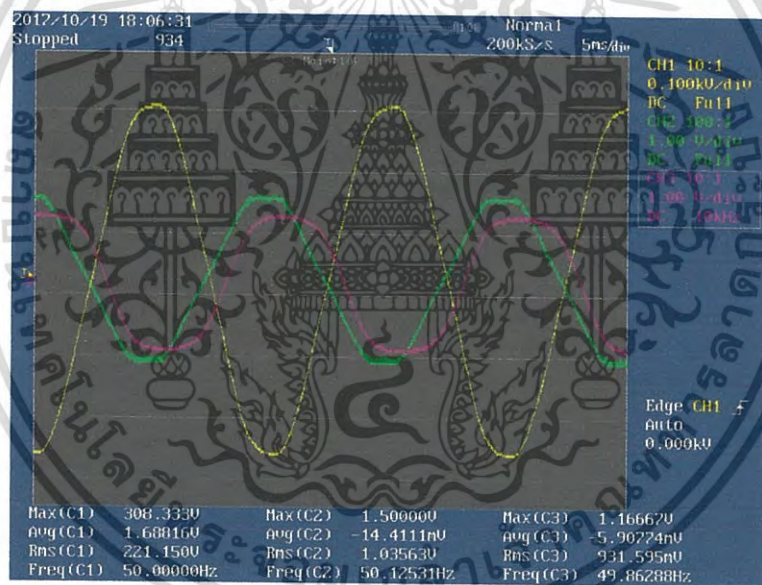


รูปที่ 4.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 45° ทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

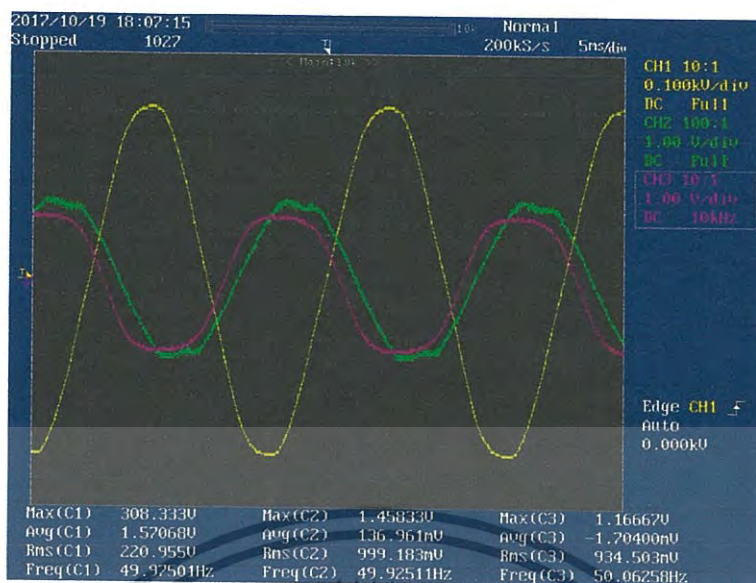


รูปที่ 4.5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 60° ทางกล



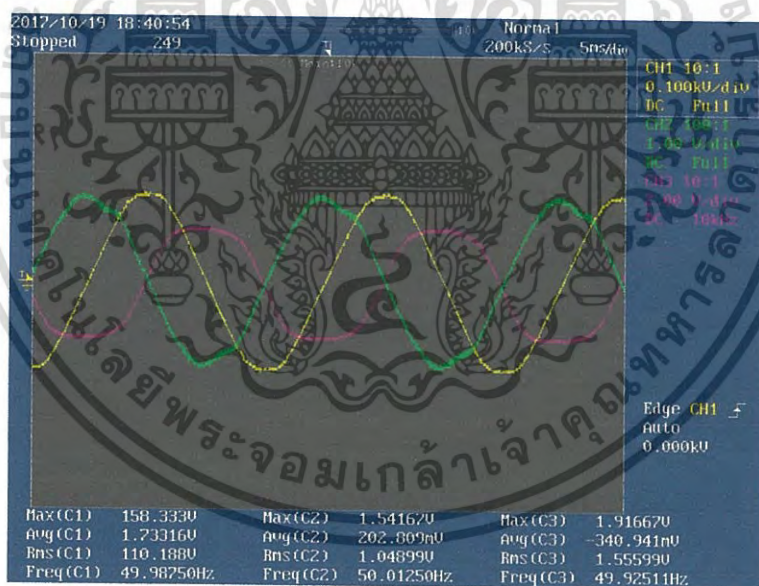
รูปที่ 4.6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 75° ทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



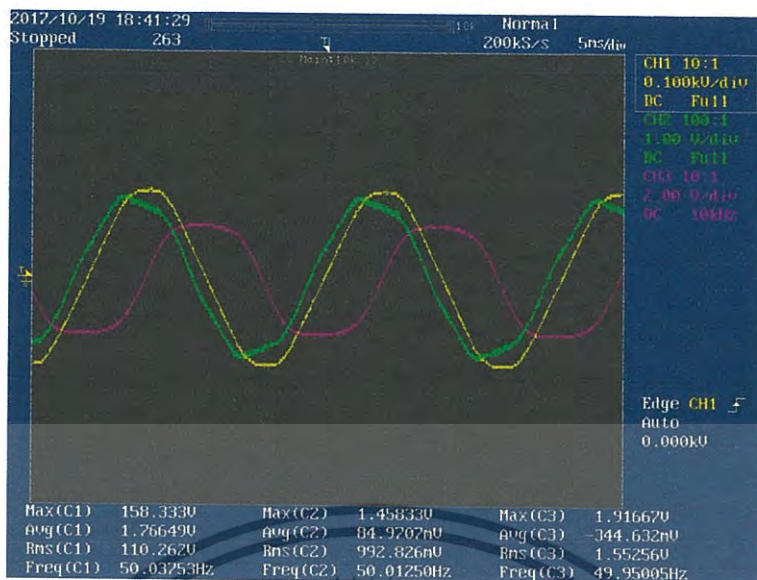
รูปที่ 4.7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม  $90^\circ$  ทางกล

(2) มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ปรับความเร็วใหม่

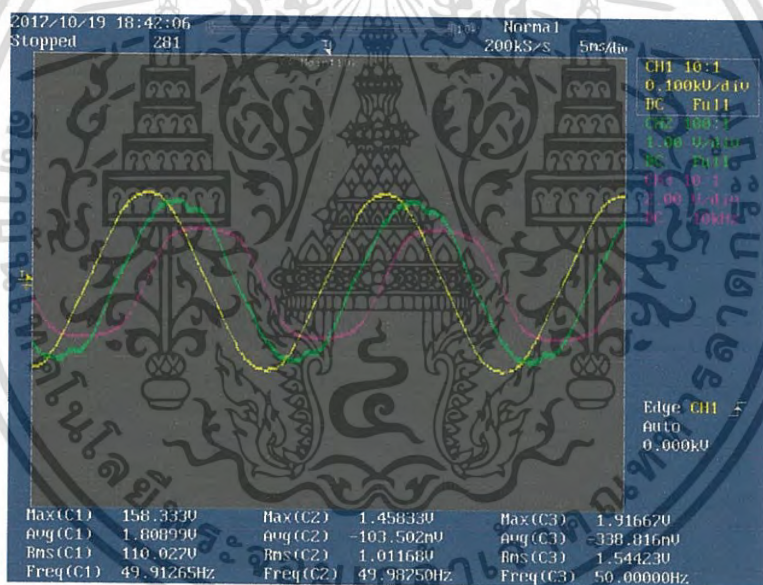


รูปที่ 4.8 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม  $0^\circ$  ทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

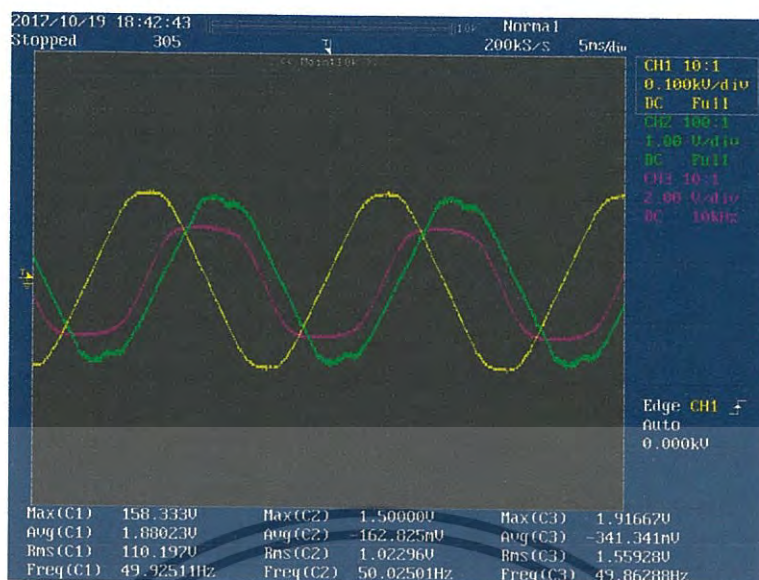


รูปที่ 4.9 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 15° ทางกล

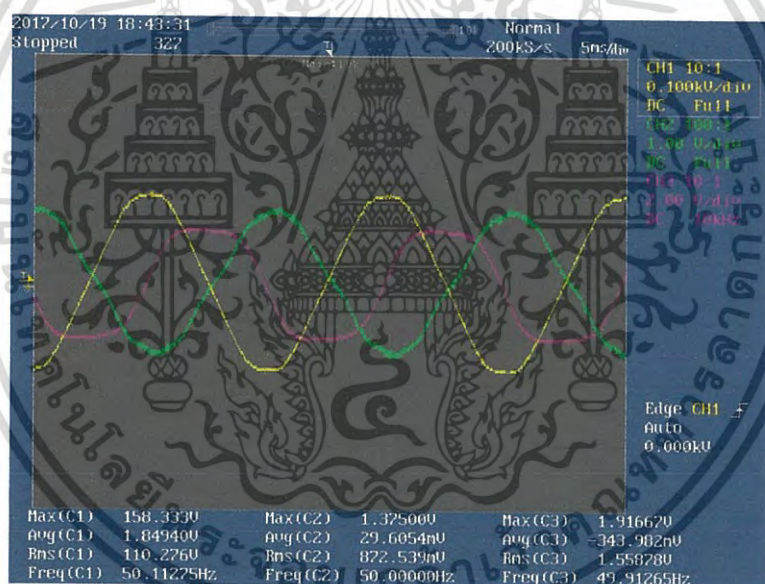


รูปที่ 4.10 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 30° ทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

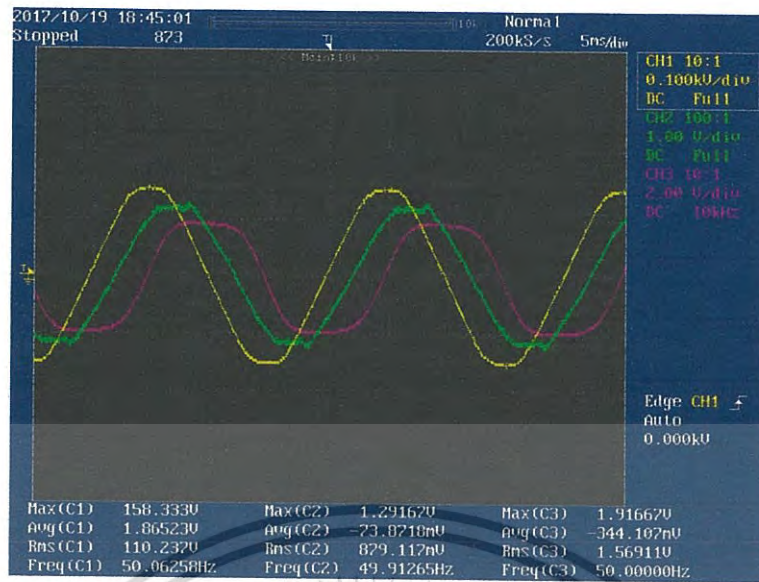


รูปที่ 4.11 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม  $45^{\circ}$  ทางกล

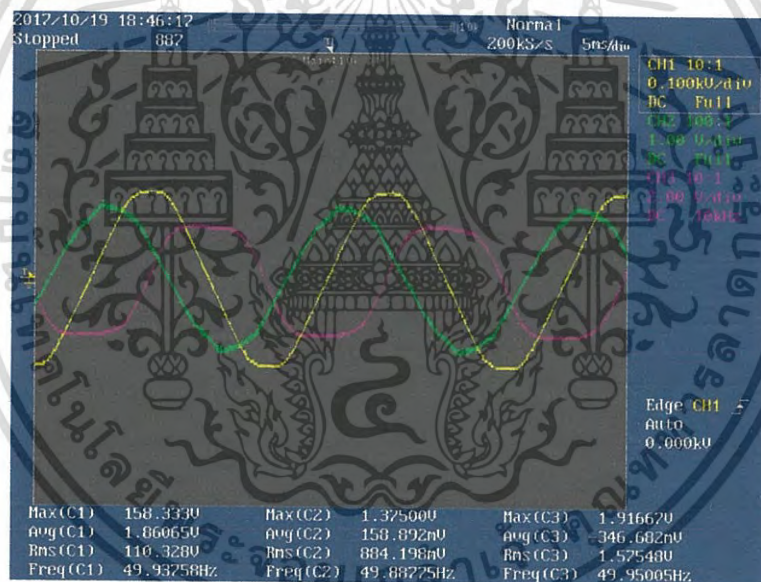


รูปที่ 4.12 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม  $60^{\circ}$  ทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 75° ทางกล

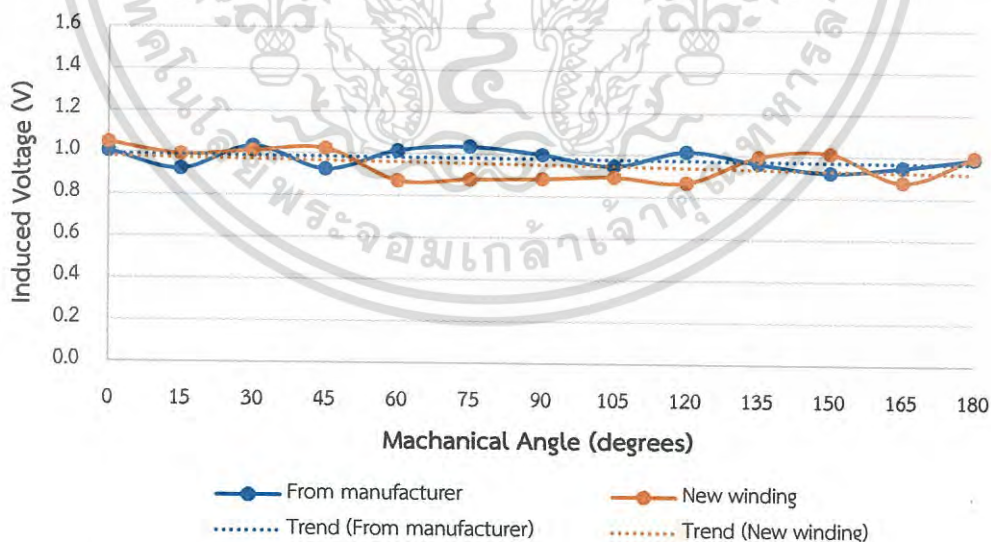


รูปที่ 4.14 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 90° ทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจากผู้ผลิตและมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่พันขดลวดใหม่

Mechanical Angle (degrees)	Induced Voltage (V)	
	From manufacturer	New winding
0	1.00785	1.04899
15	0.92374	0.99282
30	1.03375	1.01168
45	0.92533	1.02296
60	1.01532	0.87253
75	1.03563	0.87911
90	0.99918	0.88419
105	0.94651	0.89418
120	1.01783	0.86972
135	0.96385	0.99552
150	0.922794	1.01361
165	0.949732	0.87873
180	0.99181	0.99866
Average	0.97948	0.95097



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับมุมมองทางกลต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจากผู้ผลิตและมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่พันขดลวดใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

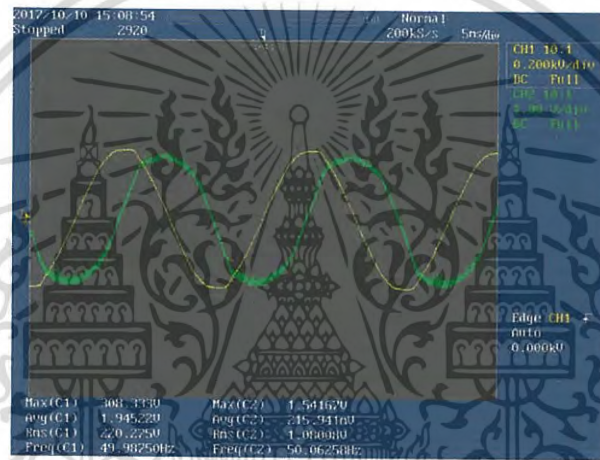
#### 4.1.2 อภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสพบว่า ค่า  $V_{rms}$  ที่วัดได้จากมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจากผู้ผลิตเมื่อจ่ายแรงดันขาเข้าที่ 220 V จะไม่ขึ้นกับมุมทางกลและมีค่าเฉลี่ยคือ 0.9795 V และค่า  $V_{rms}$  ที่วัดได้จากมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่พันขดลวดใหม่ เมื่อจ่ายแรงดันขาเข้าที่ 110 V จะไม่ขึ้นกับมุมทางกลเช่นกัน และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.9509 V

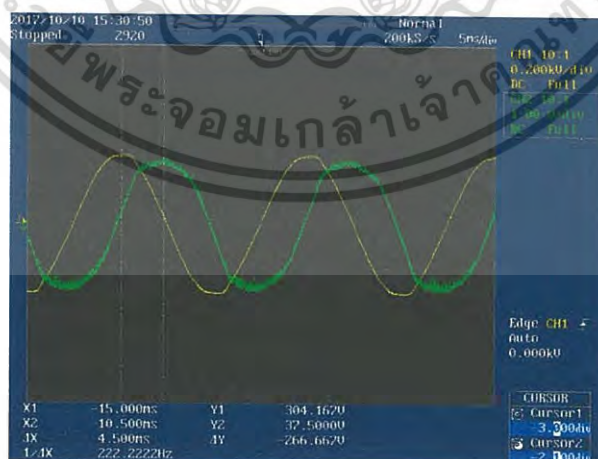
### 4.2 ผลการทดสอบทางจรรยาบรรณแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

#### 4.2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้าจากผู้ผลิต

##### (1) No-load test



รูปที่ 4.16 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล



รูปที่ 4.17 มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบ No-load test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้าจากผู้ผลิต

Voltage (V)	Current (A)	Power factor	$\phi_{nl}$ (Degrees)
220.275	1.08	0.1564	81

จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกลสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

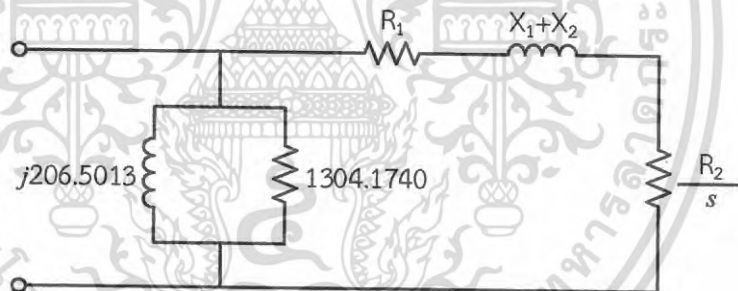
$$P_{nl} = 3V_{phase}I_{phase} \cos\phi_{nl} = 3 \times 220.275 \times 1.08 \times \cos 81^\circ = 111.6459 \text{ W}$$

$$I_m = I_{nl} \sin\phi_{nl} = 1.08 \sin 81^\circ = 1.0667 \text{ A}$$

$$I_c = I_{nl} \cos\phi_{nl} = 1.08 \cos 81^\circ = 0.1689 \text{ A}$$

$$R_c = \frac{V_{nl}}{I_c} = \frac{220.275}{0.1689} = 1304.1740 \text{ } \Omega$$

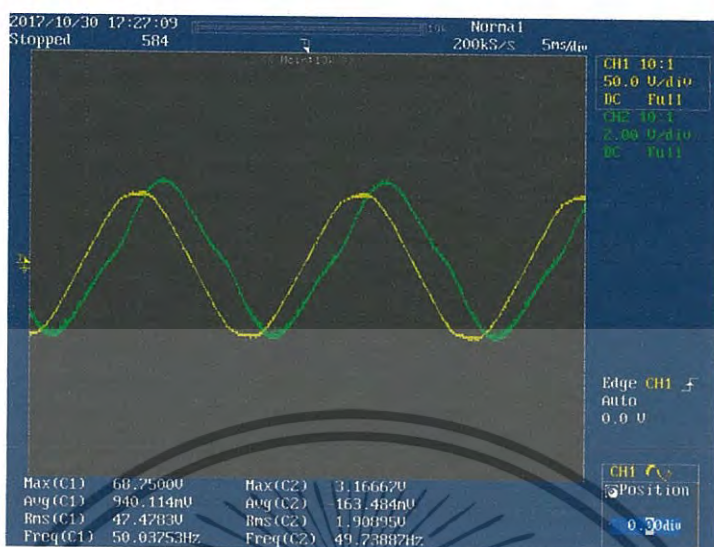
$$X_m = \frac{V_{nl}}{I_m} = \frac{220.275}{1.0667} = 206.5013 \text{ } \Omega$$



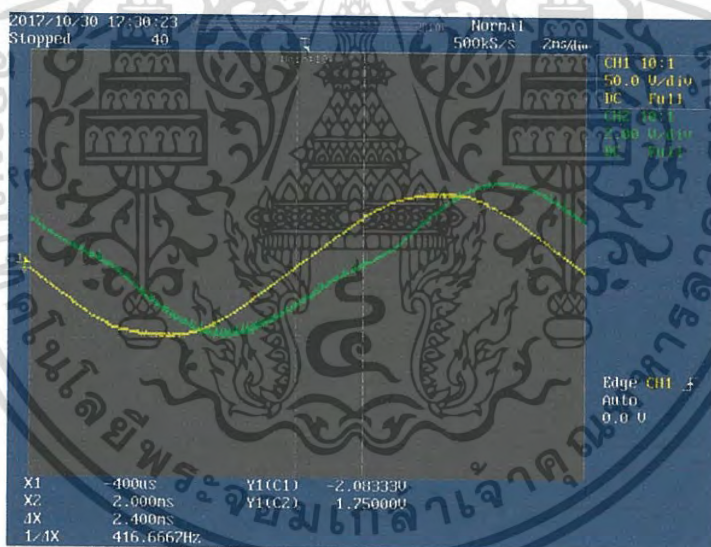
รูปที่ 4.18 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (2) Block-rotor test



รูปที่ 4.19 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์



รูปที่ 4.20 มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบ Block-rotor test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้าจากผู้ผลิต

Voltage (V)	Current (A)	Power factor	$\phi_{bl}$ (Degrees)
47.478	1.908	0.73	43.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

