

สนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส  
ROTATING MAGNETIC FIELD OF THREE-PHASE INDUCTION MOTOR



T144633

โดย

นายเรืองกิตต์ ปัญญาพงศธร  
นายวัชรภูมิ ทรัพย์ประเสริฐ  
นายวิทยา พ่วงเจริญ

ร.พ.  
ร.ร.๕๖๓  
๒๕๕๘  
เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....144633  
วัน,เดือน,ปี.....2.9.พ.ย.....2559

b.12821299  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ROTATING MAGNETIC FIELD OF THREE-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

2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2558

สนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส  
ROTATING MAGNETIC FIELD OF THREE-PHASE INDUCTION MOTOR



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.พิชิต ล้ำยอง

ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

ผู้จัดทำ

1. นายเรืองกิตติ ปัญญาพงศธร
2. นายวัชรภูมิ ทรัพย์ประเสริฐ
3. นายวิทยา พ่วงเจริญ



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ พิชิต ลำยอง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

นาย เรืองกิตต์ ปัญญาพงศธร  
นาย วัชรภูมิ ทรัพย์ประเสริฐ  
นาย วิทยา พ่วงเจริญ  
รศ. พิชิต ล้ำยอง อาจารย์ที่ปรึกษา  
ดร. เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
ปีการศึกษา 2558

### บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยจะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดวาวด์โรเตอร์เป็นกรณีศึกษา เนื่องจากสามารถศึกษาลักษณะสนามแม่เหล็กหมุนต่าง ๆ ได้ทั้งที่สเตเตอร์และโรเตอร์ ในขั้นต้นจำเป็นต้องศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบวาวด์โรเตอร์ที่ใช้ทำการศึกษา เช่น ลักษณะการพันขดลวด ตำแหน่งแกนของขดลวดในแต่ละเฟส ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด เป็นต้น หลังจากนั้นจะทำการวิเคราะห์การเกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุนในสเตเตอร์ โรเตอร์และช่องว่างอากาศ โดยการใช้ขดลวดค้นหา (search coil) มาวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ สุดท้ายแล้วทำการศึกษาค่าพลังงานร่วมในช่องว่างอากาศและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงภาระทางกล เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็ก แรงเคลื่อนแม่เหล็ก พลังงานร่วม และแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ผลที่ได้จากโครงงานนี้จะนำเสนอการแสดงผลของสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสอย่างง่ายและชัดเจน เพื่อประโยชน์ทางการศึกษาและการวิจัยออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าต่อไป

## ROTATING MAGNETIC FIELD OF THREE-PHASE INDUCTION MOTOR

Mr.Rueangkit	Panyapongsathorn	
Mr.Watcharapoom	supprasert	
Mr.Wittaya	Phuangcharoen	
Assoc.Prof.Pichit	Lumyoung	Advisor
Dr.Piampoom	Sarikprueck	Co-Advisor
Year 2015		

### ABSTRACT

This thesis presents a study of rotating magnetic field in three-phase induction motor. Wound rotor induction motor is selected in this case since rotating magnetic field at stator and rotor can easily be studied. First of all, it is necessary to obtain the structure and characteristics of this selected induction motor such as armature winding, stator winding axis in each phase, maximum magnetic field density, etc. After that, magneto-motive force and rotating magnetic field at stator, rotor, and air gap are analyzed using search coil for measuring induced electromotive force at each tested position. Lastly, co-energy in airgap and electromagnetic torque in the induction motor are studied by varying the mechanical load for finding the relationship between its magnetic field, magneto-motive force, co-energy and electromagnetic torque. The final results of this project propose the simple and explicit demonstration of rotating magnetic field in the three-phase induction motor for educational benefit and further electrical machine research.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จเป็นอย่างดีด้วยการชี้แนะคำปรึกษาและการเอาใจใส่เป็นอย่างดีจาก รองศาสตราจารย์ พิชิต ล้ายอง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมโครงการ และ ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการ กลุ่มของข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับพวกข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี ที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวกให้ยืมอุปกรณ์ที่จำเป็นที่ใช้ในการทำงานโครงการ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกๆฝ่ายที่เกี่ยวข้องในการทำโครงการวิจัยนี้