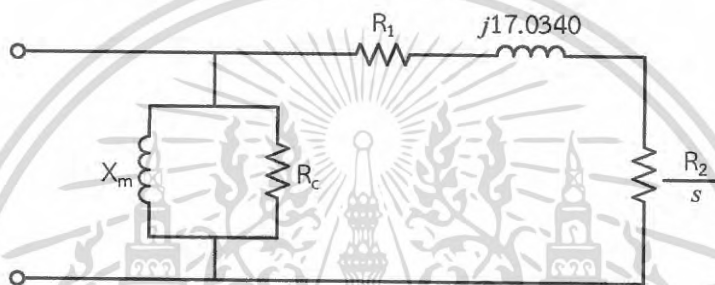
จากการทดสอบแบบยัดโรเตอร์สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$P_{bl} = 3V_{phase} I_{phase} \cos \phi_{bl} = 3 \times 47.478 \times 1.908 \times \cos 43.2^\circ = 198.1075 \text{ W}$$

$$Z_{bl} = \frac{V_{bl}}{I_{bl}} = \frac{47.478 \angle 0^\circ}{1.908 \angle -43.2} = 18.1393 + j17.0340 \quad \Omega$$

$$Z_{bl} = R_{bl} + jX_{bl}$$

$$R_{bl} = R_1 + R_2$$



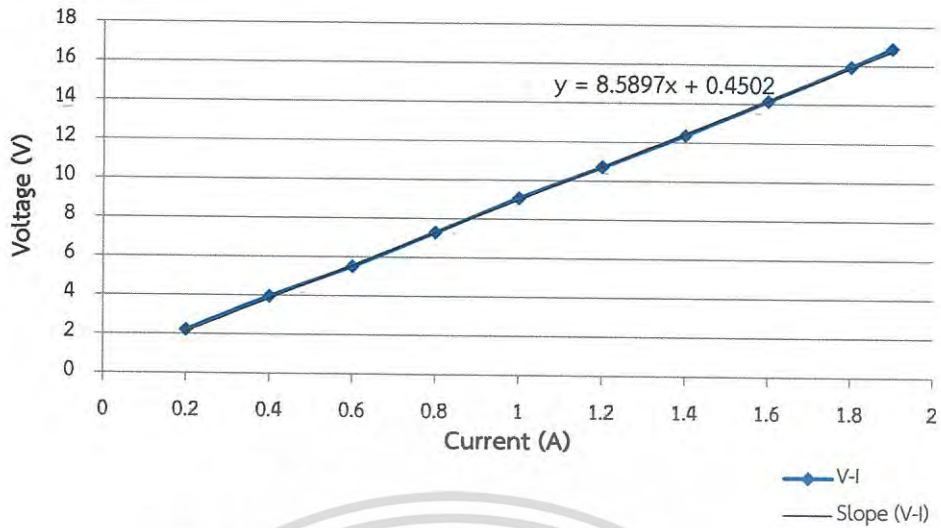
รูปที่ 4.21 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบยัดโรเตอร์

(3) V-I Method

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบ V-I Method ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้าจากผู้ผลิต

Current (A)	Voltage (V)
0.2	2.23
0.4	3.96
0.6	5.52
0.8	7.28
1	9.08
1.2	10.71
1.4	12.37
1.6	14.15
1.8	15.94
1.9	16.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสของการทดสอบ V-I Method

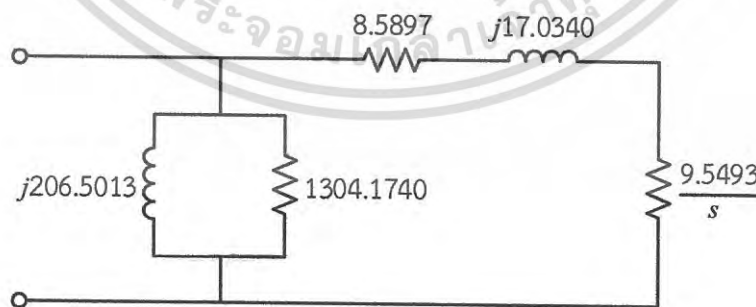
จากการทำ V-I Method จะได้

$$\text{slope} = R_1 = 8.5897 \, \Omega$$

ดังนั้น

$$R_2 = R_{bl} - R_1 = 18.139 - 8.5897 = 9.5493 \, \Omega$$

จะได้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณ

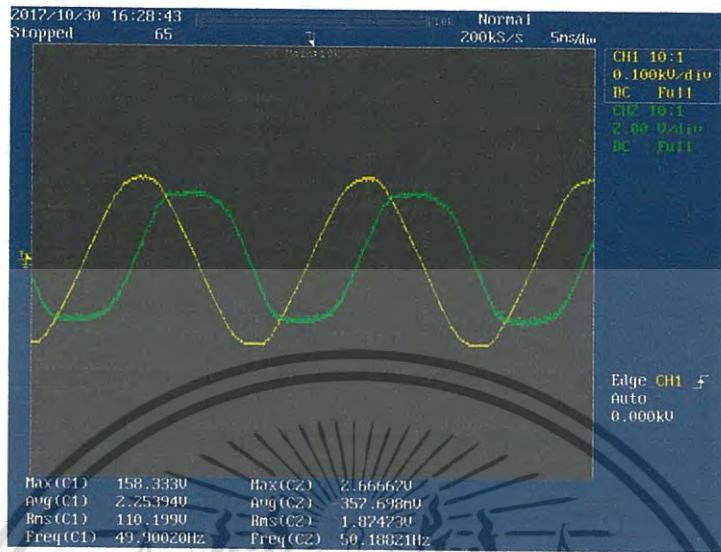


รูปที่ 4.23 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่

### (1) No-load test



รูปที่ 4.24 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล



รูปที่ 4.25 มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบ No-load test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า ที่พันขดลวดใหม่

Voltage (V)	Current (A)	Power factor	$\phi_{nl}$ (Degrees)
110.199	1.874	0.187	79.2

จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกลสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

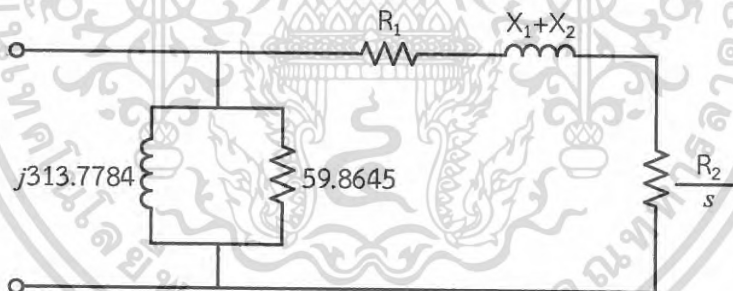
$$P_{nl} = 3V_{phase}I_{phase} \cos \phi_{nl} = 3 \times 110.199 \times 1.874 \times \cos 79.2^\circ = 116.0899 \text{ W}$$

$$I_m = I_{nl} \sin \phi_{nl} = 1.874 \sin 79.2^\circ = 1.8408 \text{ A}$$

$$I_c = I_{nl} \cos \phi_{nl} = 1.874 \cos 79.2^\circ = 0.3512 \text{ A}$$

$$R_c = \frac{V_{nl}}{I_c} = \frac{110.199}{0.3512} = 313.7784 \text{ } \Omega$$

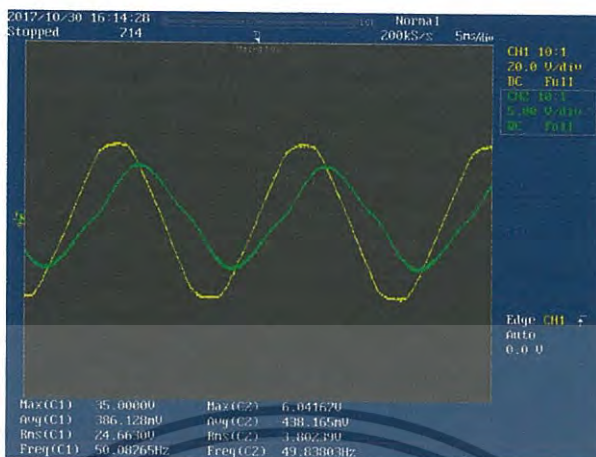
$$X_m = \frac{V_{nl}}{I_m} = \frac{110.199}{1.8408} = 59.8645 \text{ } \Omega$$



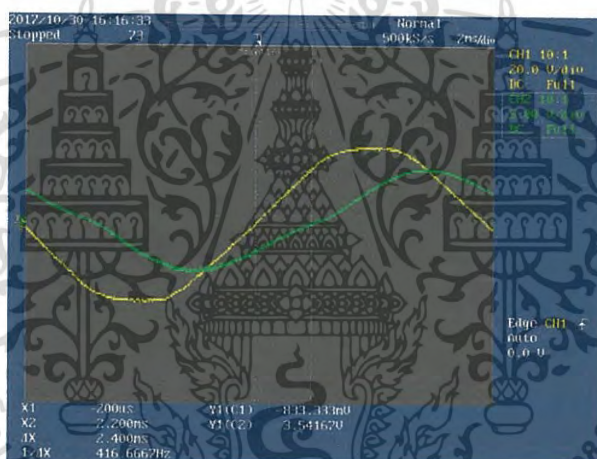
รูปที่ 4.26 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) Block-rotor test



รูปที่ 4.27 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์



รูปที่ 4.28 มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบ Block-rotor test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า ที่พันขดลวดใหม่

Voltage (V)	Current (A)	Power factor	$\phi_{bl}$ (Degrees)
24.663	3.802	0.73	43.2

จากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

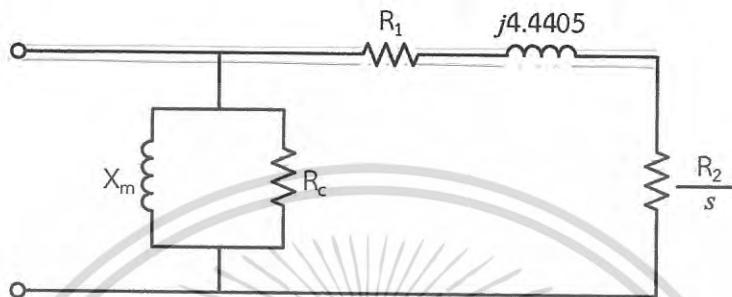
$$P_{bl} = 3V_{phase}I_{phase} \cos \phi_{bl} = 3 \times 24.663 \times 3.082 \times \cos 43.2^\circ = 205.0634 \quad W$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{bl} = \frac{V_{bl}}{I_{bl}} = \frac{24.663 \angle 0^\circ}{3.802 \angle -43.2^\circ} = 4.7287 + j4.4405 \quad \Omega$$

$$Z_{bl} = R_{bl} + jX_{bl}$$

$$R_{bl} = R_1 + R_2$$



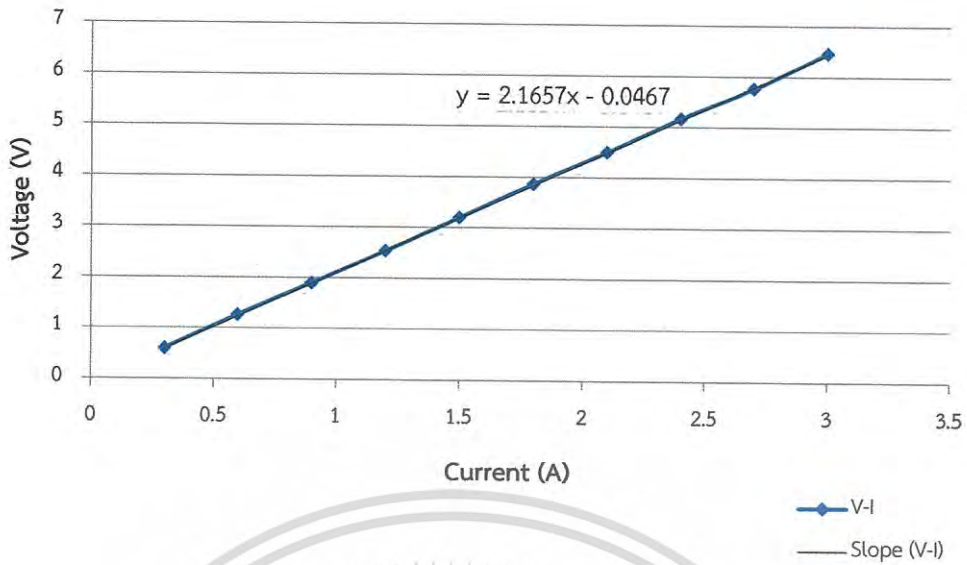
รูปที่ 4.29 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์

(3) V-I Method

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบ V-I Method ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า ที่พันขดลวดใหม่

Current (A)	Voltage (V)
0.3	0.6
0.6	1.27
0.9	1.90
1.2	2.53
1.5	3.20
1.8	3.87
2.1	4.50
2.4	5.14
2.7	5.77
3.0	6.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสของการทดสอบ V-I Method

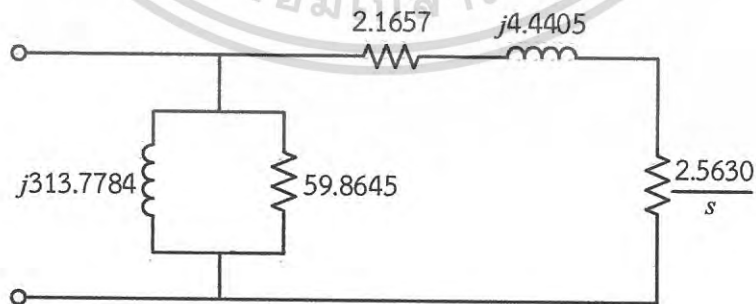
จากการทำ V-I Method จะได้

$$\text{slope} = R_1 = 2.1657 \ \Omega$$

ดังนั้น

$$R_2 = R_{bl} - R_1 = 4.7287 - 2.1657 = 2.5630 \ \Omega$$

จะได้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณ

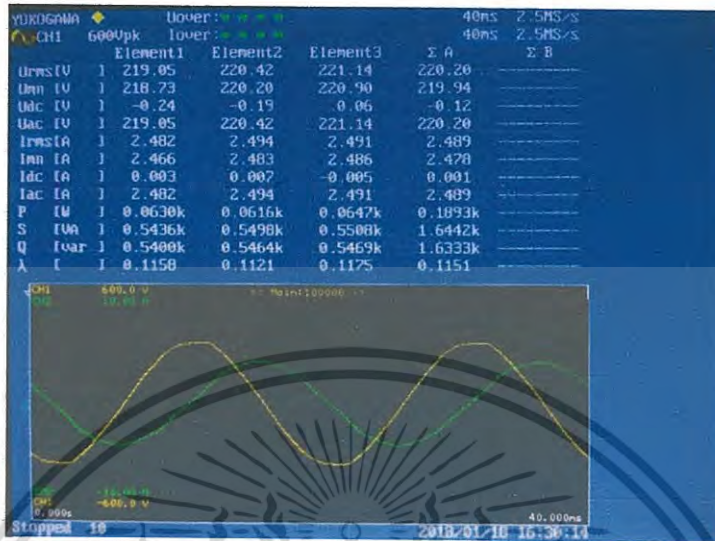


รูปที่ 4.31 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าจากผู้ผลิต

#### (1) No-load test



รูปที่ 4.32 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบ No-load test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าจากผู้ผลิต

Voltage (V)	Current (A)	Power factor	$\phi_{nl}$ (Degrees)
220.20	2.489	0.1151	83.39

จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกลสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$P_{nl} = 3V_{phase} I_{phase} \cos \phi_{nl} = 3 \times 220.2 \times 2.489 \times \cos 83.39^\circ = 189.2686 \quad W$$

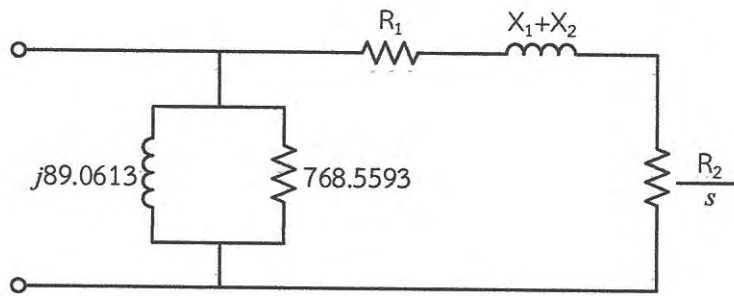
$$I_m = I_{nl} \sin \phi_{nl} = 2.489 \sin 83.39^\circ = 2.4725 \quad A$$

$$I_c = I_{nl} \cos \phi_{nl} = 2.489 \cos 83.39^\circ = 0.2865 \quad A$$

$$R_c = \frac{V_{nl}}{I_c} = \frac{220.20}{0.2865} = 768.5593 \quad \Omega$$

$$X_m = \frac{V_{nl}}{I_m} = \frac{220.20}{2.4725} = 89.0613 \quad \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล

(2) Block-rotor test



รูปที่ 4.34 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบ Block-rotor test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าจากผู้ผลิต

Voltage (V)	Current (A)	Power factor	$\phi_{bl}$ (Degrees)
49.39	5.003	0.6485	49.57

จากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

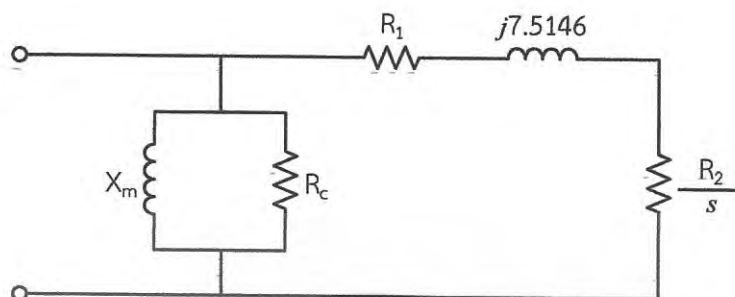
$$P_{bl} = 3V_{phase}I_{phase} \cos\phi_{bl} = 3 \times 49.39 \times 5.003 \times \cos 49.57^\circ = 480.7432 \text{ W}$$

$$Z_{bl} = \frac{V_{bl}}{I_{bl}} = \frac{49.39 \angle 0^\circ}{5.003 \angle -49.57^\circ} = 6.4022 + j7.5146 \quad \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{bl} = R_{bl} + jX_{bl}$$

$$R_{bl} = R_1 + R_2$$



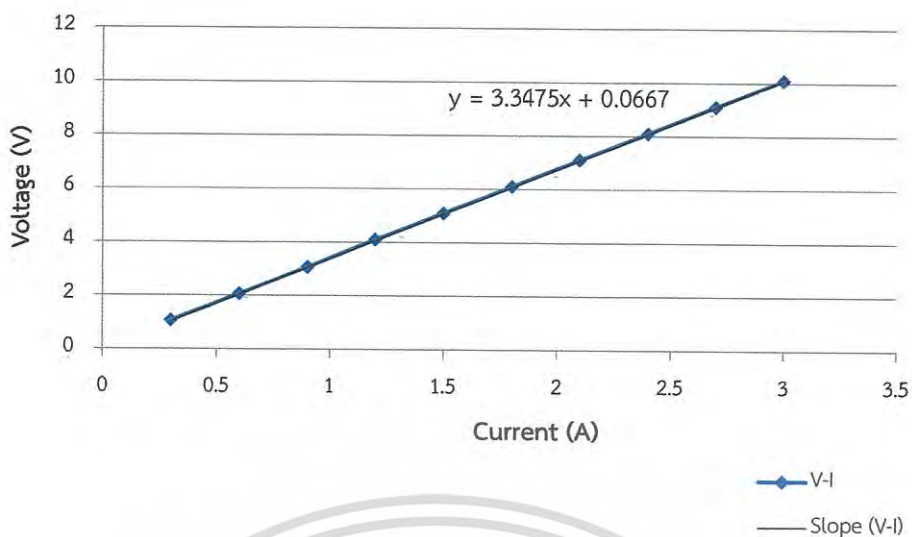
รูปที่ 4.35 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์

(3) V-I Method

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบ V-I Method ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าจากผู้ผลิต

Current (A)	Voltage (V)
0.3	1.07
0.6	2.07
0.9	3.07
1.2	4.10
1.5	5.10
1.8	6.10
2.1	7.10
2.4	8.10
2.7	9.10
3.0	10.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสของการทดสอบ V-I Method

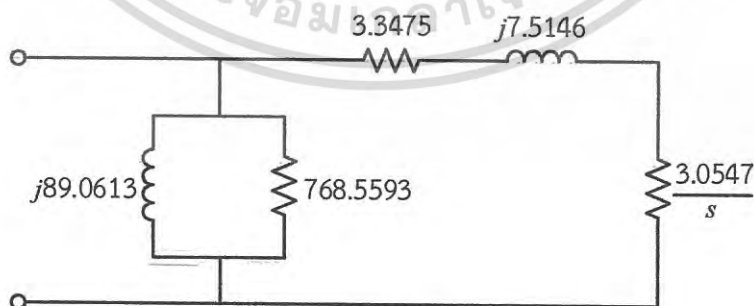
จากการทำ V-I Method จะได้

$$\text{slope} = R_1 = 3.3475 \ \Omega$$

ดังนั้น

$$R_2 = R_{bl} - R_1 = 6.4022 - 3.3475 = 3.0547 \ \Omega$$

จะได้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณ

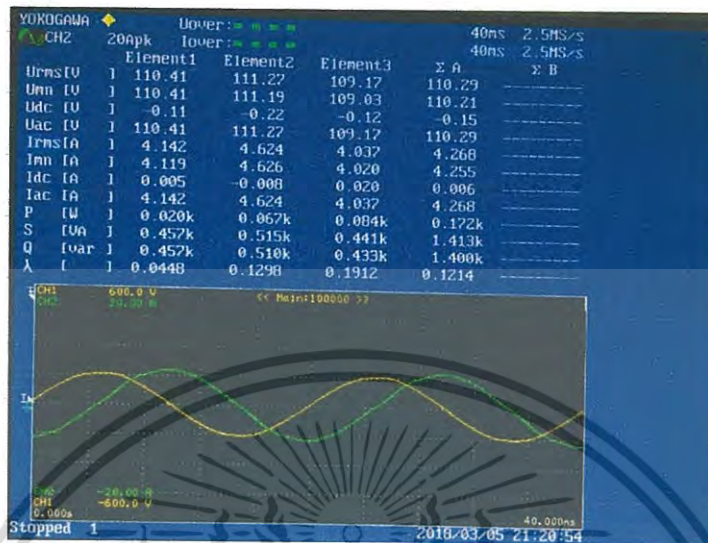


รูปที่ 4.37 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่

##### (1) No-load test



รูปที่ 4.38 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบ No-load test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่

Voltage (V)	Current (A)	Power factor	$\phi_{nl}$ (Degrees)
110.29	4.268	0.1214	83.03

จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกลสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$P_{nl} = 3V_{phase}I_{phase} \cos \phi_{nl} = 3 \times 110.29 \times 4.268 \times \cos 83.03^\circ = 171.3643 \text{ W}$$

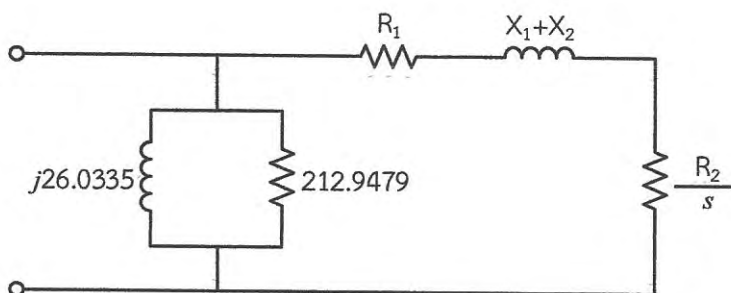
$$I_m = I_{nl} \sin \phi_{nl} = 4.268 \sin 83.03^\circ = 4.2365 \text{ A}$$

$$I_c = I_{nl} \cos \phi_{nl} = 4.268 \cos 83.03^\circ = 0.5179 \text{ A}$$

$$R_c = \frac{V_{nl}}{I_c} = \frac{110.29}{0.5179} = 212.9479 \text{ } \Omega$$

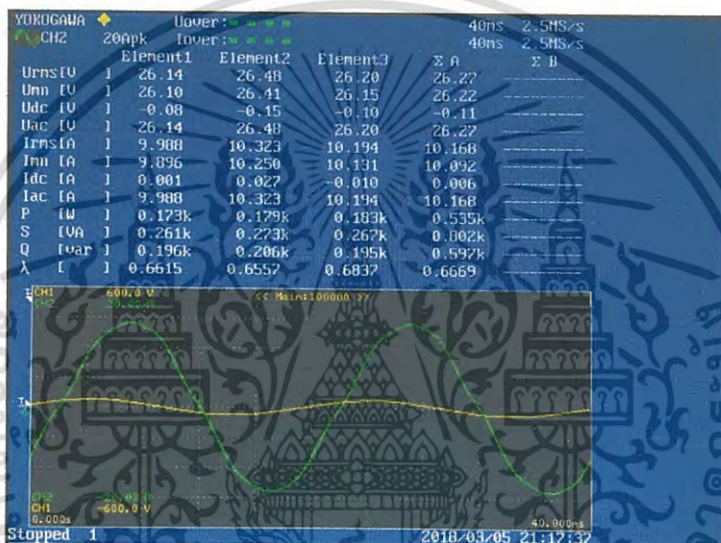
$$X_m = \frac{V_{nl}}{I_m} = \frac{110.29}{4.2365} = 26.0335 \text{ } \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล

(2) Block-rotor test



รูปที่ 4.40 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบ Block-rotor test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าที่พื่นขดลวดใหม่

Voltage (V)	Current (A)	Power factor	$\phi_{bl}$ (Degrees)
26.27	10.168	0.6669	48.17

จากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

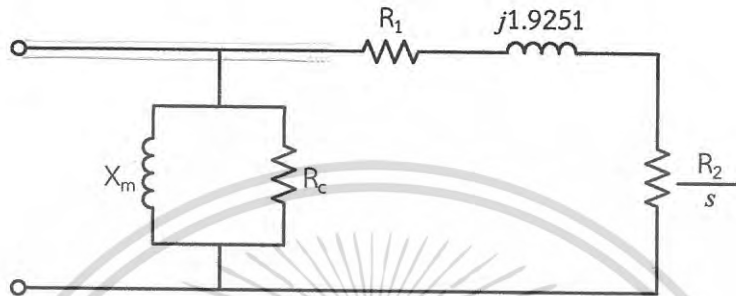
$$P_{bl} = 3V_{phase}I_{phase} \cos \phi_{bl} = 3 \times 26.27 \times 10.168 \times \cos 48.17^\circ = 534.4319 \text{ W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{bl} = \frac{V_{bl}}{I_{bl}} = \frac{26.27 \angle 0^\circ}{10.168 \angle -48.17^\circ} = 1.7230 + j1.9251 \quad \Omega$$

$$Z_{bl} = R_{bl} + jX_{bl}$$

$$R_{bl} = R_1 + R_2$$



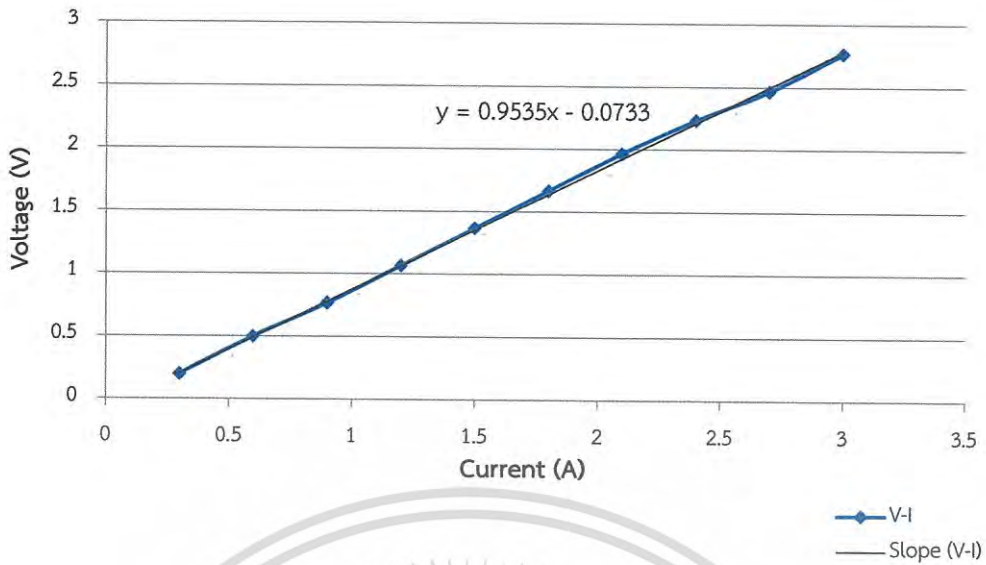
รูปที่ 4.41 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์

(3) V-I Method

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบ V-I Method ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า ที่พันขดลวดใหม่

Current (A)	Voltage (V)
0.3	0.20
0.6	0.50
0.9	0.77
1.2	1.07
1.5	1.37
1.8	1.67
2.1	1.97
2.4	2.23
2.7	2.47
3.0	2.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสของการทดสอบ V-I Method

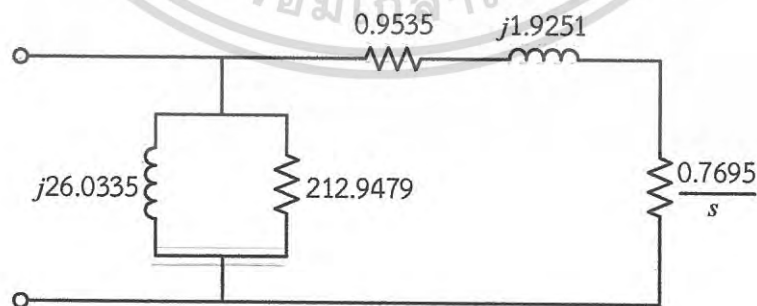
จากการทำ V-I Method จะได้

$$\text{slope} = R_1 = 0.9535 \quad \Omega$$

ดังนั้น

$$R_2 = R_{bl} - R_1 = 1.7230 - 0.9535 = 0.7695 \quad \Omega$$

จะได้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณ



รูปที่ 4.43 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.5 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้าจากผู้ผลิต

### (1) No-load test



รูปที่ 4.44 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบ No-load test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้าจากผู้ผลิต

Voltage (V)	Current (A)	Power factor	$\phi_{nl}$ (Degrees)
220.07	3.487	0.0963	84.47

จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกลสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$P_{nl} = 3V_{phase}I_{phase} \cos \phi_{nl} = 3 \times 220.07 \times 3.487 \times \cos 84.47^\circ = 221.8513 \quad W$$

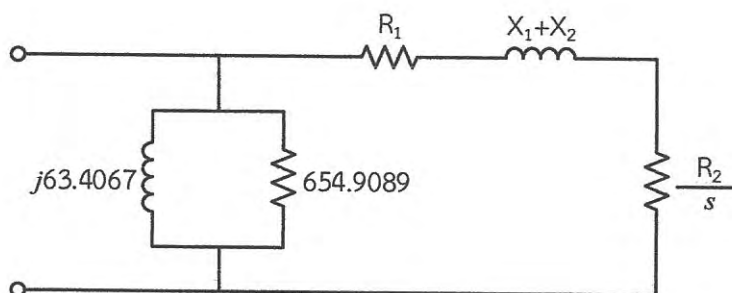
$$I_m = I_{nl} \sin \phi_{nl} = 3.487 \sin 84.47^\circ = 3.4708 \quad A$$

$$I_c = I_{nl} \cos \phi_{nl} = 3.487 \cos 84.47^\circ = 0.3360 \quad A$$

$$R_c = \frac{V_{nl}}{I_c} = \frac{220.07}{0.3360} = 654.9089 \quad \Omega$$

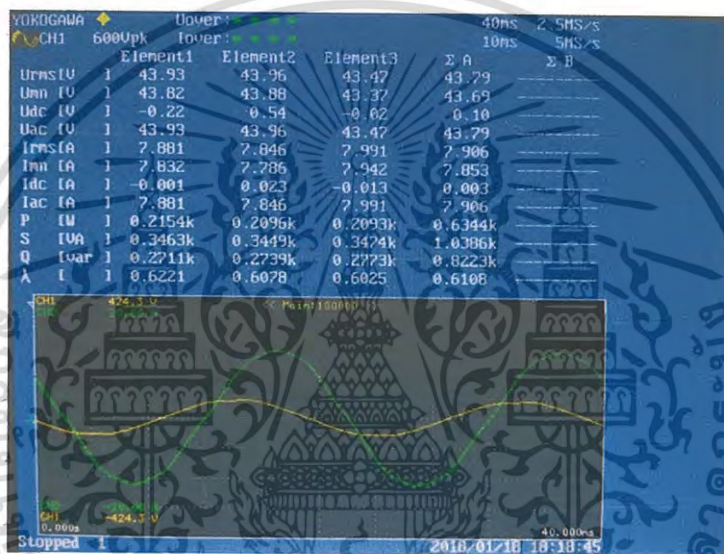
$$X_m = \frac{V_{nl}}{I_m} = \frac{220.07}{3.4708} = 63.4067 \quad \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล

(2) Block-rotor test



รูปที่ 4.46 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบ Block-rotor test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้าจากผู้ผลิต

Voltage (V)	Current (A)	Power factor	$\phi_{bl}$ (Degrees)
43.79	7.906	0.6108	52.35

จากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

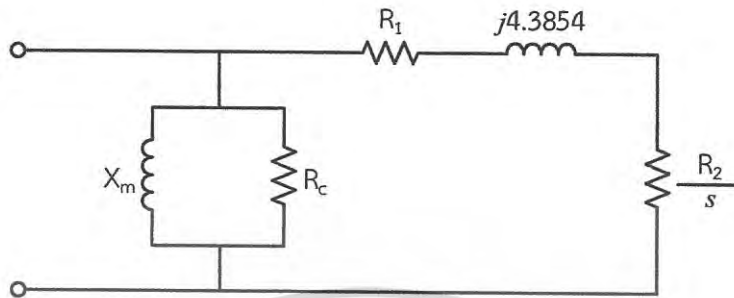
$$P_{bl} = 3V_{phase}I_{phase} \cos \phi_{bl} = 3 \times 43.79 \times 7.906 \times \cos 52.35^\circ = 634.4215 \quad W$$

$$Z_{bl} = \frac{V_{bl}}{I_{bl}} = \frac{43.79 \angle 0^\circ}{7.906 \angle -52.35^\circ} = 3.3833 + j4.3854 \quad \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{bl} = R_{bl} + jX_{bl}$$

$$R_{bl} = R_1 + R_2$$



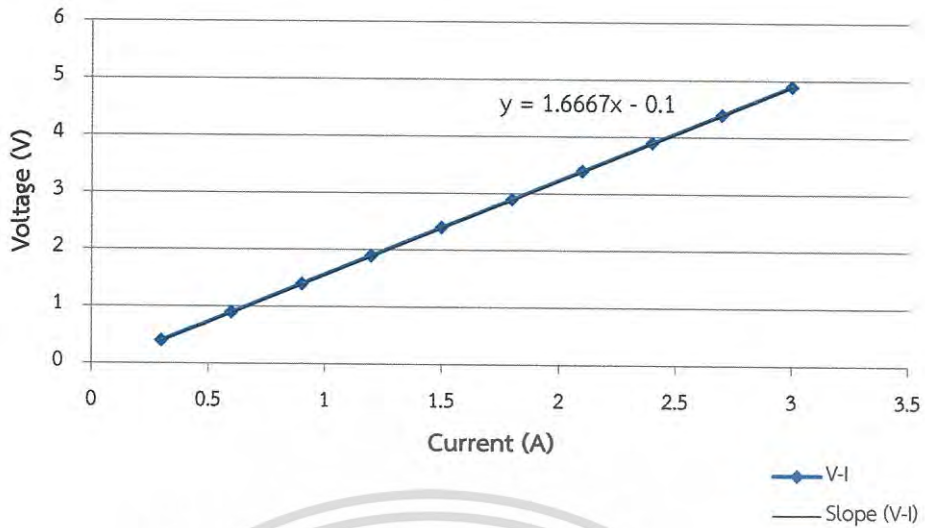
รูปที่ 4.47 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบยัดโรเตอร์

(3) V-I Method

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบ V-I Method ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้าจากผู้ผลิต

Current (A)	Voltage (V)
0.3	0.40
0.6	0.90
0.9	1.40
1.2	1.90
1.5	2.40
1.8	2.90
2.1	3.40
2.4	3.90
2.7	4.40
3.0	4.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสของการทดสอบ V-I Method

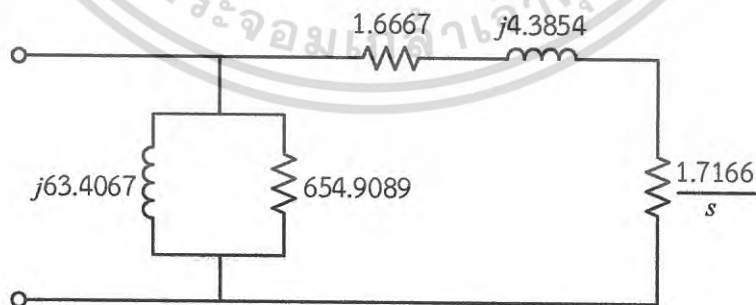
จากการทำ V-I Method จะได้

$$\text{slope} = R_1 = 1.6667 \, \Omega$$

ดังนั้น

$$R_2 = R_{bl} - R_1 = 3.3833 - 1.6667 = 1.7166 \, \Omega$$

จะได้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณ



รูปที่ 4.49 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.6 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่

##### (1) No-load test



รูปที่ 4.50 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบ No-load test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่

Voltage (V)	Current (A)	Power factor	$\phi_{nl}$ (Degrees)
110.19	5.630	0.1378	82.08

จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกลสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$P_{nl} = 3V_{phase} I_{phase} \cos \phi_{nl} = 3 \times 110.19 \times 5.630 \times \cos 82.08^\circ = 256.4428 \text{ W}$$

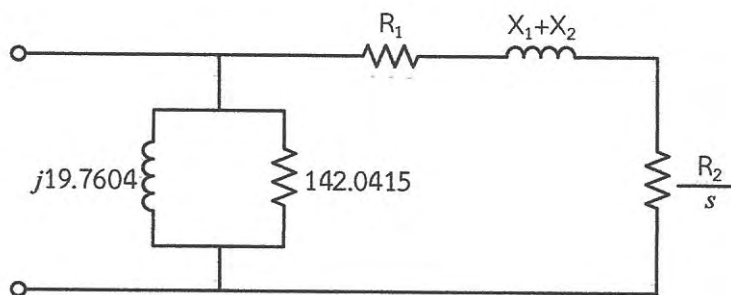
$$I_m = I_{nl} \sin \phi_{nl} = 5.630 \sin 82.08^\circ = 5.5763 \text{ A}$$

$$I_c = I_{nl} \cos \phi_{nl} = 5.630 \cos 82.08^\circ = 0.7758 \text{ A}$$

$$R_c = \frac{V_{nl}}{I_c} = \frac{110.19}{0.7758} = 142.0415 \text{ } \Omega$$

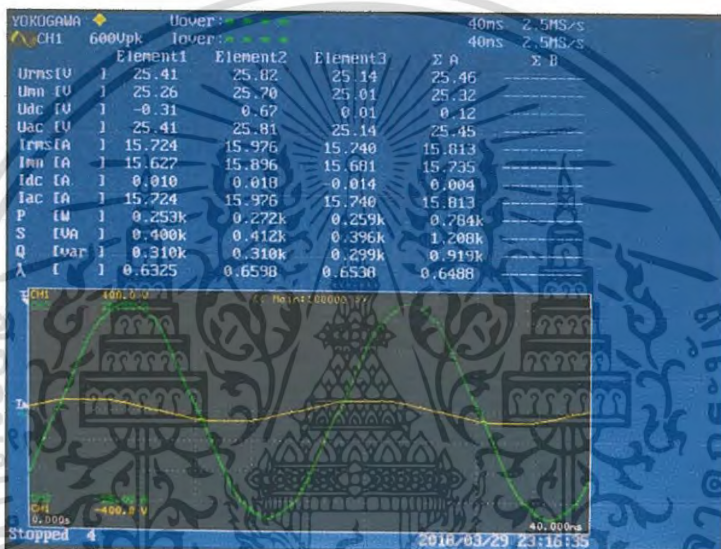
$$X_m = \frac{V_{nl}}{I_m} = \frac{110.19}{5.5763} = 19.7604 \text{ } \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.51 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล

(2) Block-rotor test



รูปที่ 4.52 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบ Block-rotor test ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า ที่พื่นขดลวดใหม่

Voltage (V)	Current (A)	Power factor	$\phi_{bl}$ (Degrees)
25.46	15.813	0.6488	49.55

จากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

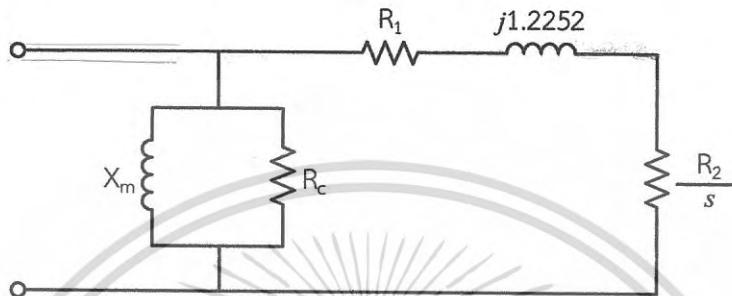
$$P_{bl} = 3V_{phase}I_{phase} \cos \phi_{bl} = 3 \times 25.46 \times 15.813 \times \cos 49.55^\circ = 783.5996 \text{ W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{bl} = \frac{V_{bl}}{I_{bl}} = \frac{25.46 \angle 0^\circ}{15.813 \angle -49.55^\circ} = 1.0445 + j1.2252 \quad \Omega$$

$$Z_{bl} = R_{bl} + jX_{bl}$$

$$R_{bl} = R_1 + R_2$$



รูปที่ 4.53 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณจากการทดสอบแบบยัดโรเตอร์

(3) การวัดความต้านทานขดลวดอาร์มาเจอร์โดยใช้เครื่อง Digital Low Resistance Ohmmeter (DLRO)



รูปที่ 4.54 ค่าความต้านทานขดลวดอาร์มาเจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

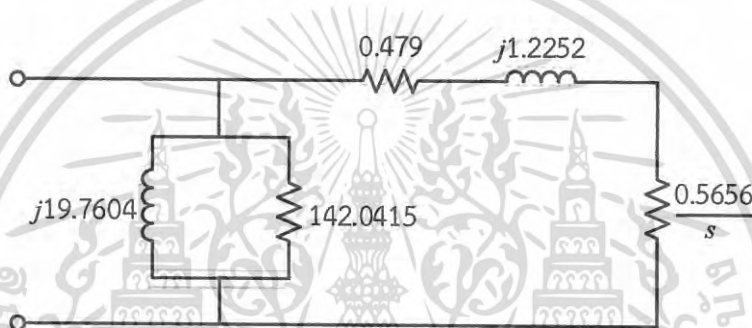
จากการวัดค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์โดยใช้เครื่อง Digital Low Resistance Ohmmeter (DLRO) จะได้ว่า

$$R_1 = 0.479 \quad \Omega$$

ดังนั้น

$$R_2 = R_{bl} - R_1 = 1.0445 - 0.479 = 0.5656 \quad \Omega$$

จะได้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณ



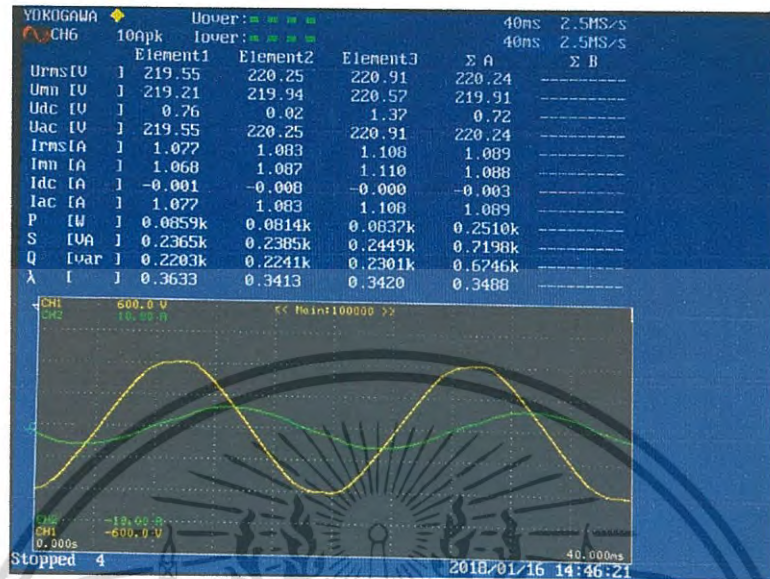
รูปที่ 4.55 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณ

#### 4.2.7 อภิปรายผลการทดลอง

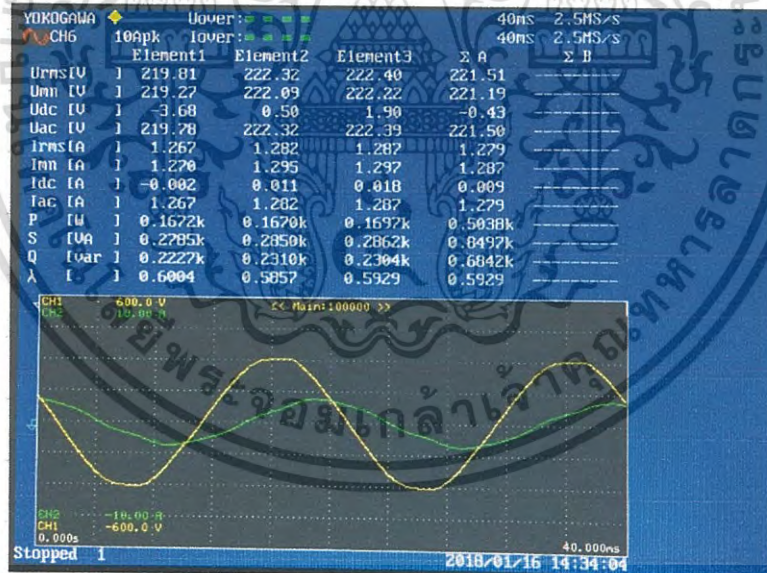
จากผลการทดสอบหาจอร์สมมูลแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อพิจารณาค่า armature resistance ( $R_1$ ) พบว่ามอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าจากผู้ผลิตวัดค่า  $R_1$  ได้เท่ากับ 8.5897  $\Omega$  ส่วนมอเตอร์ที่พันขดลวดใหม่วัดค่า  $R_1$  ได้เท่ากับ 2.1657  $\Omega$  ซึ่งลดลง 3.97 เท่าของมอเตอร์จากผู้ผลิต สำหรับมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าจากผู้ผลิตวัดค่า  $R_1$  ได้เท่ากับ 3.3475  $\Omega$  ส่วนมอเตอร์ที่พันขดลวดใหม่วัดค่า  $R_1$  ได้เท่ากับ 0.9535  $\Omega$  ซึ่งลดลง 3.51 เท่าของมอเตอร์จากผู้ผลิต และมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าจากผู้ผลิตวัดค่า  $R_1$  ได้เท่ากับ 1.6667  $\Omega$  ส่วนมอเตอร์ที่พันขดลวดใหม่วัดค่า  $R_1$  ได้เท่ากับ 0.479  $\Omega$  ซึ่งลดลง 3.48 เท่าของมอเตอร์จากผู้ผลิต

### 4.3 ผลการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

#### 4.3.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้าจากผู้ผลิต

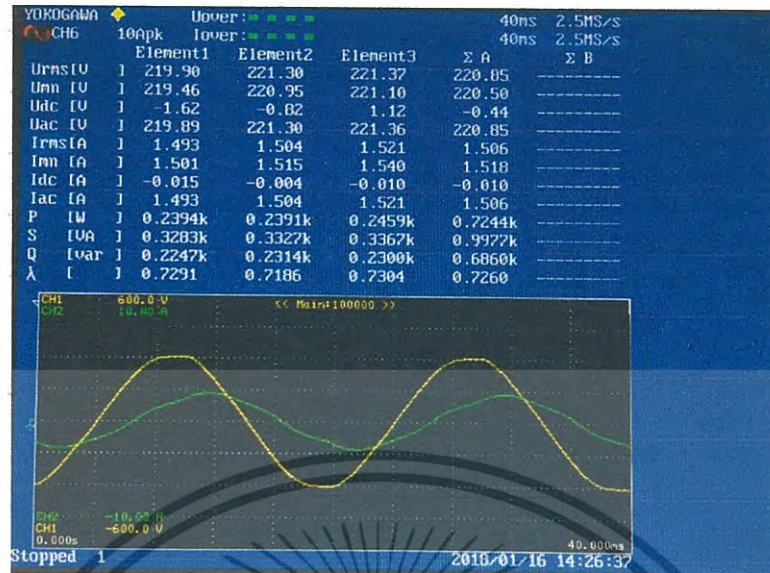


รูปที่ 4.56 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 25% ของพิกัด

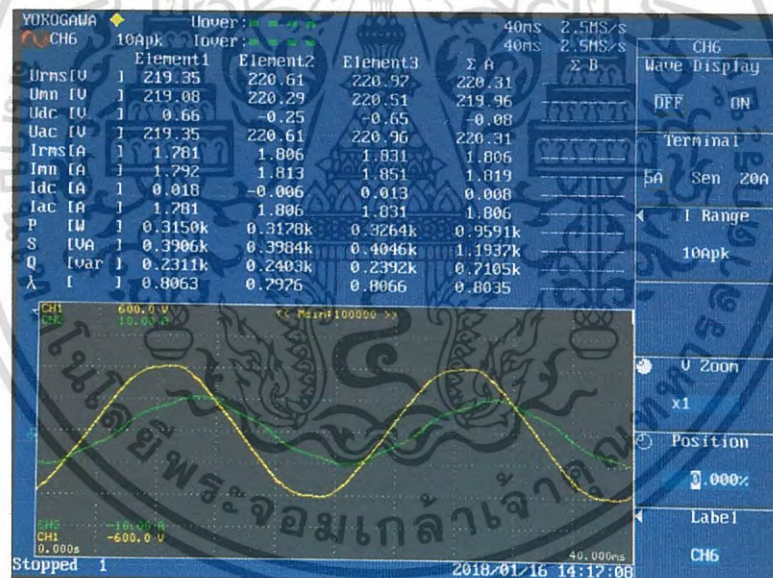


รูปที่ 4.57 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 50% ของพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.58 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 75% ของพิกัด



รูปที่ 4.59 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 100% ของพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้าจากผู้ผลิตที่แรงดัน 220 V 50 Hz

Parameter		Percent of Rated			
		25%	50%	75%	100%
Input	Voltage (V)	220.24	221.51	220.85	220.31
	Current (A)	1.089	1.279	1.506	1.806
	Power factor	0.3488	0.5929	0.726	0.8035
	Power (W)	251	503.8	724.4	959.1
Output	Speed (rpm)	1480	1458	1432	1402
	Torque (N-m)	1.176	2.450	3.724	5.096
	Power (W)	182.26	374.07	558.45	748.18
Efficiency (%)		72.61	74.25	77.09	78.01

#### 4.3.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่

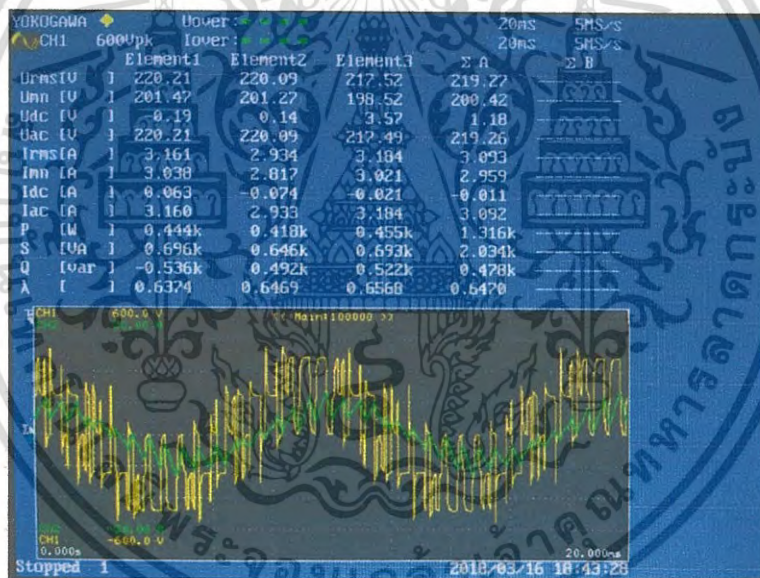


รูปที่ 4.60 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 25% ของพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.61 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 50% ของพิกัด



รูปที่ 4.62 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 75% ของพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

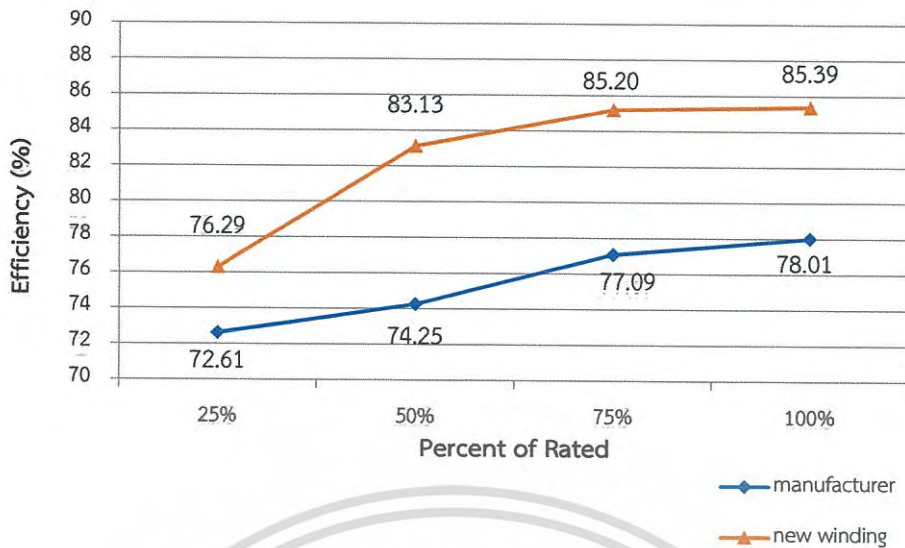


รูปที่ 4.63 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 100% ของพิกัด

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า ที่พื่นขดลวดใหม่ ที่แรงดัน 220 V 100 Hz

Parameter		Percent of Rated			
		25%	50%	75%	100%
Input	Voltage (V)	224.63	220.6	219.27	215.95
	Current (A)	1.686	2.306	3.093	3.872
	Power factor	0.4566	0.592	0.647	0.6704
	Power (W)	519	903	1316	1682
Output	Speed (rpm)	2968	2926	2875	2856
	Torque (N-m)	1.274	2.450	3.724	4.802
	Power (W)	395.97	750.70	1121.18	1436.18
Efficiency (%)		76.29	83.13	85.20	85.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



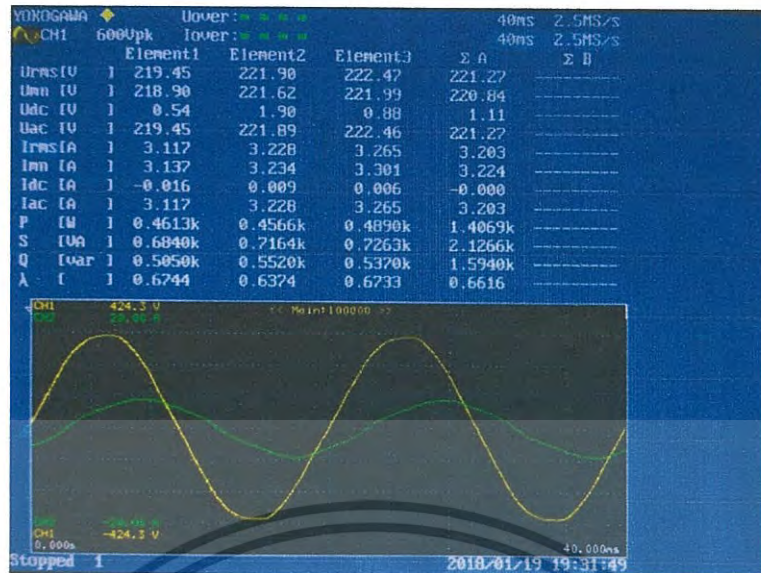
รูปที่ 4.64 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและโหลดต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 1 แรงม้าจากผู้ผลิตและที่พันขดลวดใหม่

#### 4.3.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าจากผู้ผลิต

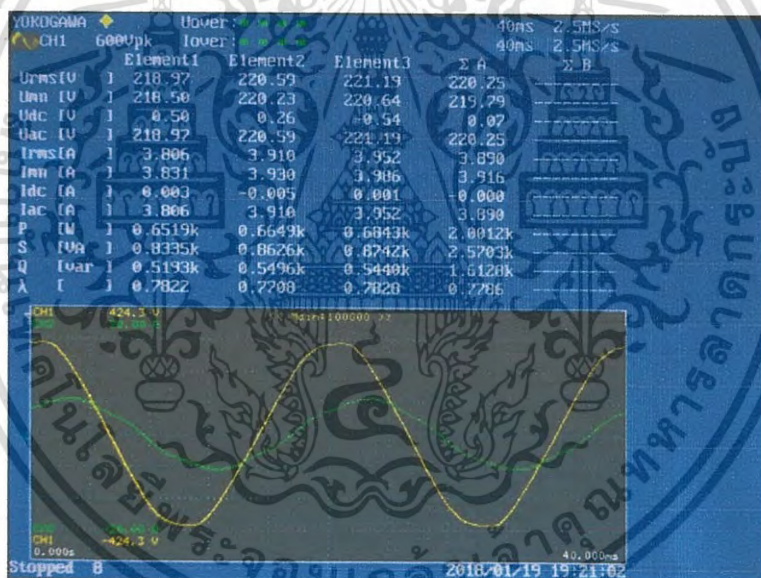


รูปที่ 4.65 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 25% ของฟักัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

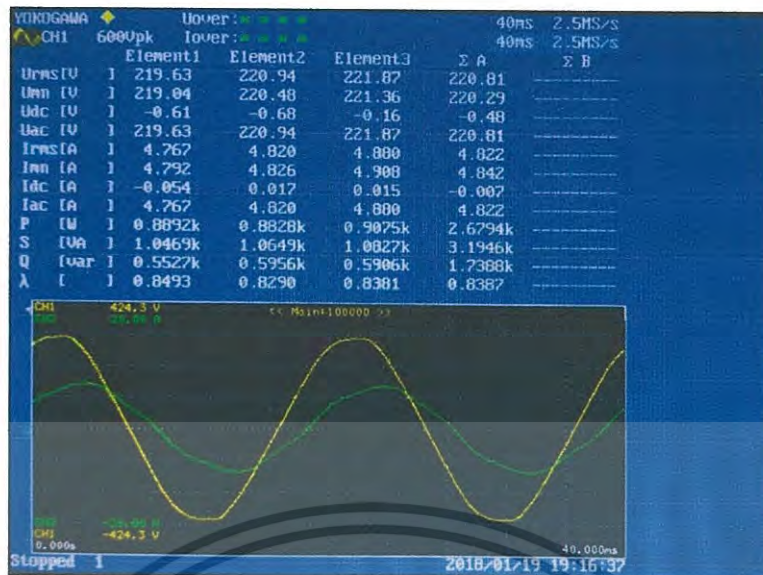


รูปที่ 4.66 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 50% ของพิกัด



รูปที่ 4.67 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 75% ของพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



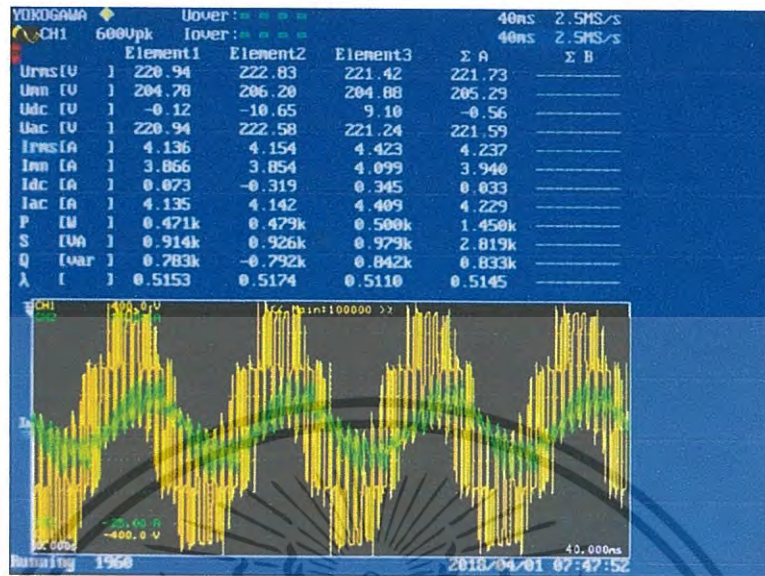
รูปที่ 4.68 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 100% ของพิกัด

ตารางที่ 4.21 ผลการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าจากผู้ผลิตที่แรงดัน 220 V 50 Hz

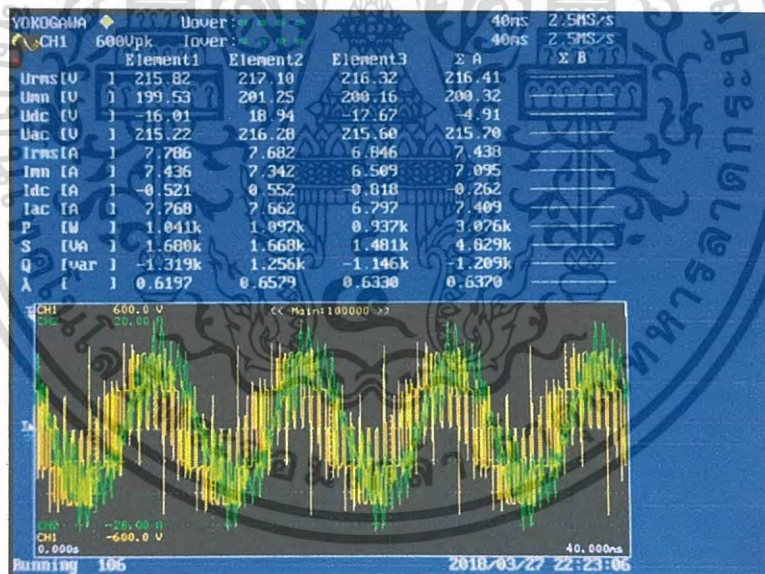
Parameter		Percent of Rated			
		25%	50%	75%	100%
Input	Voltage (V)	220.02	221.27	220.25	220.81
	Current (A)	2.608	3.203	3.89	4.822
	Power factor	0.42	0.66	0.77	0.83
	Power (W)	727.4	1407	2001	2679
Output	Speed (rpm)	1484	1463	1442	1420
	Torque (N-m)	3.626	7.350	10.878	14.994
	Power (W)	563.50	1126.06	1642.64	2229.64
Efficiency (%)		77.47	80.03	82.09	83.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าที่พื้นขดลวดใหม่

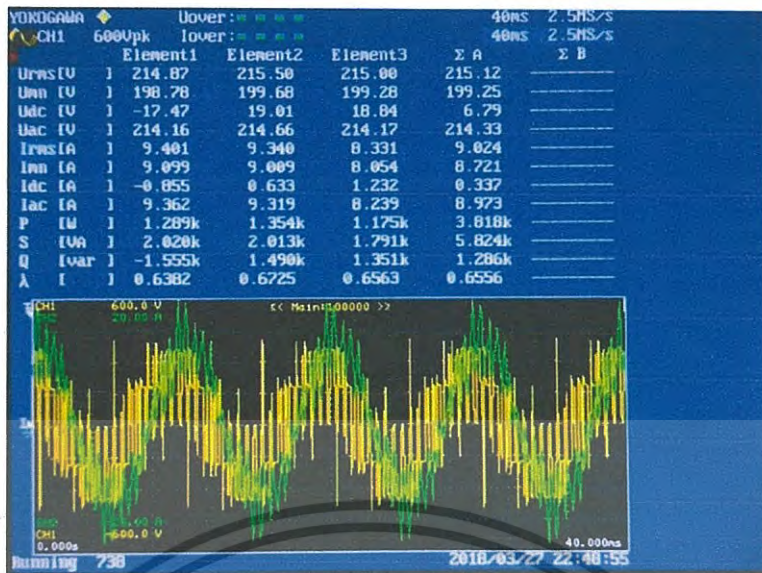


รูปที่ 4.69 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 25% ของพิกัด

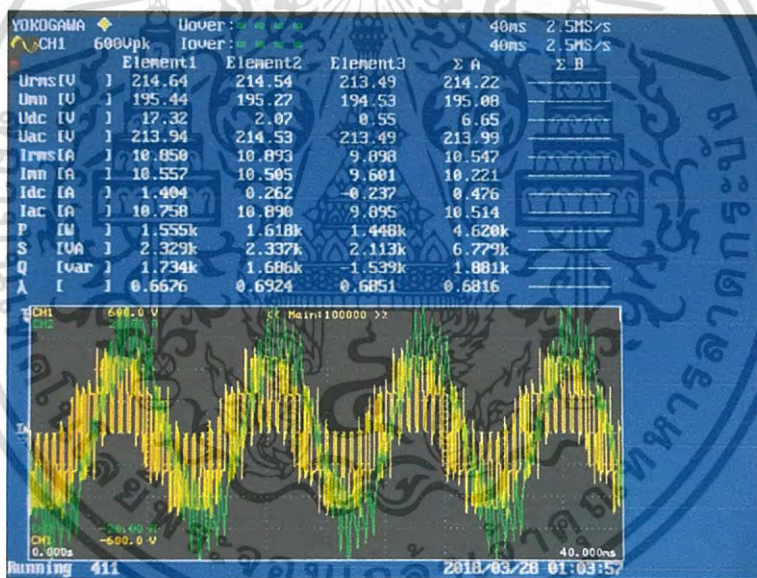


รูปที่ 4.70 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 50% ของพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.71 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 75% ของพิกัด

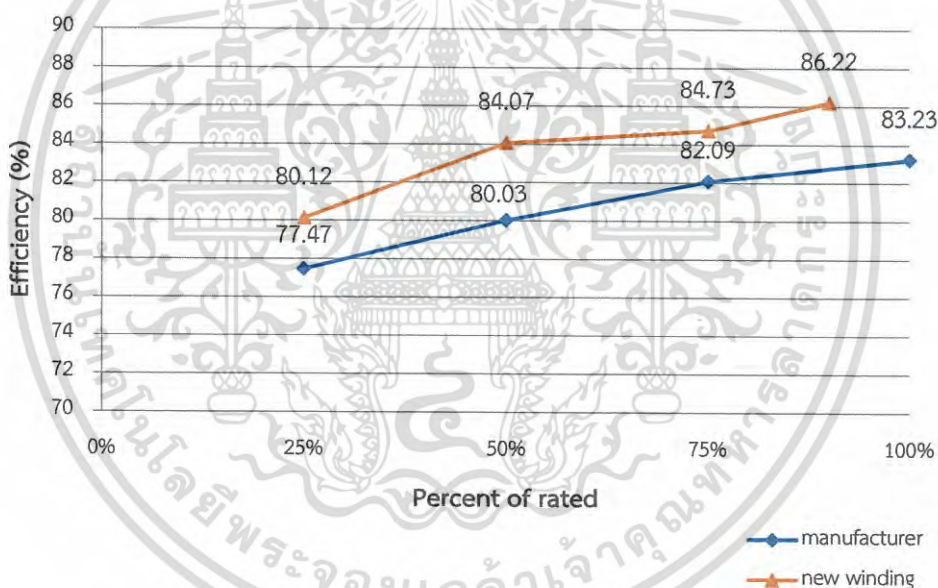


รูปที่ 4.72 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 100% ของพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 ผลการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า ที่พื้นที่ทดลองใหม่ ที่แรงดัน 220 V 100 Hz

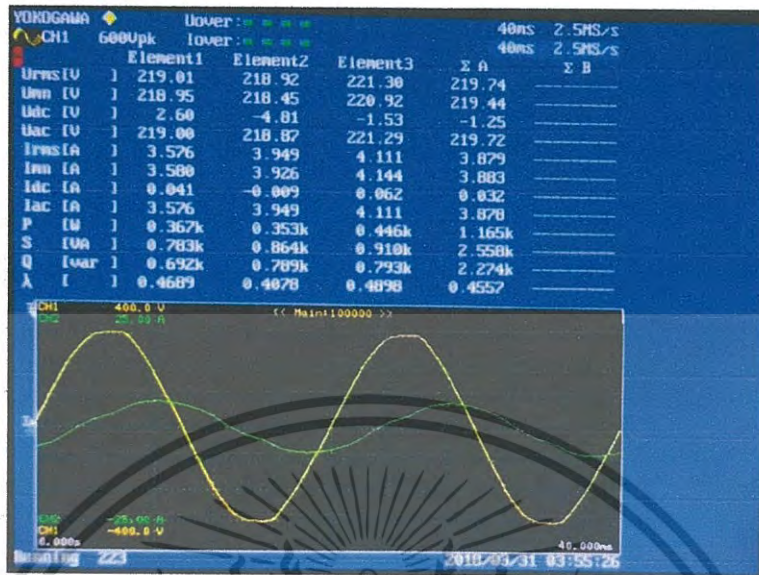
Parameter		Percent of Rated			
		25%	50%	75%	90%
Input	Voltage (V)	221.73	216.41	215.12	214.22
	Current (A)	4.237	7.438	9.2	10.547
	Power factor	0.5145	0.637	0.6556	0.6816
	Power (W)	1450	3076	3818	4620
Output	Speed (rpm)	2979	2930	2892	2854
	Torque (N-m)	3.724	8.428	10.682	13.328
	Power (W)	1161.74	2585.95	3235.04	3983.34
Efficiency (%)		80.12	84.07	84.73	86.22



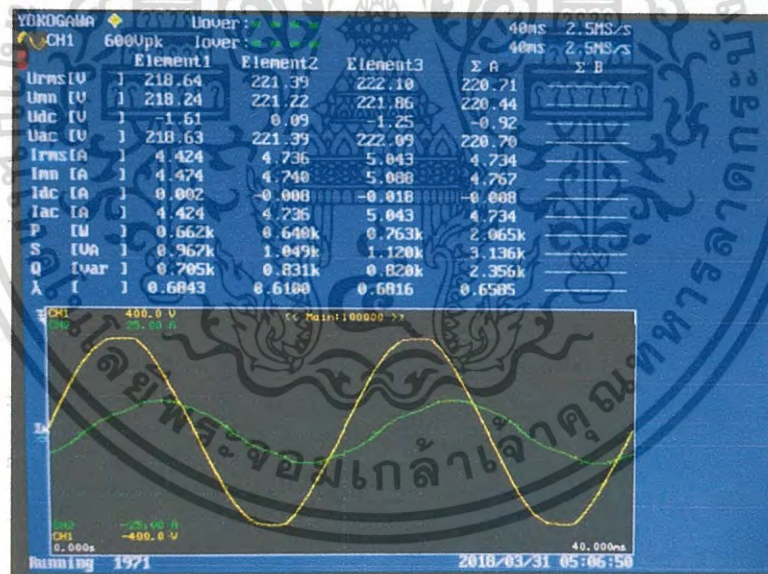
รูปที่ 4.73 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและโหลดต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้าจากผู้ผลิตและที่พื้นที่ทดลองใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.5 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้าจากผู้ผลิต