สุดท้ายนี้พวกข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของพวกข้าพเจ้าที่ได้อุปการะเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน ตลอดจนส่งเสริมทางด้านการศึกษา จนสามารถสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากโครงการนี้ กลุ่มของพวกข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
ABSTRACT	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญรูป	viii
สารบัญตาราง	xiii
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขต	2
1.4 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.5 ประโยชน์ที่รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2	5
2.1 วงจรแม่เหล็ก	5
2.2 สารแม่เหล็ก (Magnetic Material)	5
2.3 ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance)	7
2.4 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance)	7
2.5 ทฤษฎีการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน	10
2.6 ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน (Synchronous Speed)	16
2.7 การกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสสลับ 3 เฟส	17
2.8 การพันขดลวดอาเมเจอร์	21
2.9 ขดลวดอาเมเจอร์ของเครื่องกำเนิดสามเฟส	24
2.9.1 ขดลวดอาเมเจอร์ของเครื่องกำเนิดสามเฟสแบบ พิชเต็ม (Full Pitch)	24

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.9.2 ขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดสามเฟสแบบพิเศษส่วน (Short Pitch)	25
2.10 สัมประสิทธิ์ของการพันขดลวดอาร์มาเจอร์	26
2.11 การคำนวณหาค่า Distribution factor	27
2.12 การคำนวณค่า	29
2.13 แรงบิด (Torque) และพลังงานที่ส่งผ่าน (Co-energy)	32
<b>บทที่ 3 การออกแบบและผลการทดลองเบื้องต้น</b>	<b>36</b>
3.1 การหาจำนวนขั้วแม่เหล็ก	37
3.2 การหาตำแหน่งของขดลวดอาร์มาเจอร์	39
3.3 การศึกษาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน	41
3.4 การศึกษาย่านการอิมิตัวของแกนเหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า	43
3.5 การหาจำนวนรอบขดลวด	44
3.6 การตรวจสอบและการแก้ไขปัญหาการ short turn บนขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์	46
3.6.1 การพบปัญหา	46
3.6.2 การตรวจสอบการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์และตรวจสอบความต้านทานของขดลวดแต่ละเฟส	50
3.6.3 การตรวจสอบความต้านทานของจุดต่อในแต่ละชั้นส่วน	52
3.6.4 การตรวจสอบการลัดวงจรของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์	54
3.6.5 การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ใหม่	56
3.7 การหาแรงบิดสนามแม่เหล็กและพลังงานร่วมในช่องอากาศ	59

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	<b>66</b>
4.1 ผลการทดสอบการหาจำนวนขั้วแม่เหล็ก	66
4.2 ผลการทดสอบการหาตำแหน่งของขดลวดอาร์มาเจอร์	68
4.3 ตารางการทดลองคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน	71
4.4 ผลการทดสอบย่านการอิ่มตัวของแกนเหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า	82
4.5 ผลการทดสอบการหาจำนวนรอบขดลวด	83
4.6 การแก้ไขปัญหา	84
4.6.1 ปัญหาสนามแม่เหล็กหมุนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าสามเฟสที่ไม่สมดุลของโรเตอร์	84
4.6.2 ผลการตรวจสอบการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์และผลตรวจสอบความต้านทานของขดลวดแต่ละเฟส	85
4.6.3 ผลการตรวจสอบความต้านทานของจุดต่อในแต่ละชั้นส่วน	87
4.6.4 ผลการตรวจสอบการลัดวงจรของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์	88
4.6.5 ผลการตรวจสอบกระแสไฟฟ้าสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ที่พันใหม่	89
4.7 ผลการทดสอบการหาแรงบิดสนามแม่เหล็กและพลังงานร่วมในช่องอากาศ	91
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	<b>101</b>
5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ	101
5.1.1 สรุปผลการทดลองการหาโครงสร้างหลักและจำนวนขั้วแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าทดสอบ	101
5.1.2 สรุปผลการหาตำแหน่งของขดลวดอาร์มาเจอร์และรูปแบบของการพันขดลวดอาร์มาเจอร์	101
5.1.3 สรุปผลการทดลองการศึกษาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน	101
5.1.4 สรุปผลการทดลองย่านการอิ่มตัวของแกนเหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า	102
5.1.5 สรุปผลการทดลองหาจำนวนรอบของขดลวด	102
5.1.6 สรุปผลการทดลองแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กและพลังงานร่วม	102