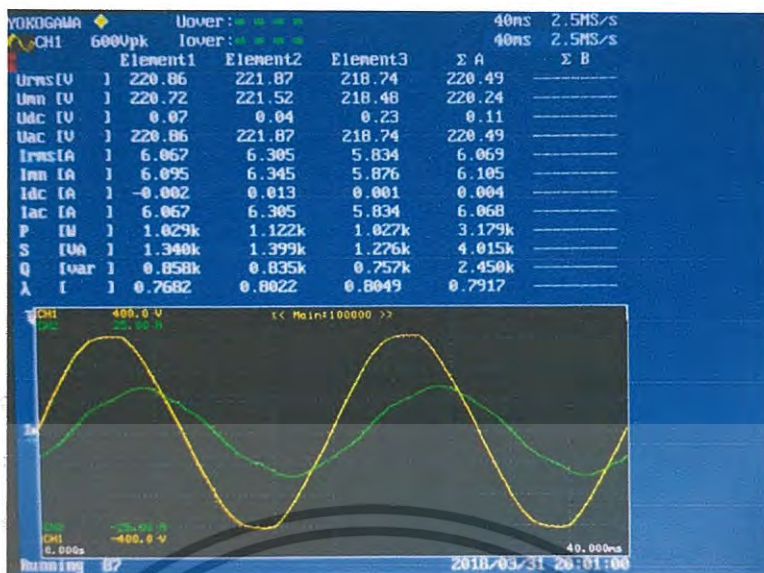


รูปที่ 4.74 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 25% ของพิกัด



รูปที่ 4.75 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 50% ของพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



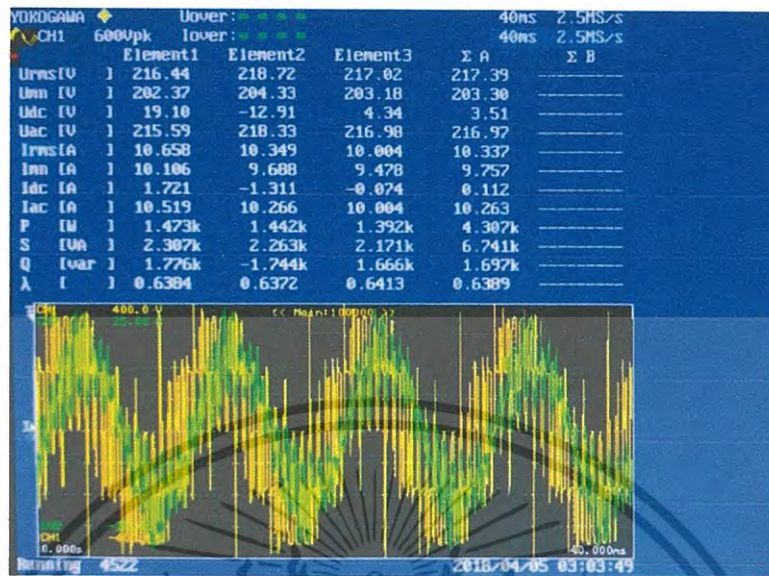
รูปที่ 4.76 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 75% ของพิกัด

ตารางที่ 4.23 ผลการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้าจากผู้ผลิตที่แรงดัน 220 V 50 Hz

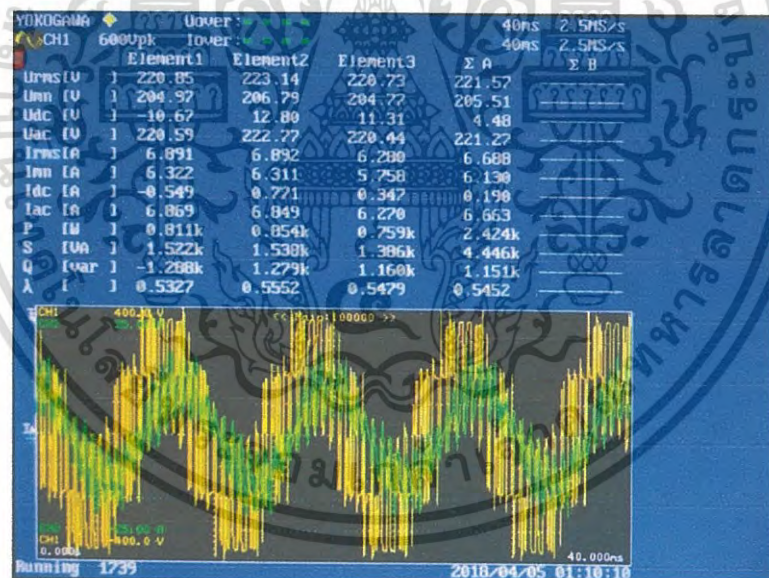
Parameter		Percent of Rated		
		25%	50%	75%
Input	Voltage (V)	219.74	220.71	220.49
	Current (A)	3.879	4.734	6.069
	Power factor	0.4557	0.6585	0.7917
	Power (W)	1165	2065	3179
Output	Speed (rpm)	1486	1475	1460
	Torque (N-m)	5.880	11.368	17.934
	Power (W)	915.01	1755.92	2741.94
Efficiency (%)		78.54	85.03	86.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.6 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้าที่พื้นขดลวดใหม่

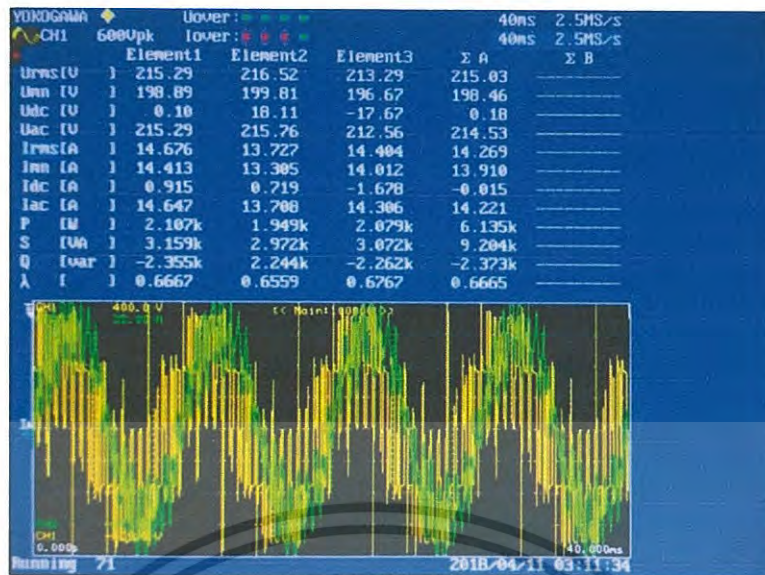


รูปที่ 4.77 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 25% ของพิกัด



รูปที่ 4.78 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 50% ของพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

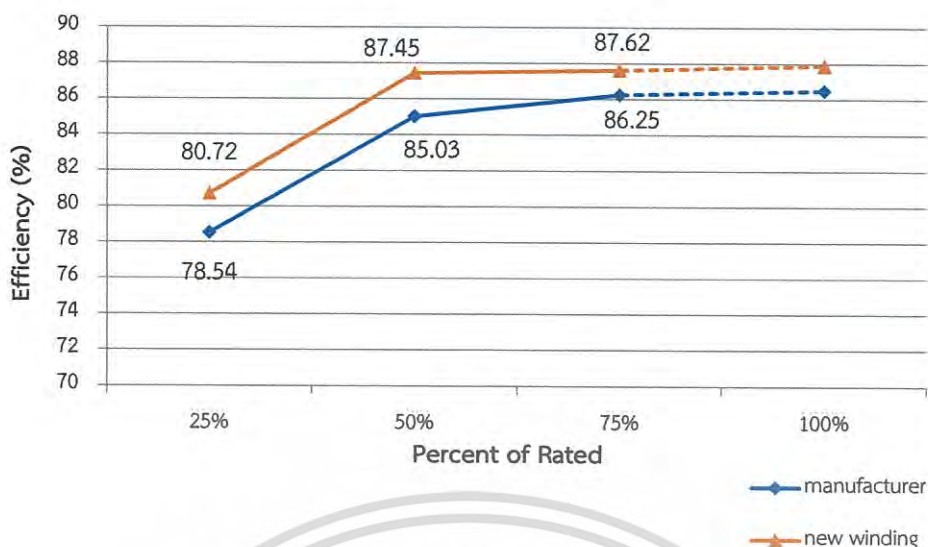


รูปที่ 4.79 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ภาระ 75% ของพิกัด

ตารางที่ 4.24 ผลการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า ที่ผันขดลวดใหม่ ที่แรงดัน 220 V 100 Hz

Parameter		Percent of Rated		
		25%	50%	75%
Input	Voltage (V)	221.57	217.39	215.03
	Current (A)	6.688	10.337	14.269
	Power factor	0.5452	0.6389	0.6665
	Power (W)	2424	4307	6135
Output	Speed (rpm)	2979	2936	2894
	Torque (N-m)	6.272	12.250	17.738
	Power (W)	1956.61	3766.35	5375.66
Efficiency (%)		80.72	87.45	87.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.80 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและโหลดต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 5 แรงม้าจากผู้ผลิตและที่พันขดลวดใหม่

#### 4.3.7 อภิปรายผลการทดลอง

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพบว่า เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์จากผู้ผลิต ทดสอบที่แรงดัน 220 V 50 Hz กับมอเตอร์ที่พันขดลวดใหม่ ทดสอบที่แรงดัน 220 V 100 Hz ขนาด 1 แรงม้า ค่าประสิทธิภาพในแต่ละเปอร์เซ็นต์โหลดเพิ่มขึ้นจาก 72.61%, 74.25%, 77.09% และ 78.01% เป็น 76.29%, 83.13%, 85.20% และ 85.39% ตามลำดับ สำหรับมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ค่าประสิทธิภาพในแต่ละเปอร์เซ็นต์โหลดเพิ่มขึ้นจาก 77.47%, 80.03%, 82.09% และ 83.23% เป็น 80.12%, 84.07%, 84.73% และ 86.22% ตามลำดับ และมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ค่าประสิทธิภาพในแต่ละเปอร์เซ็นต์โหลดเพิ่มขึ้นจาก 78.54%, 85.03% และ 86.25% เป็น 80.72%, 87.45% และ 87.62% ตามลำดับ

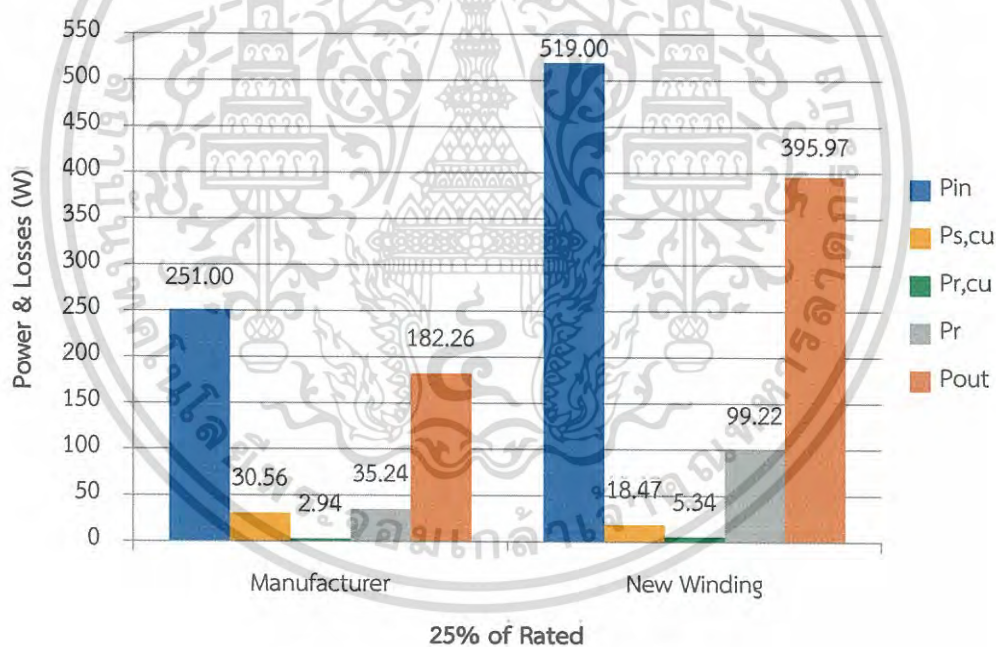
#### 4.4 กำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

##### 4.4.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า

(1) กำลังไฟฟ้าและความสูญเสียที่โหลด 25% ของพิกัด

ตารางที่ 4.25 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ที่โหลด 25% ของพิกัด

Losses (W)	25% Load	
	Manufacturer	New Winding
Input power ( $P_{in}$ )	251.00	519.00
Stator copper loss ( $P_{s, cu}$ )	30.56	18.47
Rotor copper loss ( $P_{r, cu}$ )	2.94	5.34
Rotational and Core loss ( $P_r$ )	35.24	99.22
Output power ( $P_{out}$ )	182.26	395.97



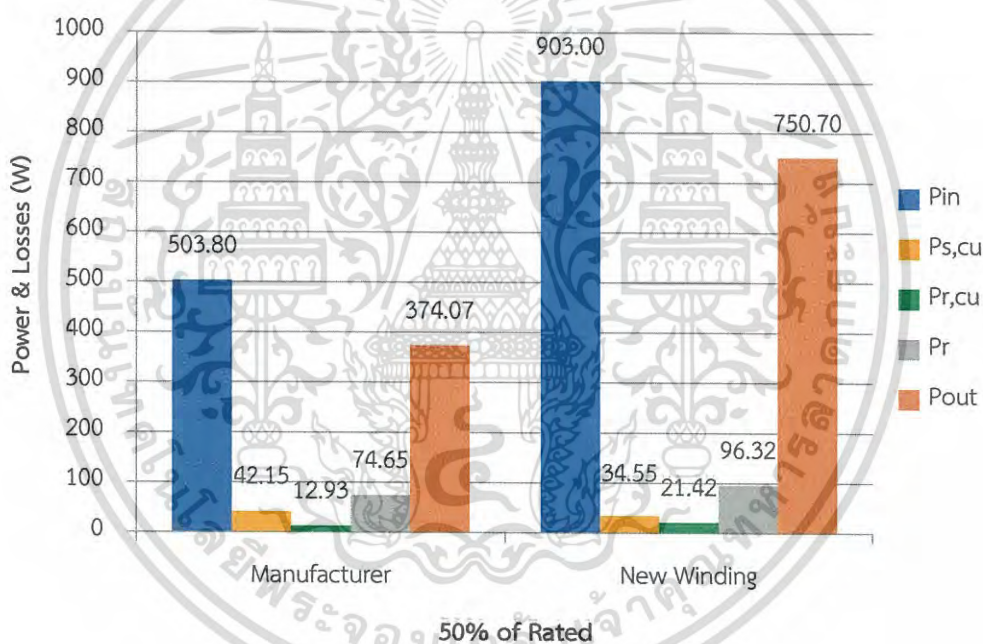
รูปที่ 4.81 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับพันขดลวดใหม่ ที่โหลด 25% ของพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (2) กำลังไฟฟ้าและความสูญเสียที่โหลด 50% ของพิกัด

ตารางที่ 4.26 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ที่โหลด 50% ของพิกัด

Losses (W)	50% Load	
	Manufacturer	New Winding
Input power ( $P_{in}$ )	503.80	903.00
Stator copper loss ( $P_{s,cu}$ )	42.15	34.55
Rotor copper loss ( $P_{r,cu}$ )	12.93	21.42
Rotational and Core loss ( $P_r$ )	74.65	96.32
Output power ( $P_{out}$ )	374.07	750.70



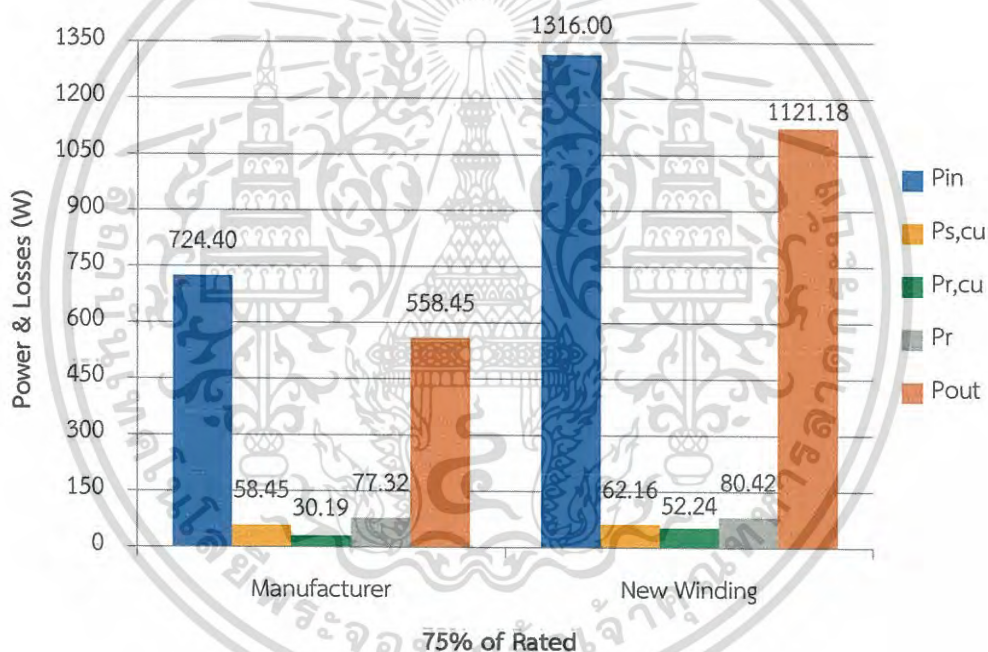
รูปที่ 4.82 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับพันขดลวดใหม่ ที่โหลด 50% ของพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (3) กำลังไฟฟ้าและความสูญเสียที่โหลด 75% ของพิกัด

ตารางที่ 4.27 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ที่โหลด 75% ของพิกัด

Losses (W)	75% Load	
	Manufacturer	New Winding
Input power ( $P_{in}$ )	724.40	1316.00
Stator copper loss ( $P_{s,cu}$ )	58.45	62.16
Rotor copper loss ( $P_{r,cu}$ )	30.19	52.24
Rotational and Core loss ( $P_r$ )	77.32	80.42
Output power ( $P_{out}$ )	558.45	1121.18



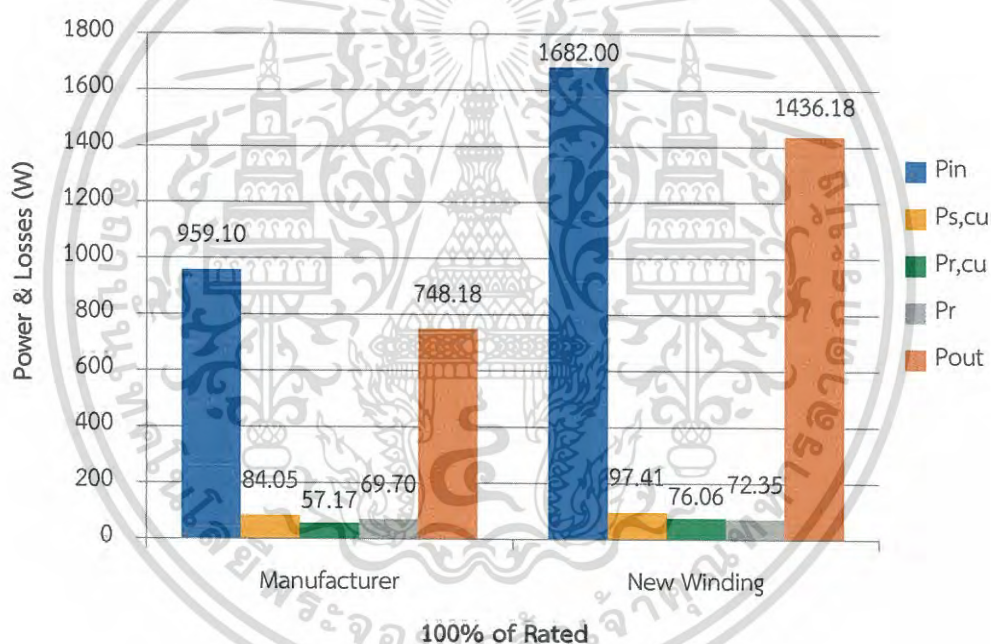
รูปที่ 4.83 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับพันขดลวดใหม่ ที่โหลด 75% ของพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (4) กำลังไฟฟ้าและความสูญเสียที่โหลด 100% ของพิกัด

ตารางที่ 4.28 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ที่โหลด 100% ของพิกัด

Losses (W)	100% Load	
	Manufacturer	New Winding
Input power ( $P_{in}$ )	959.10	1682.00
Stator copper loss ( $P_{s,cu}$ )	84.05	97.41
Rotor copper loss ( $P_{r,cu}$ )	57.17	76.06
Rotational and Core loss ( $P_r$ )	69.70	72.35
Output power ( $P_{out}$ )	748.18	1436.18



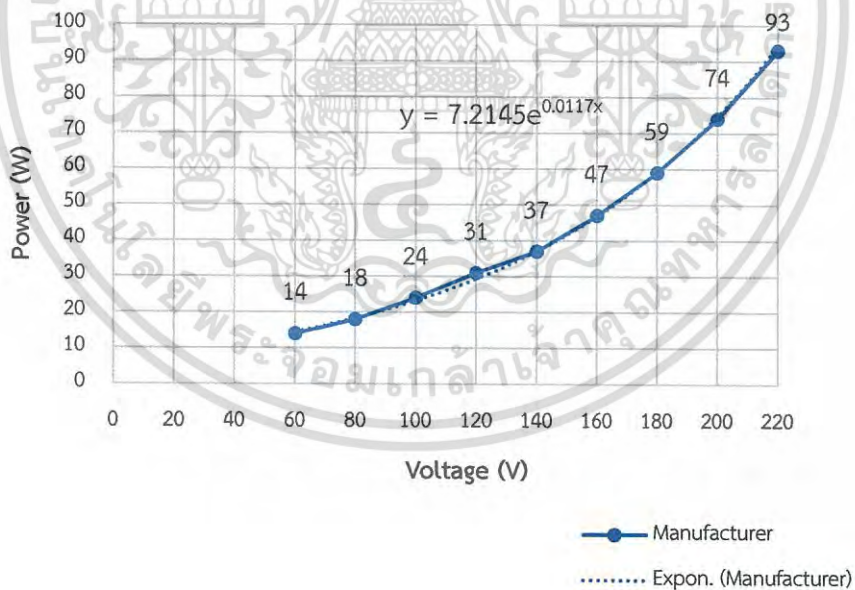
รูปที่ 4.84 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับพันขดลวดใหม่ ที่โหลด 100% ของพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (5) ความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์ 1 แรงม้า