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2 ปัญหาของโครงการและแนวทางแก้ไขปัญหา	103
5.2.1 ปัญหาของโครงการ	103
5.2.2 แนวทางแก้ไขปัญหา	103
5.3 ข้อเสนอแนะ	103
เอกสารอ้างอิง	104
ภาคผนวก	105
ภาคผนวก ก ตารางขนาดหลอดแดงมาตรฐาน	106
ภาคผนวก ข คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	108
ภาคผนวก ค บทความวิชาการ	111
ประวัติผู้เขียน	116

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรแม่เหล็ก	5
2.2 การเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามแม่เหล็กต่อความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก	6
2.3 วงจรแม่เหล็กเมื่อความต้านทานแม่เหล็กมีค่าน้อยมาก	9
2.4 การเกิด Self-Inductance	9
2.5 การเกิด Mutual Inductance	10
2.6 การกระจายของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ช่องอากาศ	11
2.7 ตำแหน่งของขดลวด เฟส $a$ ที่พันแบบกระจาย ( <i>concentrated winding</i> )	12
2.8 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เป็น traveling wave	13
2.9 ตำแหน่งการวางขดลวดสามเฟส ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ สองขั้วแม่เหล็ก	14
2.10 สัญญาณกระแสไฟฟ้าสามเฟส	15
2.11 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสสามเฟสในขดลวดที่วางห่างกัน $120^\circ$ ทางไฟฟ้า	16
2.12 โรเตอร์แบบขั้วยื่นและโรเตอร์ทรงกระบอกของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ	18
2.13 ตำแหน่งว่างขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส	19
2.14 การพันขดลวดด้านซ้ายแบบแล็ป และด้านขวาแบบเวฟ	21
2.15 การพันขดลวดด้านซ้ายแบบชั้นเดียว และด้านขวาแบบสองชั้น	21
2.16 การพันขดลวดแบบสไปแรล	22
2.17 การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ 1 เฟส 2 ชั้นแบบแล็ป มี 2 ร่องต่อ 1 ขั้วแม่เหล็ก	22
2.18 ขดลวดอาร์มาเจอร์ 2 เฟส พัน 2 ชั้นแบบแล็ปมี 2 ร่องขั้ว/เฟส	23
2.19 ขดลวดอาร์มาเจอร์แบบ 3 เฟส พัน 2 ชั้นแบบแล็ปมีค้อยล์พิชเติม	23
2.20 การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ 3 เฟสแบบพิชเติม	24
2.21 การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ 3 เฟสแบบพิชเศษส่วน	25
2.22 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดแบบพิชเติม และแบบพิชเศษส่วน	25
2.23 การกระจายของขดลวดในแต่ละเฟส 3 ร่องสล็อตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส	27
2.24 ความกว้างของขดลวดน้อยกว่าความกว้างของขั้วแม่เหล็ก	29
2.25 เครื่องจักรกลไฟฟ้าสองขั้วอย่างง่าย	32
3.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	36
3.2 ทิศทางของกระแสในแต่ละcoil ของขดลวดเฟส $a$	37
3.3 การใช้เข็มทิศแสดงบริเวณจุดที่มีสนามแม่เหล็กมากที่สุด	38
3.4 ภาพจริงในการทดลองการใช้เข็มทิศเพื่อหาขั้วแม่เหล็ก	38

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 (a), (b) ภาพจริงการวาง search coil ที่ stator, (c) ภาพจำลองการวาง search coil ที่ stator	40
3.6 การใส่ search coil ที่สเตเตอร์	42
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ของแกนเหล็กเมื่อกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรง	43
3.8 ภาพจำลองการร่องสลิตของโรเตอร์ในการใส่ Search coil	45
3.9 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันสามเฟสสมมูลขนาด 40V L-N เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสของสเตเตอร์	46
3.10 กระแสเหนี่ยวนำสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันสามเฟสสมมูลขนาด 50V L-N เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสของสเตเตอร์	47
3.11 กระแสเหนี่ยวนำสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันสามเฟสสมมูลขนาด 60V L-N เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสของสเตเตอร์	47
3.12 การจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสที่โรเตอร์ โดยเพื่อทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสที่โรเตอร์	48
3.13 กระแสไฟฟ้าสลับสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมมูลขนาด 15.69 V(L-N) เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสโรเตอร์โดยตรง	49
3.14 กระแสสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันสามเฟสสมมูลขนาด 27.564 V(L-N) เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสที่โรเตอร์โดยตรง	49
3.15 การถอดขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์เพื่อนับจำนวนรอบ	50
3.16 การวัดความต้านทานขดลวดสามเฟส	51
3.17 การวัดค่าความต้านทานของขดลวดในแต่ละเฟส โดยวัดระหว่างจุดเชื่อมต่อที่ขั้วของแต่ละเฟสและจุดนิวทรัลของขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสของโรเตอร์	51
3.18 วงแหวนลื่นหลังทำการขัดถ่านที่ติดอยู่ออกแล้ว	52
3.19 จุดเชื่อมต่อตั้งต้น a-x, b-y, c-z	53
3.20 จุดเชื่อมต่อเมื่อเปลี่ยนจุดเชื่อมต่อที่แปรถ่าน (z กับ x) a-z, b-y, c-x	53
3.21 จุดเชื่อมต่อเมื่อเปลี่ยนจุดเชื่อมต่อที่แปรถ่าน(y กับ x) a-y, b-x, c-z	53
3.22 จุดเชื่อมต่อเมื่อเปลี่ยนจุดเชื่อมต่อที่แปรถ่าน (z กับ y) a-x, b-z, c-y	54

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.23 ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของขดลวดค้นหาพันบนสเตเตอร์ ซึ่งเกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสามเฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์	55
3.24 ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของขดลวดค้นหาพันบนสเตเตอร์ ซึ่งเกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสามเฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์	55
3.25 ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของขดลวดค้นหาพันบนสเตเตอร์ ซึ่งเกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสามเฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์	55
3.26 แบบการพันขดลวดอาร์มาเจอร์เฟส a ใหม่ของโรเตอร์	56
3.27 แบบการพันขดลวดอาร์มาเจอร์เฟส b ใหม่ของโรเตอร์	57
3.28 แบบการพันขดลวดอาร์มาเจอร์เฟส c ใหม่ของโรเตอร์	57
3.29 ขั้นตอนการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ใหม่จำนวน 22 รอบต่อขดด้วยบ็อบบิน	58
3.30 การนำขดลวดอาร์มาเจอร์ที่พันเป็นขดด้วยบ็อบบินและนำไปใส่ในร่องสล็อตด้วยความระมัดระวัง	58
3.31 กระแสไฟฟ้าสามเฟส ณ เวลาใดๆ	60
3.32 ลักษณะการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดอาร์มาเจอร์สเตเตอร์และโรเตอร์	60
3.33 ลักษณะการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดอาร์มาเจอร์สเตเตอร์และโรเตอร์	61
3.34 ลักษณะทิศทางของกระแสในแต่ละ coil	61
3.35 แกนแม่เหล็กของเครื่องจักรกลแบบ 2 ขั้ว	62
3.36 ลักษณะทิศทางของกระแสในแต่ละ coil ขณะหมุนเพลา	63
3.37 แกนแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบ 2 ขั้วเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในลักษณะต่อแบบ Y	63
3.38 (a), (b), (c) ลักษณะการทดสอบหาแรงบิดที่เพลา	64
4.1 (a), (b), (c) การใช้เข็มทิศแสดงบริเวณจุดที่มีสนามแม่เหล็กมากที่สุดแต่ละบริเวณ	66
4.2 ตำแหน่งของ coil แต่ละเฟสโดยประมาณ	67