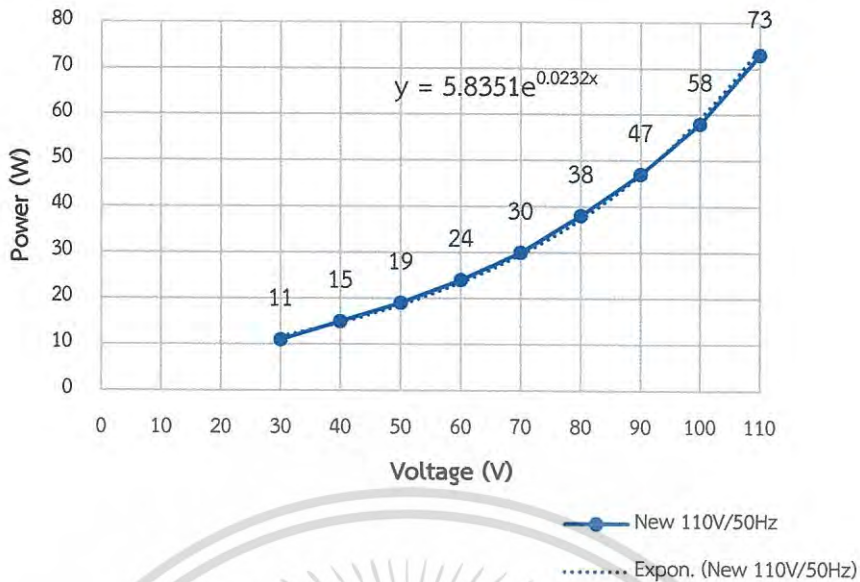
ตารางที่ 4.29 ค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า

Manufacturer			New 110V/50Hz		
Volt (V)	Power (W)	Speed rpm	Volt (V)	Power (W)	Speed rpm
220	93	1497	110	73	1500
200	74	1500	100	58	1496
180	59	1499	90	47	1498
160	47	1497	80	38	1498
140	37	1498	70	30	1498
120	31	1497	60	24	1499
100	24	1497	50	19	1500
80	18	1497	40	15	1498
60	14	1491	30	11	1495
40	11	1478	20	8	1488
20	8	1399	10	6	1426



รูปที่ 4.85 กราฟค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าจากผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.86 กราฟค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่

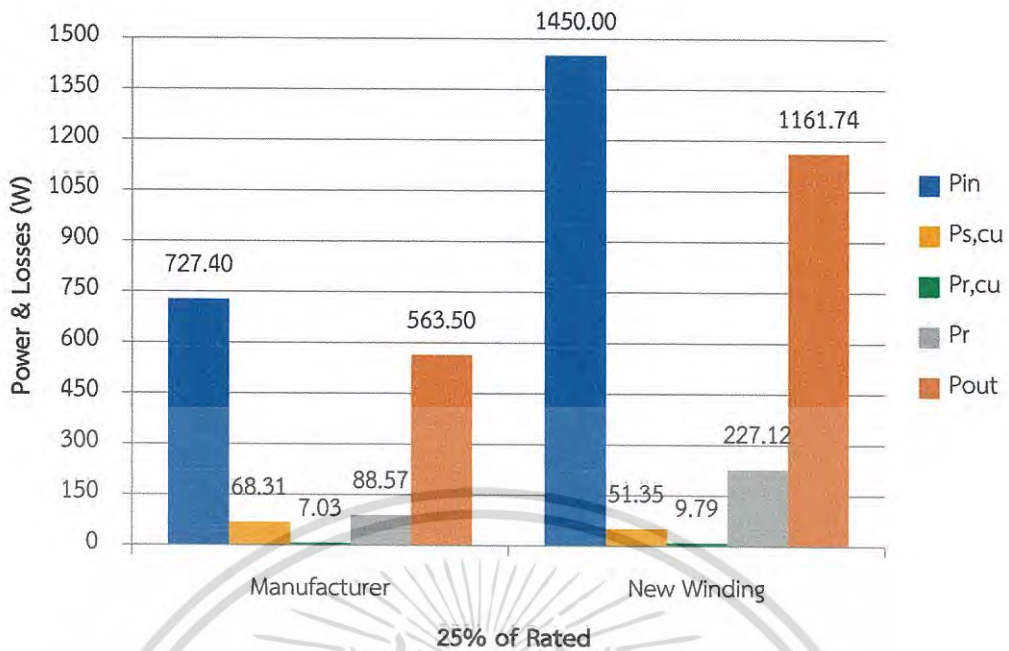
#### 4.4.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า

(1) กำลังไฟฟ้าและความสูญเสียที่โหลด 25% ของพิกัด

ตารางที่ 4.30 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ที่โหลด 25% ของพิกัด

Losses (W)	25% Load	
	Manufacturer	New Winding
Input power ( $P_{in}$ )	727.40	1450.00
Stator copper loss ( $P_{s,cu}$ )	68.31	51.35
Rotor copper loss ( $P_{r,cu}$ )	7.03	9.79
Rotational and Core loss ( $P_r$ )	88.57	227.12
Output power ( $P_{out}$ )	563.50	1161.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



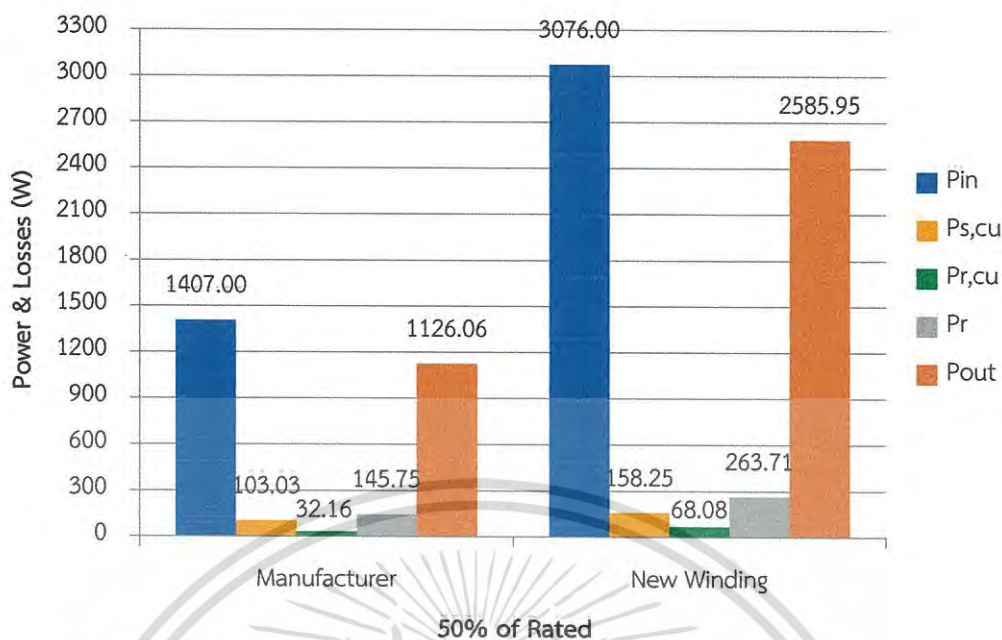
รูปที่ 4.87 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับพันขดลวดใหม่ ที่โหลด 25% ของพิกัด

(2) กำลังไฟฟ้าและความสูญเสียที่โหลด 50% ของพิกัด

ตารางที่ 4.31 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ที่โหลด 50% ของพิกัด

Losses (W)	50% Load	
	Manufacturer	New Winding
Input power ( $P_{in}$ )	1407.00	3076.00
Stator copper loss ( $P_{s, cu}$ )	103.03	158.25
Rotor copper loss ( $P_{r, cu}$ )	32.16	68.08
Rotational and Core loss ( $P_r$ )	145.75	263.71
Output power ( $P_{out}$ )	1126.06	2585.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



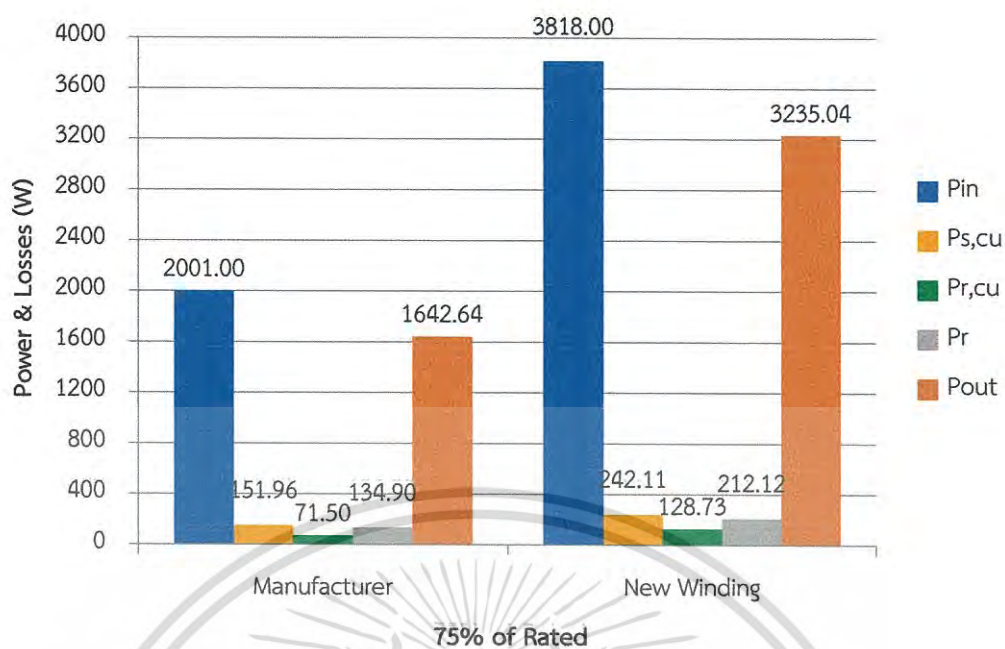
รูปที่ 4.88 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับพันขดลวดใหม่ ที่โหลด 50% ของพิกัด

(3) กำลังไฟฟ้าและความสูญเสียที่โหลด 75% ของพิกัด

ตารางที่ 4.32 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ที่โหลด 75% ของพิกัด

Losses (W)	75% Load	
	Manufacturer	New Winding
Input power ( $P_{in}$ )	2001.00	3818.00
Stator copper loss ( $P_{s,cu}$ )	151.96	242.11
Rotor copper loss ( $P_{r,cu}$ )	71.50	128.73
Rotational and Core loss ( $P_r$ )	134.90	212.12
Output power ( $P_{out}$ )	1642.64	3235.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



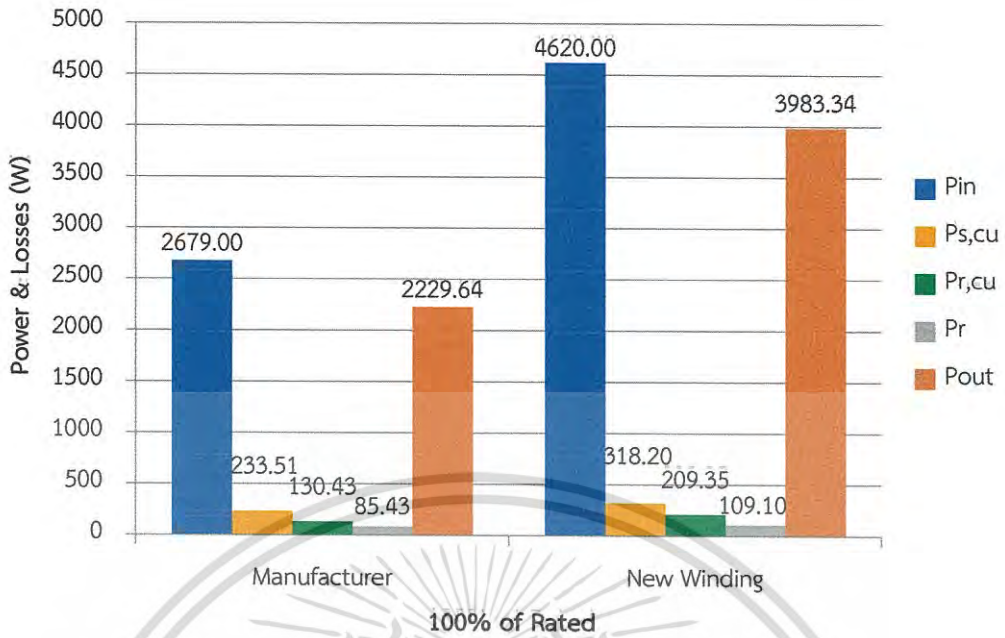
รูปที่ 4.89 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับพันขดลวดใหม่ ที่โหลด 75% ของพิกัด

(4) กำลังไฟฟ้าและความสูญเสียที่โหลด 100% ของพิกัด

ตารางที่ 4.33 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ที่โหลด 100% ของพิกัด

Losses (W)	100% Load	
	Manufacturer	New Winding
Input power ( $P_{in}$ )	2679.00	4620.00
Stator copper loss ( $P_{s,cu}$ )	233.51	318.20
Rotor copper loss ( $P_{r,cu}$ )	130.43	209.35
Rotational and Core loss ( $P_r$ )	85.43	109.10
Output power ( $P_{out}$ )	2229.64	3983.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



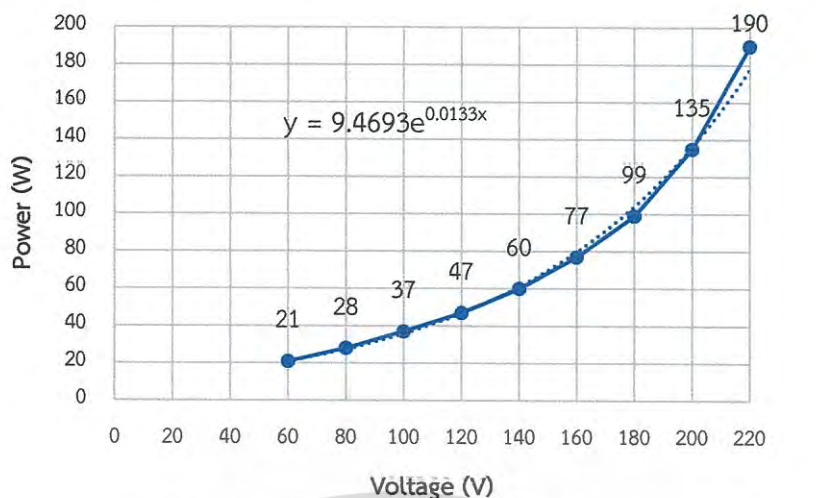
รูปที่ 4.90 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับพันขดลวดใหม่ ที่โหลด 100% ของพิกัด

(5) ความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์ 3 แรงม้า

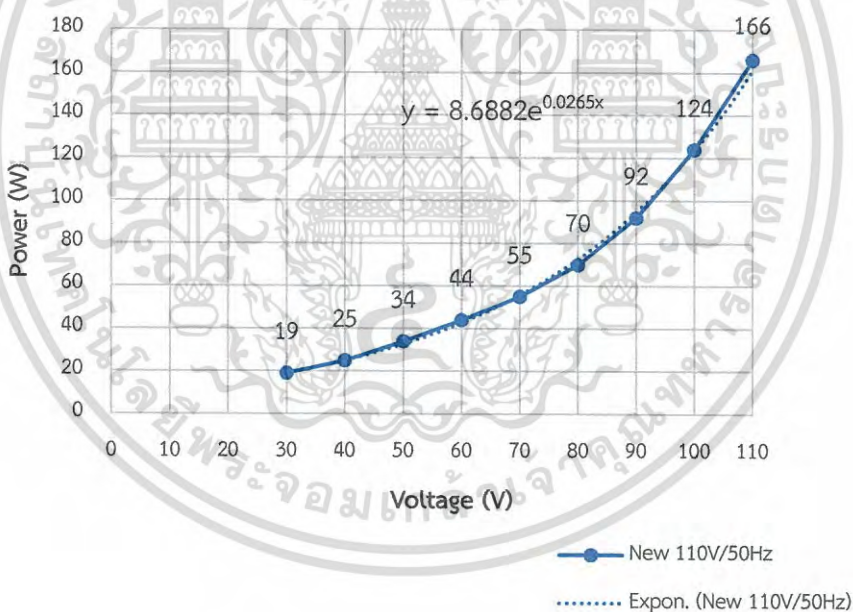
ตารางที่ 4.34 ค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 3 แรงม้า

Manufacturer			New 110V/50Hz		
Volt (V)	Power (W)	Speed rpm	Volt (V)	Power (W)	Speed rpm
220	190	1500	110	166	1498
200	135	1500	100	124	1498
180	99	1500	90	92	1498
160	77	1500	80	70	1498
140	60	1500	70	55	1498
120	47	1500	60	44	1498
100	37	1500	50	34	1498
80	28	1500	40	25	1498
60	21	1496	30	19	1498
40	15	1493	20	14	1493
20	12	1462	10	11	1466

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.91 กราฟค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าจากผู้ผลิต



รูปที่ 4.92 กราฟค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าที่ปรับขดลวดใหม่

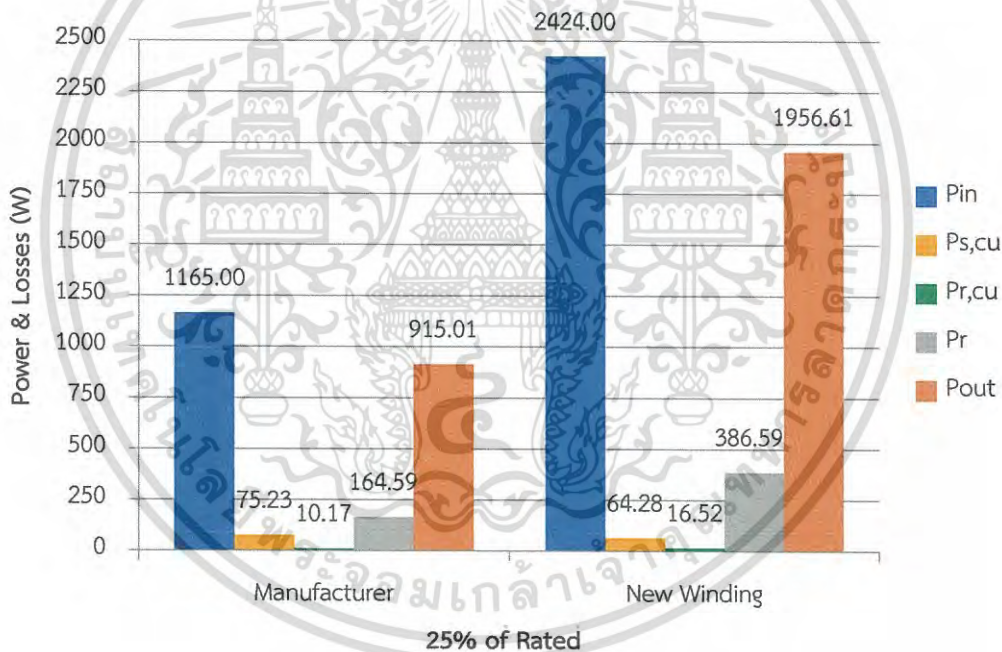
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า

(1) กำลังไฟฟ้าและความสูญเสียที่โหลด 25% ของพิกัด

ตารางที่ 4.35 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ที่โหลด 25% ของพิกัด

Losses (W)	25% Load	
	Manufacturer	New Winding
Input power ( $P_{in}$ )	1165.00	2424.00
Stator copper loss ( $P_{s, cu}$ )	75.23	64.28
Rotor copper loss ( $P_{r, cu}$ )	10.17	16.52
Rotational and Core loss ( $P_r$ )	164.59	386.59
Output power ( $P_{out}$ )	915.01	1956.61



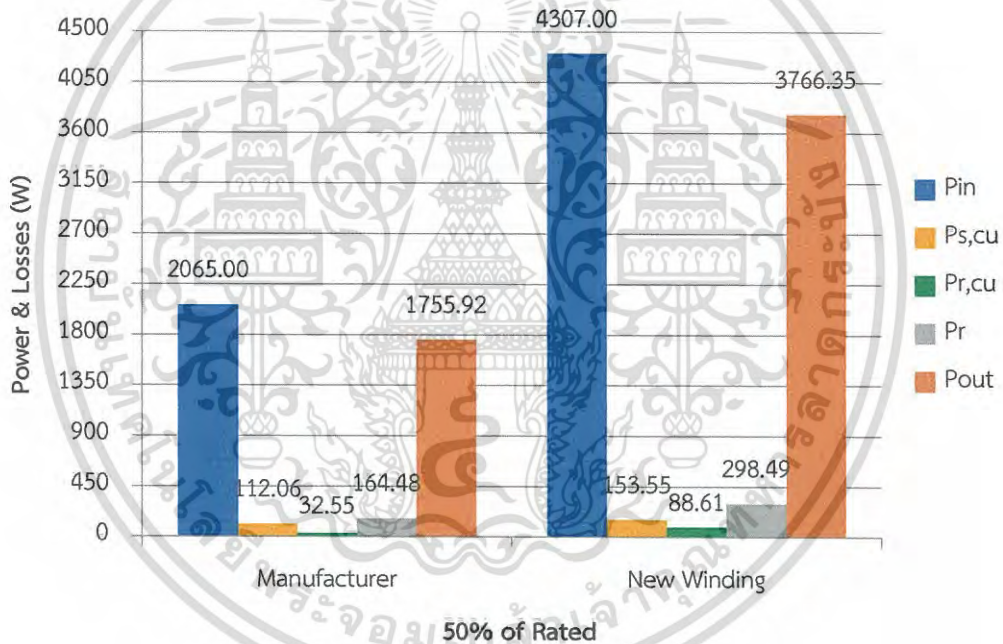
รูปที่ 4.93 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับพันขดลวดใหม่ ที่โหลด 25% ของพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (2) กำลังไฟฟ้าและความสูญเสียที่โหลด 50% ของพิกัด

ตารางที่ 4.36 ค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ที่โหลด 50% ของพิกัด

Losses (W)	50% Load	
	Manufacturer	New Winding
Input power ( $P_{in}$ )	2065.00	4307.00
Stator copper loss ( $P_{s, cu}$ )	112.06	153.55
Rotor copper loss ( $P_{r, cu}$ )	32.55	88.61
Rotational and Core loss ( $P_r$ )	164.48	298.49
Output power ( $P_{out}$ )	1755.92	3766.35



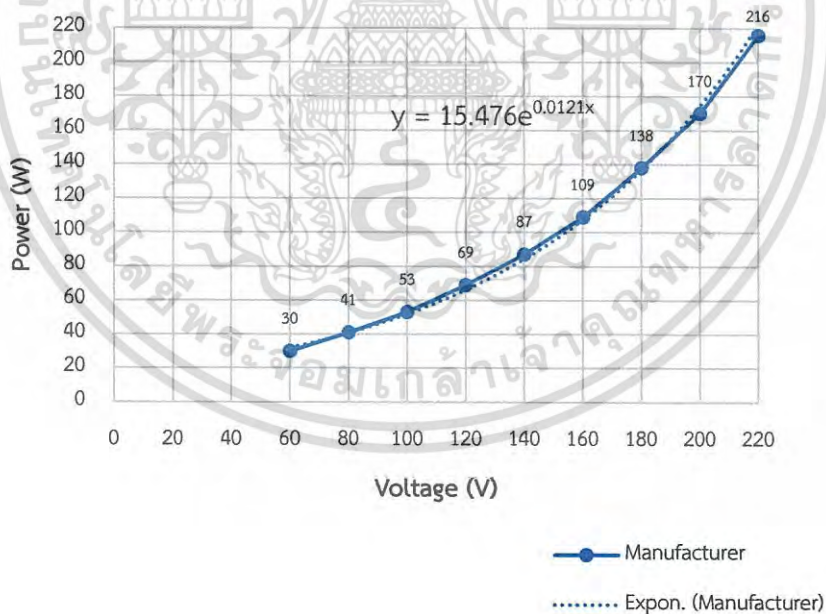
รูปที่ 4.94 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและความสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ระหว่างผู้ผลิตกับพันขดลวดใหม่ ที่โหลด 50% ของพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (4) ความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์ 5 แรงม้า

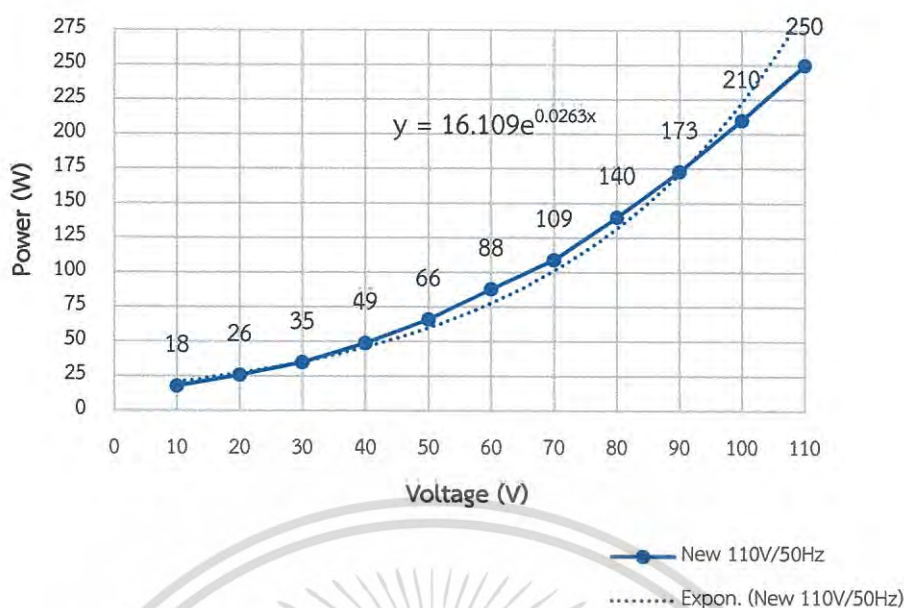
ตารางที่ 4.38 ค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 5 แรงม้า

Manufacturer			New 110V/50Hz		
Volt (V)	Power (W)	Speed rpm	Volt (V)	Power (W)	Speed rpm
220	216	1497	110	250	1499
200	170	1500	100	210	1499
180	138	1499	90	173	1499
160	109	1497	80	140	1499
140	87	1498	70	109	1499
120	69	1497	60	88	1499
100	53	1497	50	66	1499
80	41	1497	40	49	1499
60	30	1491	30	35	1499
40	22	1478	20	26	1494
20	15	1399	10	18	1473



รูปที่ 4.96 กราฟค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าจากผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.97 กราฟค่าความสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้าที่พันขดลวดใหม่

#### 4.4.4 อภิปรายผลการทดลอง

จากการคำนวณและการทดสอบหา losses ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ทั้ง 3 ขนาดคือ 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้า เมื่อเปรียบเทียบ losses ประเภทต่าง ๆ ของมอเตอร์ที่พันขดลวดใหม่ ทดสอบที่แรงดัน 220 V 100 Hz กับมอเตอร์จากผู้ผลิต ทดสอบที่แรงดัน 220 V 50 Hz พบว่า Stator copper loss และ Rotor copper loss มีค่าใกล้เคียงกับมอเตอร์จากผู้ผลิตที่เปอร์เซ็นต์โหลดเดียวกัน ในส่วนของ Rotational and core losses มีค่าเพิ่มขึ้นที่เปอร์เซ็นต์โหลดเดียวกัน

ในส่วนของ Rotational loss มอเตอร์ที่พันขดลวดใหม่ได้ทำการทดสอบที่แรงดัน 110 V 50 Hz ขณะ No load เปรียบเทียบกับมอเตอร์จากผู้ผลิตทดสอบที่แรงดัน 220 V 50 Hz พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า มีค่า Rotational loss 5.8351 W และ 7.2145 W มอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า มีค่า Rotational loss 8.6882 W และ 9.4693 W และมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า มีค่า Rotational loss 16.109 W และ 15.476 W

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

##### 5.1.1 การทดสอบหาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน

การทดสอบหาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่วัดจากมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสทั้งจากผู้ผลิตและที่พันขดลวดใหม่จะเพิ่มขึ้นกับมุมทางกลและมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากแรงดันที่ป้อนเข้าและจำนวนรอบขดลวดอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจากผู้ผลิตเป็น 2 เท่าของมอเตอร์ที่พันขดลวดใหม่ ในขณะที่ความถี่เท่ากัน จากสมการ  $E_{df} = 4.44 f N_{ph} \phi_p K_w$  ทำให้เกิดค่าฟลักซ์ที่ใกล้เคียงกันและส่งผ่านไปยังโรเตอร์เหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่โรเตอร์มีค่าใกล้เคียงกัน

##### 5.1.2 การทดสอบหาจรรยาสมมูลแบบประมาณ

การทดสอบหาจรรยาสมมูลแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส พบว่า armature resistance ( $R_1$ ) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่พันขดลวดใหม่มีค่าลดลงประมาณ 4 เท่าของมอเตอร์จากผู้ผลิต เนื่องจากพื้นที่หน้าตัด ( $A$ ) ของขดลวดเพิ่มขึ้น 2 เท่า และความยาว ( $l$ ) ของขดลวดลดลง 2 เท่า จึงทำให้ความต้านทานลดลง 4 เท่า เป็นไปตามสมการ

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

##### 5.1.3 การทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส พบว่าเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพมอเตอร์ที่พันขดลวดใหม่ ทดสอบที่แรงดัน 220 V 100 Hz กับมอเตอร์จากผู้ผลิต ทดสอบที่แรงดัน 220 V 50 Hz โดยจ่ายโหลด 25%, 50%, 75% และ 100% ของพิกัด พบว่า ประสิทธิภาพในแต่ละเปอร์เซ็นต์โหลดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่  $P_{out}$  มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าของมอเตอร์จากผู้ผลิต เนื่องจากความเร็วโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ส่วน  $P_{in}$  มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าเช่นกัน เนื่องจากผลรวมของ losses เพิ่มขึ้น แต่ยังคงอยู่ในสัดส่วนที่ไม่มากเมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของ  $P_{out}$  จึงทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

### 5.1.4 การคำนวณและทดสอบหาการสูญเสียประเภทต่าง ๆ

จากการคำนวณและการทดสอบหา losses ประเภทต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสทุกขนาด เมื่อเปรียบเทียบ losses ประเภทต่าง ๆ ของมอเตอร์ที่พันขดลวดใหม่ ทดสอบที่แรงดัน 220 V 100 Hz กับมอเตอร์จากผู้ผลิต ทดสอบที่แรงดัน 220 V 50 Hz พบว่ามอเตอร์ที่พันขดลวดใหม่มีกระแสอินพุทเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า และมีความต้านทานลดลงประมาณ 4 เท่าของมอเตอร์จากผู้ผลิต ส่งผลให้ Stator copper loss และ Rotor copper loss ของมอเตอร์ที่พันขดลวดใหม่มีค่าใกล้เคียงกับมอเตอร์จากผู้ผลิต

ในส่วนของ Rotational and core loss ที่มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณา Rotational loss จากการทดสอบที่ความถี่ 50 Hz พบว่ามอเตอร์มีค่า Rotational loss ใกล้เคียงกันทั้งมอเตอร์จากผู้ผลิตและมอเตอร์ที่พันขดลวดใหม่ ดังนั้นมอเตอร์ที่พันขดลวดใหม่ หากทดสอบที่แรงดัน 220 V 100 Hz ค่า Rotational loss จะเพิ่มขึ้น เพราะโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นจากเดิม 2 เท่า ส่วน Core loss ก็มีค่าเพิ่ม เพราะจำนวนรอบขดลวดที่ลดลงและความถี่ที่เพิ่มขึ้นจากเดิม 2 เท่า ในขณะที่แรงดันคงเดิมคือ 220 V

## 5.2 ปัญหาของโครงการ

5.2.1 จากการทดลองพบว่ามีปัญหาเกิดขึ้นกับการทดสอบภาระทางกลที่โหลด 100% ของมอเตอร์ 5 แรงม้าทั้งจากผู้ผลิตและที่พันขดลวดใหม่ เนื่องจากมอเตอร์ 5 แรงม้าต่อ coupling กับ PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) เมื่อทดสอบที่โหลดสูง ๆ ความเร็วของมอเตอร์จะตก ทำให้แรงดันที่ PMSG ตกลงไปด้วย ทำให้โหลดต้องกินกระแสสูง และต้องใช้โหลดที่มีค่าความต้านทานต่ำมาก ๆ ซึ่งในการทดลองไม่สามารถทำให้ค่าความต้านทานโหลดต่ำมาก ๆ ได้

5.2.2 ในขณะที่ทำการลดจำนวนรอบขดลวด ไม่สามารถวัดความยาวที่แท้จริงของขดลวดได้ ทำให้ความยาวโดยรวมของขดลวดอาจไม่ลดลงเป็น 2 เท่าของขดเดิม ความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์จึงไม่สามารถลดลง 4 เท่าอย่างพอดีได้ ส่งผลให้ Copper loss เกิดความคลาดเคลื่อน

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 จากปัญหาที่ไม่สามารถทดสอบภาระทางกลที่โหลด 100% ของมอเตอร์ 5 แรงม้าได้ ต้องหาโหลดที่มีความต้านทานต่ำมาขนานเพิ่ม เพื่อให้ได้โหลดที่มีความต้านทานต่ำมาก ๆ จะทำให้กระแสโหลดสูงมากขึ้น เพื่อให้ได้  $P_{out}$  ตามต้องการ

5.3.2 จากปัญหาความต้านทานขดลวดอาร์มาเจอร์ ควรวัดความยาวของขดลวดจากผู้ผลิตก่อน และพันขดลวดใหม่โดยให้ความยาวลดลง 2 เท่า และทำการพันขดลวดอย่างปราณีต เพื่อให้ความต้านทานขดลวดอาร์มาเจอร์ที่พันใหม่ลดลงใกล้เคียง 4 เท่ามากที่สุด เพื่อให้ Stator copper loss มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr, and Stephen D. Umans, **Electric Machinery**, 6<sup>th</sup> Ed, McGraw-Hill Companies, Inc, 2003. pp. 306-356.
- [2] Nick Stranges and John Roach, **IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators**, 112<sup>tm</sup> - 2017Ed, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2018, pp. 21-55.
- [3] Stephen J. Chapman, **Electric Machinery Fundamentals**, 4<sup>th</sup> Ed, McGraw-Hill Education, 2012, pp. 307-403.
- [4] ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, “มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motors)”, เอกสารประกอบการเรียนวิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2559, หน้า 44-68.
- [5] นัทที น้อยพรหม นิธิศ อำนาคะ พงศ์ปณต ไวยรรเทา และ พชร ศรีภักดี, “การศึกษาสนามแม่เหล็กหมุน การออกแบบและทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส,” **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2559.
- [6] พิเชิต ล้ายอง, **เครื่องจักรกลไฟฟ้า**, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพฯ, สนพ. ห้างหุ้นส่วนจำกัด มินเซอริวิส ซัพพลาย, 2556.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Efficiency

ที่ Load 100% ของมอเตอร์ 1 แรงม้า จากผู้ผลิต

หา Input power

$$P_{in} = 3 \times 220.31 \times 1.806 \times 0.8035 = 959.0894 \quad W$$

หา Output power

$$P_{out} = \frac{2\pi \times 1402}{60} \times 5.096 = 748.18 \quad W$$

หา Efficiency

$$\eta = \frac{748.18}{959.0894} \times 100 = 78.01\%$$

### ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Losses ประเภทต่าง ๆ

การหา losses ที่ Load 100% ของมอเตอร์ 1 แรงม้า จากผู้ผลิต

(1) Stator copper loss ( $P_{s,cu}$ )

$$P_{s,cu} = 3I_1^2 R_1 = 3 \times 1.806^2 \times 8.5897 = 84.05 \quad W$$

(2) Rotor copper loss ( $P_{r,cu}$ )

$$P_{r,cu} = sP_g = s(P_{in} - P_{s,cu}) = \left(\frac{1500 - 1402}{1500}\right) \times (959.1 - 84.05) = 57.17 \quad W$$

(3) Rotational and Core losses ( $P_r$ )

$$P_r = P_e - P_{out} = (1 - s)P_g - P_{out} = \left(1 - \frac{1500 - 1402}{1500}\right) \times 875.05 = 69.70 \quad W$$

(4) Total losses

$$P_{losses,total} = P_{s,cu} + P_{r,cu} + P_r = 84.05 + 57.17 + 69.70 = 210.92 \quad W$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

## สัญลักษณ์

B	คือ	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Tesla, Wb/m <sup>2</sup> )
H	คือ	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (A-turn/m)
$\mu$	คือ	ความซึมซาบทางแม่เหล็ก (Wb/A-m)
$\mu_0$	คือ	ความซึมซาบทางแม่เหล็กของอากาศ (Wb/A-m)
$\mu_r$	คือ	ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์
N	คือ	จำนวนรอบ (turns)
$\phi_p$	คือ	ฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็ก (Wb/m <sup>2</sup> )
l	คือ	ความยาวเฉลี่ย (m)
A	คือ	พื้นที่เฉลี่ย (m <sup>2</sup> )
$\mathfrak{H}$	คือ	ความต้านทานแม่เหล็ก (A-turn /Wb)
$\lambda$	คือ	ฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวค้อย (Wb-t)
L	คือ	ความเหนี่ยวนำ (Henry, H)
I	คือ	กระแสไฟฟ้า (Ampere, A)
V	คือ	แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย (Volt, V)
R	คือ	ความต้านทานไฟฟ้า (ohm, $\Omega$ )
e	คือ	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Volt, V)
$\theta_e$	คือ	มุมทางไฟฟ้า (radian)
$\theta_m$	คือ	มุมทางกล (radian)
$\omega$	คือ	ความเร็วเชิงมุม (radian/sec)
t	คือ	เวลา (sec)
f	คือ	ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Hz)
T	คือ	แรงบิด (N-m)
$W_{fld}$	คือ	พลังงาน (Joule, J)
P	คือ	จำนวนขั้วแม่เหล็ก (pole)
F	คือ	แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (A-turn)
$\sigma_{sr}$	คือ	มุมระหว่างสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์
$K_w$	คือ	สัมประสิทธิ์การพันขดลวด
$K_d$	คือ	ตัวประกอบการกระจาย
$K_p$	คือ	ตัวประกอบระยะขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางขนาดลวดทองแดงมาตรฐาน

เบอร์ลวดทองแดง มาตรฐาน S.W.G	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm.)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	ทนกระแสได้ (A)
0000	10.2	81.71	270.11
000	9.5	70.88	233.62
00	8.8	60.82	199.77
0	8.2	52.81	177.22
1	7.6	45.36	151.94
2	7.0	38.48	128.60
3	6.4	32.17	107.21
4	5.9	27.34	90.86
5	5.4	22.90	75.87
6	4.9	18.86	62.23
7	4.5	15.90	52.29
8	4.1	13.20	43.22
9	3.7	10.75	35.01
10	3.3	8.55	27.66
11	2.9	6.61	22.72
12	2.6	5.31	18.26
13	2.3	4.15	14.29
14	2.0	3.14	10.80
15	1.9	2.54	8.751
16	1.8	2.01	6.915
17	1.4	1.54	5.294
18	1.2	1.15	3.890
19	1.0	0.79	2.701
20	0.91	0.65	2.188
21	0.81	0.51	1.729
22	0.72	0.41	1.324
23	0.61	0.2922	0.972
24	0.56	0.2463	0.817
25	0.51	0.2047	0.675
26	0.45	0.1624	0.547
27	0.40	0.1288	0.432

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบอร์ลวดทองแดง มาตรฐาน S.W.G	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm.)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	ทนกระแสได้ (A)
28	0.38	0.1134	0.370
29	0.36	0.1021	0.312
30	0.31	0.0755	0.243
31	0.29	0.0661	0.204
32	0.28	0.0616	0.176
33	0.25	0.0510	0.169
34	0.23	0.0451	0.137
35	0.21	0.0346	0.108
36	0.19	0.0285	0.098
37	0.17	0.0227	0.078
38	0.15	0.0177	0.063
39	0.13	0.0133	0.046
40	0.12	0.0114	0.039
41	0.11	0.0101	0.033
42	0.10	0.0081	0.027
43	0.091	0.0065	0.022
44	0.081	0.0052	0.017
45	0.071	0.0040	0.013
46	0.061	0.0029	0.0097
47	0.051	0.0020	0.0068
48	0.041	0.0013	0.0047
49	0.030	0.0007	0.0024
50	0.025	0.0005	0.0017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

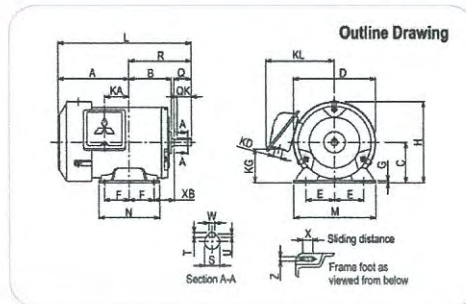


ภาคผนวก ง  
ข้อมูลมอเตอร์เหนียวนำสามเฟสจากผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Model Code : SF-JR 1HP 4P IP44

MITSUBISHI SUPER LINE SERIES INDUCTION MOTOR



**Specifications**

Output Power HP (kW)	1 (0.75)
Phase	3 Phase
Pole	4 Pole
Frame Number	80M

Degrees of Protection	IP 44
Enclosure Construction	Totally-enclosed Fan-cooled
Thermal Class	Class B (130 °C)

Alignment	Horizontal
Frame Material	Steel plate

Power Transmission	Direct-couple or Belt Driven
Direction of Rotation	Counterclockwise (CCW) viewed from shaft-end side

Connection Type	Lead Wire (6 Leads)
Coating Colour	Munsell N5.5 (Gray)
Conformed Standard	IEC 60034-1 & JEC-2137-2000

Voltage & Frequency	LT Type
	220/380-415V 50Hz 220/440V 60Hz

\* The perpendicular variation of tolerance for the shaft center is  $\pm 0.5$

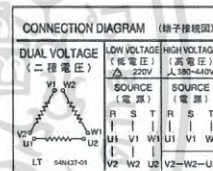
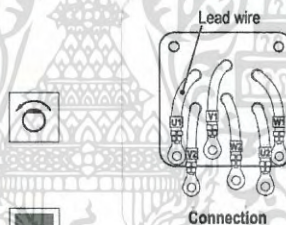
**Dimensions (mm)**

Motor													
A	B	C*	D	E	F	G	H	L	M	N	X	XB	Z
122	95	80	166	62.5	50	3.2	166	262	160	125	15	50	9

Terminal Box					Shaft End					
KA	KG	KD	KL	Q	QK	R	S	T	U	W
39.5	63	27	145	40	32	140	19.6	6	3.5	6

Bearing No.		Approximated Weight (kg)	Approximated Packing Dimensions (LxWxH)	Gross Weight (kg)
Drive End	Opposite			
6204ZZ	6203ZZ	11	315 x 270 x 206	11.7

**Connection & Connection Diagram**



Connection Diagram

**Circumstance Conditions**

Ambient Temperature	-20 ~ +40°C
Ambient Humidity	95% RH or less
Operating Altitude	Less than 1,000m above sea level
Environment	No bursting / erosive gas or vapor

**Motor Characteristics**

Type	Hz	V	50% Load			75% Load			100% Load			Torque(%)		Inertia GD <sup>2</sup> (kg-m)		
			(A)	Eff(%)	PF(%)	(A)	Eff(%)	PF(%)	(A)	Eff(%)	PF(%)	Speed (r/min)	Torque (kg-m)		Ts	Tm
LT	50	220	2.19	0.74	0.61	2.61	0.77	0.73	3.14	0.78	0.80	1400	0.520	317	275	18.1
		380	1.26	0.74	0.61	1.51	0.78	0.73	1.81	0.78	0.80	1400	0.520	317	275	10.5
		415	1.44	0.70	0.52	1.62	0.75	0.65	1.88	0.76	0.74	1410	0.520	380	328	11.3
	60	220	1.84	0.77	0.69	2.32	0.80	0.80	2.91	0.80	0.85	1700	0.430	263	237	15.6
		440	1.20	0.70	0.58	1.40	0.75	0.70	1.65	0.76	0.78	1720	0.420	355	322	10.5

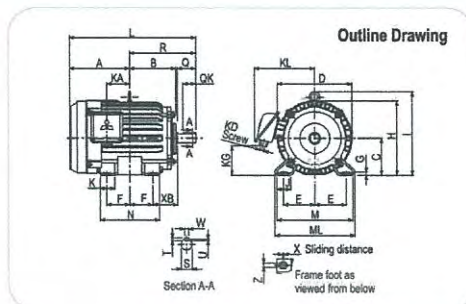
MITSUBISHI ELECTRIC AUTOMATION (THAILAND) CO., LTD.

Specifications subject to change without notice.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Model Code : SF-JR 3HP 4P

MITSUBISHI SUPER LINE SERIES INDUCTION MOTOR



**Specifications**

Output Power HP (kW)	3 (2.2)
Phase	3 Phase
Pole	4 Pole
Frame Number	100L

Degrees of Protection	IP 55
Enclosure Construction	Totally-enclosed Fan-cooled
Thermal Class	Class F (155 °C)

Alignment	Horizontal
Frame Material	Steel plate

Power Transmission	Direct-couple or Belt Driven
Direction of Rotation	Counterclockwise (CCW) viewed from shaft-end side

Connection Type	Terminal Block (6 Leads)
Coating Colour	Munsell N5.5 (Gray)
Conformed Standard	IEC 60034-1 & JEC-2137-2000

Voltage & Frequency	LT Type
	220/380~415V 50Hz 220/440V 60Hz

\* The perpendicular variation of tolerance for the shaft center is  $\pm 0.05$

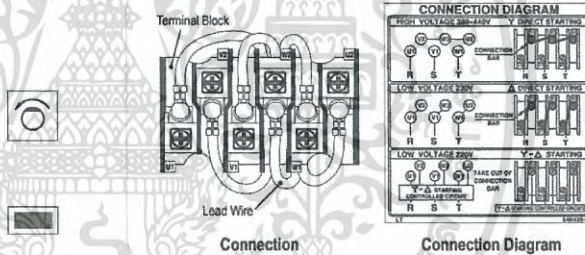
**Dimensions (mm)**

Motor														
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	ML	N
173	131	100	207	80	70	6.5	203.5	230	40	45	366	200	212	180

Motor			Terminal Box				Shaft End						
X	XB	Z	KA	KG	KD	KL	Q	QK	R	S	T	U	W
4	63	12	65	64	PF 3/4	170	60	45	193	28 j6	7	4	8

Bearing No.	Approximated Weight (kg)	Approximated Packing Dimensions (LxWxH)	Gross Weight (kg)
Drive End Opposite	6206ZZ 6205ZZ	24	430 x 355 x 300 28

**Connection & Connection Diagram**



**Circumstance Conditions**

Ambient Temperature	-20 ~ +40°C
Ambient Humidity	95% RH or less
Operating Altitude	Less than 1,000m above sea level
Environment	No bursting / erosive gas or vapor

**Motor Characteristics**

Type	Hz	V	50% Load			75% Load			100% Load			Torque(%)				Inertia GD <sup>2</sup> (kg-m)	
			(A)	Eff(%)	PF(%)	(A)	Eff(%)	PF(%)	(A)	Eff(%)	PF(%)	Speed (r/min)	Torque (kg-m)	Ts	Tm		Is (A)
LT	50	220	5.47	0.80	0.66	6.84	0.82	0.78	8.52	0.83	0.82	1420	1.51	251	268	48.1	0.026
		380	3.16	0.80	0.66	3.95	0.82	0.78	4.92	0.83	0.82	1420	1.51	251	268	27.8	
		415	3.54	0.75	0.58	4.11	0.80	0.70	4.83	0.81	0.78	1430	1.50	299	320	30.4	
LT	60	220	4.65	0.81	0.76	6.20	0.84	0.82	8.16	0.82	0.86	1710	1.25	209	232	44.9	0.026
		440	3.15	0.75	0.61	3.73	0.80	0.73	4.45	0.81	0.80	1730	1.24	281	311	52.0	

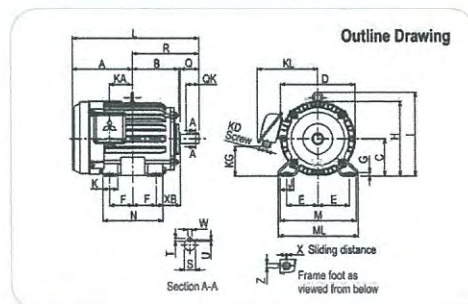
MITSUBISHI ELECTRIC AUTOMATION (THAILAND) CO., LTD.