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 (a) รูปสัญญาณของแรงดันที่วัดจาก search coil ที่ stator แต่ละตำแหน่งโดยจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (b) รูปสัญญาณของแรงดันที่วัดจาก search coil ที่ stator โดยวางตำแหน่งแตกต่างจากภาพ (a)	68
4.4 (a) การวางขดลวดของเฟส a, (b) การวางขดลวดของเฟส b, (c) การวางขดลวดของเฟส c	69
4.5 ตำแหน่งการวางขดลวดของทุกเฟสบนสเตเตอร์สลิตแบบ Double layer	70
4.6 การวางขดลวดอามาเจอร์สามเฟสบนสเตเตอร์สลิตแบบ Double layer	70
4.7 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (ch2) บน search coil ที่พัน 2 รอบ แรงดัน 3 เฟสป้อนเข้า 40V ที่มุม $0^\circ$ $60^\circ$ $120^\circ$ $180^\circ$ $240^\circ$ $300^\circ$ ตามลำดับ (วัดจาก Magnetic axis ของขดลวดเฟส A ที่สเตเตอร์)	74
4.8 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (ch2) บน search coil ที่พัน 2 รอบ แรงดัน 3 เฟสป้อนเข้า 80V ที่มุม $0^\circ$ $60^\circ$ $120^\circ$ $180^\circ$ $240^\circ$ $300^\circ$ ตามลำดับ (วัดจาก Magnetic axis ของขดลวดเฟส A ที่สเตเตอร์)	75
4.9 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (ch2) บน search coil ที่พัน 3 รอบ แรงดัน 3 เฟสป้อนเข้า 40V ที่มุม $0^\circ$ $60^\circ$ $120^\circ$ $180^\circ$ $240^\circ$ $300^\circ$ ตามลำดับ (วัดจาก Magnetic axis ของขดลวดเฟส A ที่สเตเตอร์)	76
4.10 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (ch2) บน search coil ที่พัน 3 รอบ แรงดัน 3 เฟสป้อนเข้า 80V ที่มุม $0^\circ$ $60^\circ$ $120^\circ$ $180^\circ$ $240^\circ$ $300^\circ$ ตามลำดับ (วัดจาก Magnetic axis ของขดลวดเฟส A ที่สเตเตอร์)	77
4.11 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (ch2) บน search coil ที่พัน 2 รอบ แรงดัน 1 เฟสป้อนเข้า 40V ที่มุม $0^\circ$ $60^\circ$ $120^\circ$ $180^\circ$ $240^\circ$ $300^\circ$ ตามลำดับ (วัดจาก Magnetic axis ของขดลวดเฟส A ที่สเตเตอร์)	78
4.12 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (ch2) บน search coil ที่พัน 2 รอบ แรงดัน 1 เฟสป้อนเข้า 80V ที่มุม $0^\circ$ $60^\circ$ $120^\circ$ $180^\circ$ $240^\circ$ $300^\circ$ ตามลำดับ (วัดจาก Magnetic axis ของขดลวดเฟส A ที่สเตเตอร์)	79
4.13 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (ch2) บน search coil ที่พัน 3 รอบ แรงดัน 1 เฟสป้อนเข้า 40V ที่มุม $0^\circ$ $60^\circ$ $120^\circ$ $180^\circ$ $240^\circ$ $300^\circ$ ตามลำดับ (วัดจาก Magnetic axis ของขดลวดเฟส A ที่สเตเตอร์)	80