Specifications subject to change without notice.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Model Code : SF-JR 5HP 4P LT

MITSUBISHI SUPER LINE SERIES INDUCTION MOTOR



**Specifications**

Output Power HP (kW)	5 (3.7)
Phase	3 Phase
Pole	4 Pole
Frame Number	112M

Degrees of Protection	IP 55
Enclosure Construction	Totally-enclosed Fan-cooled
Thermal Class	Class F (155 °C)

Alignment	Horizontal
Frame Material	Steel plate

Power Transmission	Direct-couple or Belt Driven
Direction of Rotation	Counterclockwise (CCW) viewed from shaft-end side

Connection Type	Terminal Block (6 Leads)
Coating Colour	Munsell N5.5 (Gray)
Conformed Standard	IEC 60034-1 & JEC-2137-2000

Voltage & Frequency	LT Type
	220/380-415V 50Hz 220/440V 60Hz

\* The perpendicular variation of tolerance for the shaft center is  $\pm 0.5$

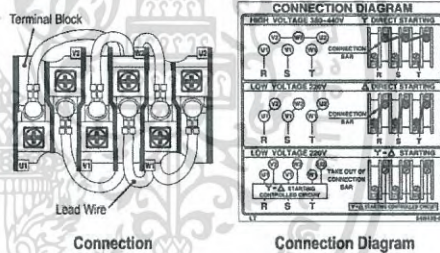
**Dimensions (mm)**

Motor														
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	ML	N
181	138	112	228	95	70	6.5	226	253	40	45	381	230	242	180

Motor			Terminal Box				Shaft End						
X	XB	Z	KA	KG	KD	KL	Q	QK	R	S	T	U	W
4	70	12	69	87	PF 3/4	182	60	45	200	28 j6	7	4	8

Bearing No.	Approximated Weight (kg)	Approximated Packing Dimensions (LxWxH)	Gross Weight (kg)
Drive End Opposite	6207ZZ 6206ZZ	36	477 x 399 x 315 42

**Connection & Connection Diagram**



**Circumstance Conditions**

Ambient Temperature	-20 ~ +40°C
Ambient Humidity	95% RH or less
Operating Altitude	Less than 1,000m above sea level
Environment	No bursting / erosive gas or vapor

**Motor Characteristics**

Type	Hz	V	50% Load			75% Load			100% Load			Torque(%)		Is (A)	Inertia GD <sup>2</sup> (kg-m <sup>2</sup> )	
			(A)	Eff(%)	PF(%)	(A)	Eff(%)	PF(%)	(A)	Eff(%)	PF(%)	Speed (r/min)	Torque (kg-m)			Ts
LT	50	220	8.35	0.85	0.68	10.7	0.86	0.79	13.5	0.86	0.83	1420	2.54	266	289	80.0
		380	4.82	0.85	0.68	6.20	0.86	0.79	7.81	0.86	0.83	1420	2.54	266	289	46.2
		415	5.17	0.84	0.60	6.24	0.85	0.73	7.61	0.85	0.79	1430	2.52	316	344	50.5
LT	60	220	7.54	0.84	0.77	10.1	0.86	0.84	13.2	0.85	0.87	1710	2.11	223	247	75.0
		440	4.56	0.81	0.66	5.55	0.87	0.75	6.94	0.86	0.81	1730	2.08	298	335	50.1

MITSUBISHI ELECTRIC AUTOMATION (THAILAND) CO., LTD.

Specifications subject to change without notice.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ  
บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การพัฒนาและทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

## The Improvement and Testing for Enhancing the Efficiency of

### 3-Phase Induction Motor

พชร ผ่านสำแดง พชรวิชัย ทับแสง และ พีรพล ศรีสวัสดิ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 Email: prasopchok\_ho@hotmail.com

## บทคัดย่อ

ปัญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะและปรับปรุงสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า, 3 แรงม้า และ 5 แรงม้าจากผู้ผลิต โดยการศึกษาจะเริ่มจากการศึกษาคูณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ได้แก่ การตรวจสอบสนามแม่เหล็กหมุนและหาจอร์สมมูลโดยประมาณ หลังจากนั้นจะทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสทั้งสาม ขนาดข้างต้น โดยจะทำการลดจำนวนรอบของขดลวดอาร์มาเจอร์และเพิ่มขนาดทองแดงของขดลวดอาร์มาเจอร์ ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพมอเตอร์อย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากการสูญเสียของมอเตอร์ทั้งจากผู้ผลิตมีค่าใกล้เคียงกับมอเตอร์ที่พันขดลวดใหม่ ในขณะที่กำลังไฟฟ้าด้านออกของมอเตอร์ที่พันใหม่มีค่ามากขึ้นเป็นสองเท่า

**คำสำคัญ:** มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส, โรเตอร์แบบกรงกระรอก, การพันขดลวดอาร์มาเจอร์

## Abstract

This thesis has objectives to study the characteristics and to improve the efficiency of the three-phase induction motor. 1 HP, 3 HP and 5 HP from manufacturer are used to test and develop in this study. First of all, the study of induction motor characteristics includes rotating magnetic field investigation and equivalent circuit evaluation. Then, as for the motor efficiency improvement, the stator winding of developed three phase induction motors are rewound by decreasing number of turn and increasing stator copper size. As the results, the developed motor efficiencies are obviously improved comparing to the original motors from manufacturer due to their similar losses for all abovementioned rated induction motors.

**Keywords:** 3-Phase Induction Motor, Squirrel cage, Armature winding

## 1. บทนำ

ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมหรือสิ่งอำนวยความสะดวกรอบตัวเราได้หันเอาเครื่องจักรกลไฟฟ้ามาใช้ขับเคลื่อนเป็นต้นกำลังทางกลแทนการใช้แรงงานมนุษย์และสัตว์มากขึ้น โครงการนี้จึงทำการศึกษา พัฒนา และทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก (Squirrel-cage rotor) โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ (Efficiency) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจากผู้ผลิตกับมอเตอร์ที่ได้รับการพันขดลวดใหม่ ซึ่งเป็นต้นแบบของการพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสให้ดีขึ้นเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ โดยเฉพาะรถยนต์ไฟฟ้า ที่ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นตัวขับเคลื่อน ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่กำลังได้รับความสนใจ และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

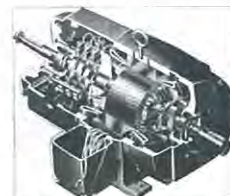
## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor Construction)

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยอาศัยหลักการเกิดของสนามแม่เหล็กหมุน มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีโครงสร้างสำคัญสองส่วน คือ สเตเตอร์ และ โรเตอร์ โดยโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบ่งเป็นอีกสองชนิดคือ โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel-cage rotor) และ โรเตอร์แบบพันขดลวด (Wound rotor)



(a)



(b)

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (a) แบบกรงกระรอก

(b) แบบพันขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ทฤษฎีการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน

เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยตำแหน่งขดลวดแต่ละเฟสวางห่างกัน 120° ทางไฟฟ้า จะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแสเฟส a, b และ c ตามสมการ

$$F_a(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{max} \cos(\theta + \omega t) \quad (2.1)$$

$$F_b(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{max} \cos(\theta + \omega t - 240^\circ) \quad (2.2)$$

$$F_c(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{max} \cos(\theta + \omega t - 120^\circ) \quad (2.3)$$

เมื่อรวมทั้งสามเทอมเข้าด้วยกันจะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กค้ำ (Rotating mmf wave) ตามสมการ 2.5

$$F_{total} = F_a(\theta, t) + F_b(\theta, t) + F_c(\theta, t) \quad (2.4)$$

$$F_{total}(\theta, t) = \frac{3}{2} F_{max} \cos(\theta - \omega t) \quad (2.5)$$

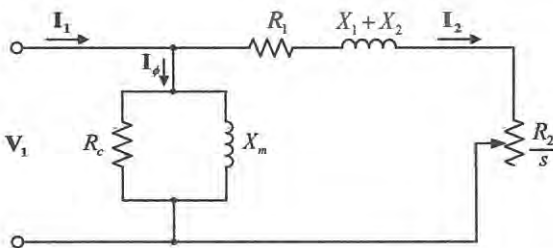
2.3 การทดสอบหาวจรสมมูลแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

2.3.1 No-load test

จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่อยู่ในภาวะไร้ภาระที่พิกัดของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ จะทำให้อัตราการเหนี่ยวนำมีความเร็วรอบในการหมุนใกล้เคียงกับ Synchronous speed ( $n_s$ ) กำลังที่ป้อนเข้ามอเตอร์จะสูญเสียเนื่องจาก Core loss ( $P_c$ ), Stator copper loss ( $P_{s,cu}$ ) และ Mechanical loss ( $P_m$ ) ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทำ No-load test คือ  $R_c$  และ  $X_m$

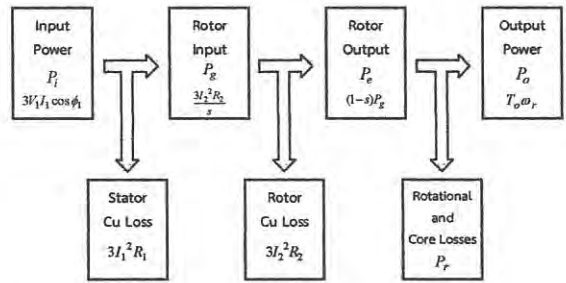
2.3.2 Block-rotor test

ทดสอบโดยการยึดโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้หยุดอยู่กับที่ ( $n_r = 0$ ) แล้วค่อย ๆ ปรับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าจนกระแสไฟฟ้าที่ไหลในมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นค่าที่พิกัด (Rated current) ซึ่งข้อมูลที่ได้จาก Block-rotor test คือ  $R_1 + R_2$  และ  $X_1 + X_2$



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลแบบประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

2.4 คุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าและแรงบิด



รูปที่ 2.3 Power flow ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ (Input power) จะมีการสูญเสียจากขดลวดทองแดงที่สเตเตอร์ (Stator copper loss) ก่อนจ่ายกำลังให้กับโรเตอร์ (Rotor input power) และมีการสูญเสียจากขดลวดทองแดงที่โรเตอร์ (Rotor copper loss) ก่อนจ่ายกำลังไฟฟ้าออกจากโรเตอร์ (Rotor output power) และมีการสูญเสียจากการหมุน (Rotational losses) ก่อนจ่ายกำลังทางกลทั้งหมดออกจากมอเตอร์ (Output power) ซึ่งการสูญเสียจากการหมุนเกิดจากการเสียดสีของโรเตอร์ (Friction loss) และแรงต้านลมของใบพัด (Windage loss)

3. วิธีการทดสอบ

3.1 การทดสอบหาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน

จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าที่สเตเตอร์ โดยกระแสไฟฟ้าสามเฟสนี้จะสร้างฟลักซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาไปตามกับขดลวดล้นหาที่โรเตอร์ โดยพันขดลวดล้นหาจำนวน 1 รอบ ระยะห่างระหว่างขดลวด 11 slots ทำการวัดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดล้นหาโดยหมุนโรเตอร์จากมุม 0° ถึง 180° ทางกล หมุนทีละ 15° ทางกล

3.2 การทดสอบหาวจรสมมูลแบบประมาณ

3.2.1 No-load Test

จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่พิกัดของมอเตอร์เข้าที่ขั้วเทอร์มินอลของมอเตอร์ โดยมอเตอร์ไม่มีการต่อกับภาระทางกลใด ๆ

3.2.2 Block-rotor Test

ทำการยึดโรเตอร์ให้อยู่กับที่ แล้วค่อย ๆ ปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขาเข้าจนค่ากระแสป้อนเข้าเท่ากับค่ากระแสพิกัดของมอเตอร์

3.2.3 V-I Method

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานขดลวดอาร์มาเจอร์

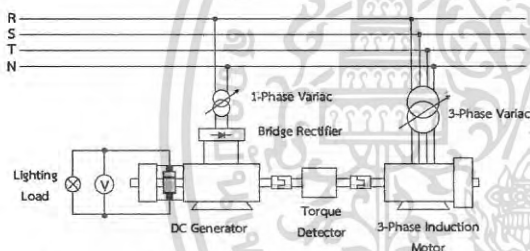
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจากผู้ผลิต

ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส 220 V 50 Hz จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ใช้เครื่อง Torque Detector วัดค่าแรงบิด (Kg-m) และความเร็ว (rpm) อยู่ระหว่างมอเตอร์เหนี่ยวนำกับ DC Generator หรือ Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) โดยใช้โหลดไฟและ Shunt Resistor เป็นโหลดในการทดสอบ ซึ่งจะทดสอบการทำงานของมอเตอร์ที่ 25%, 50%, 75% และ 100% ของพิกัด

### 3.5 การทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่พันขดลวดใหม่

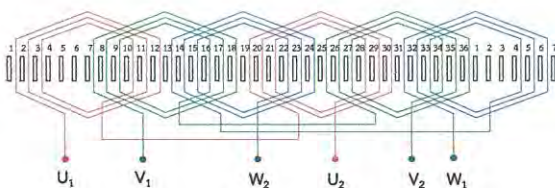
ทำการทดสอบคล้ายกับหัวข้อ 3.3 แต่ปรับลดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส 220 V 50 Hz เป็น 220 V 100 Hz เนื่องจากการลดจำนวนรอบของขดลวดอาร์มาเจอร์ลง 2 เท่า ทำให้ต้องลดแรงดัน (V) หรือเพิ่มความถี่ (f) เป็น 2 เท่า เพื่อให้ค่าแรงดันต่อความถี่มีค่าคงที่ จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และทดสอบการทำงานของมอเตอร์ที่ 25%, 50%, 75% และ 100% ของพิกัด



รูปที่ 3.1 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์

### 3.4 การพันขดลวดอาร์มาเจอร์

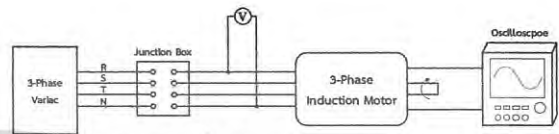
การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของผู้ผลิตมีลักษณะการพันแบบเชลล์คอล์ย (Shell coil) เต็มพิทช์ (Full pitch) ชั้นคานึงชั้น (Single layer) จากนั้นเลือกขนาดขดลวดใหม่ที่มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่ขึ้นเป็น 2 เท่าจากขดลวดเดิม หรือใช้ขดลวดขนาดเท่าเดิมแต่พันเป็นสองเส้นคู่กัน และลดจำนวนรอบของการพันขดลวดใหม่ลง 2 เท่าจากจำนวนรอบขดลวดเดิม



รูปที่ 3.2 ลักษณะการพันขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟส

### 3.6 การทดสอบหาการสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านลม

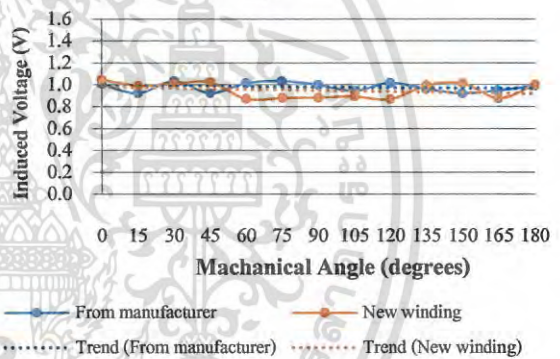
การทดสอบหา Friction and windage loss ทำการทดสอบที่สภาวะ No-load โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่พิกัดให้กับมอเตอร์ แล้วทำการค่อย ๆ ปรับลดแรงดันลงจนความเร็วเกิดการเปลี่ยนแปลง (มีค่า slip เกิดขึ้น) พร้อมกับบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้า (W) และแรงดันไฟฟ้า (V) แล้วนำไปพลอตกราฟระหว่างกำลังไฟฟ้าขาเข้า (W) และแรงดันไฟฟ้า (V) ทำการหาจุดตัดบนแกนกำลังไฟฟ้าขาเข้า



รูปที่ 3.3 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหา Rotational loss

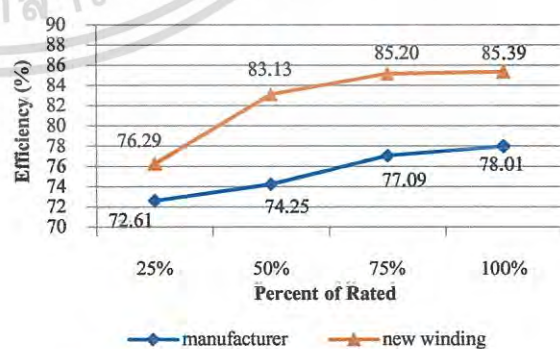
## 4. ผลการทดลอง

### 4.1 ผลการทดสอบการศึกษาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสามแม่เหล็กหมุน



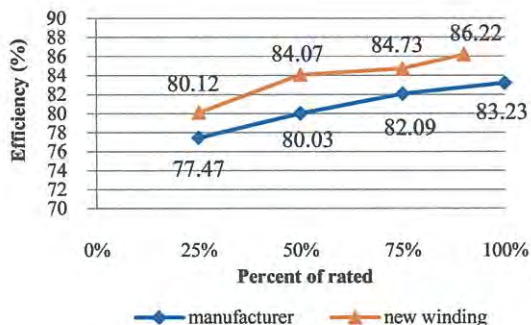
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับมุมองศาทางกลต่างๆ

### 4.2 ผลการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

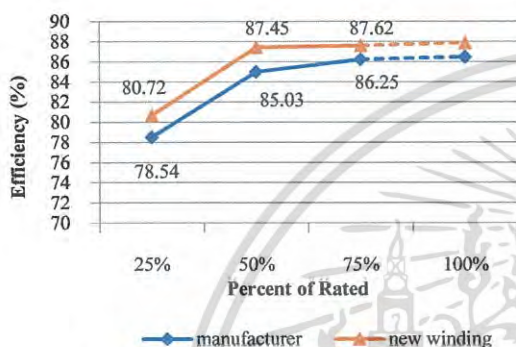


รูปที่ 4.2 กราฟประสิทธิภาพของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟประสิทธิภาพของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า



รูปที่ 4.4 กราฟประสิทธิภาพของมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า

### 5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพมอเตอร์ที่ทันสมัยกับมอเตอร์ที่แรงดัน 220 V 100 Hz กับมอเตอร์จากผู้ผลิต ทดสอบที่แรงดัน 220 V 50 Hz พบว่าประสิทธิภาพในแต่ละเปอร์เซ็นต์โหลดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่  $P_{out}$  มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าของมอเตอร์จากผู้ผลิต เนื่องจากความเร็วโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ส่วน  $P_{in}$  มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าเช่นกัน และผลรวมของ losses เพิ่มขึ้น แต่ยังคงอยู่ในสัดส่วนที่ไม่มากเมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของ  $P_{out}$  จึงทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

### เอกสารอ้างอิง

[1] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr, and Stephen D. Umans, Electric Machinery, 6th Ed, McGraw-Hill Companies, Inc, 2003. pp. 306-356.  
 [2] Nick Stranges and John Roach, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, 112<sup>th</sup> - 2017Ed, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2018, pp. 21-55.

[3] Stephen J. Chapman, Electric Machinery Fundamentals, 4<sup>th</sup> Ed, McGraw-Hill Education, 2012, pp. 307-403.  
 [4] ชัชวดี ฉัตรอุทัย, “มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motors)”, เอกสารประกอบการเรียนวิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2559, หน้า 44-68.  
 [5] นัทที น้อยพรหม นิธิศ อำนาคะ พงศ์ปณิต ไวยบรรเทา และ พชร ศรีภักดี, “การศึกษาสนามแม่เหล็กหมุน การออกแบบและทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส,” ปริชญานินท์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2559.  
 [6] พิชิต สายอง, เครื่องจักรกลไฟฟ้า, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพฯ, สทพ. ห้างหุ้นส่วนจำกัด มินเซอร์วิส ชัพพลาข, 2556.

### ประวัติผู้เขียนบทความ



นายพชร ผ่านสำแดง  
 เกิดวันที่ 16 กันยายน พ.ศ. 2539  
 ที่อยู่ 199/128 หมู่ 3 ตำบลบางกะจะ  
 อำเภอเมืองจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี 22000  
 จบการศึกษามัธยมศึกษาที่โรงเรียนเบญจมราชูทิศ  
 โทรศัพท์ 0845997747  
 E-mail: panpai1609c@gmail.com



นายพชรวิชญ์ ทับแสง  
 เกิดวันที่ 27 กันยายน พ.ศ. 2538  
 ที่อยู่ 29/39 หมู่ 7 ตำบลในเมือง  
 อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40000  
 จบการศึกษามัธยมศึกษาที่โรงเรียนสาธิต  
 มหาวิทยาลัยขอนแก่น (ศึกษาศาสตร์)  
 โทรศัพท์ 0844003435  
 E-mail: mo\_dom@hotmail.com



นายพีรพล ศรีสวัสดิ์  
 เกิดวันที่ 12 กันยายน พ.ศ. 2538  
 ที่อยู่ 35 หมู่ 6 ตำบลสามแยก  
 อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดโคราช 35120  
 จบการศึกษามัธยมศึกษาที่โรงเรียนเลิงนกทา  
 โทรศัพท์ 0922593271  
 E-mail: pee.slayerz@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียนบทความ



นายพชร ผ่านสำแดง

เกิดวันที่ 16 กันยายน พ.ศ. 2539

ที่อยู่ 199/128 หมู่ 3 ตำบลบางกะจะ อำเภอเมืองจันทบุรี  
จังหวัดจันทบุรี 22000

จบการศึกษามัธยมศึกษาที่โรงเรียนเบญจมราชูทิศ

โทรศัพท์ 0845997747

E-mail: panpai1609c@gmail.com



นายพชรวิชญ ทับแสง

เกิดวันที่ 27 กันยายน พ.ศ. 2538

ที่อยู่ 29/39 หมู่ 7 ตำบลในเมือง อำเภอเมืองขอนแก่น  
จังหวัดขอนแก่น 40000

จบการศึกษามัธยมศึกษาที่โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยขอนแก่น  
(ศึกษาศาสตร์)

โทรศัพท์ 0844003435

E-mail: mo\_dom@hotmail.com



นายพีรพล ศรีสวัสดิ์

เกิดวันที่ 12 กันยายน พ.ศ. 2538

ที่อยู่ 35 หมู่ 6 ตำบลสามแยก อำเภอเมืองเลิงนกทา  
จังหวัดยโสธร 35120

จบการศึกษามัธยมศึกษาที่โรงเรียนเลิงนกทา

โทรศัพท์ 0922593271

E-mail: pee.slayerz@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้