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (ch2) บน search coil ที่พัน 3 รอบ แรงดัน 1 เฟสป้อนเข้า 80V ที่มุม $0^\circ$ $60^\circ$ $120^\circ$ $180^\circ$ $240^\circ$ $300^\circ$ ตามลำดับ (วัดจาก Magnetic axis ของขดลวดเฟส A ที่สเตเตอร์)	81
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายและกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย	82
4.16 การตรวจสอบการพันของขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสของโรเตอร์และนับจำนวนรอบของขดลวดทุกขดลวด	85
4.17 แสดงจุดเชื่อมต่อจุดต่างๆของโรเตอร์	86
4.18 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ที่พันใหม่ เมื่อจ่ายแรงดันสามเฟส 17V (L-N) ที่สเตเตอร์	89
4.19 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ที่พันใหม่ เมื่อจ่ายแรงดันสามเฟส 17V (L-N) ที่สเตเตอร์ เมื่อหมุนโรเตอร์ไป $30^\circ$ ทางกล	90
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ก (N.m) และมุมทางไฟฟ้า (องศา) ที่กระแส 3 แอมป์	91
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ก (N.m) และมุมทางไฟฟ้า (องศา) ที่กระแส 3.5 แอมป์	92
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ก (N.m) และมุมทางไฟฟ้า (องศา) ที่กระแส 4 แอมป์	93
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ก (N.m) และมุมทางไฟฟ้า (องศา) ที่กระแส 4.5 แอมป์	94
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ก (N.m) และมุมทางไฟฟ้า (องศา) ที่กระแส 6 แอมป์	95
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ก (N.m) และมุมทางไฟฟ้า (องศา) ที่กระแส 7 แอมป์	96
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ก (N.m) และมุมทางไฟฟ้า (องศา) ที่กระแส 8 แอมป์	97
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ก (N.m) และมุมทางไฟฟ้า (องศา) ที่กระแส 9 แอมป์	98
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ก (N.m) และมุมทางไฟฟ้า (องศา) ที่กระแส 10 แอมป์	99

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	3
4.1 EMF OF THREE-PHASE SUPPLY ON 2 TURNS OF SEARCH COIL	71
4.2 EMF OF THREE-PHASE SUPPLY ON 3 TURNS OF SEARCH COIL	72
4.3 EMF OF SINGLE-PHASE SUPPLY ON 2 TURNS OF SEARCH COIL	73
4.4 EMF OF SINGLE-PHASE SUPPLY ON 3 TURNS OF SEARCH COIL	73
4.5 ตารางความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย	82
4.6 ค่าที่ได้จากการวัดแรงดันที่สเตเตอร์, แรงดันที่โรเตอร์, แรงดันที่SEARCH COIL	83
4.7 ผลการคำนวณจำนวนรอบต่อเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ของสเตเตอร์และโรเตอร์	84
4.8 ค่าความต้านทานเมื่อวัดที่จุดเชื่อมต่อจุดต่างๆกับจุดต่อร่วมสตาร์	86
4.9 ผลกระแสสามเฟสที่จุดเชื่อมต่อตั้งต้น A-X, B-Y, C-Z	87
4.10 ผลกระแสสามเฟสที่จุดเชื่อมต่อเมื่อเปลี่ยนจุดเชื่อมต่อที่แปรงถ่าน(Y กับ X) A-Y, B-X, C-Z	87
4.11 ผลกระแสสามเฟสที่จุดเชื่อมต่อเมื่อเปลี่ยนจุดเชื่อมต่อที่แปรงถ่าน(Z กับ X) A-Z, B-Y, C-X	87
4.12 ผลกระแสสามเฟสที่จุดเชื่อมต่อเมื่อเปลี่ยนจุดเชื่อมต่อที่แปรงถ่าน(Z กับ Y) A-X, B-Z, C-Y	87
4.13 ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของขดลวดค้นหาพันบนสเตเตอร์ จ่ายไฟเข้าที่ขดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ 18V(L-N)	88
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ค(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 3 แอมป์	91
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ค(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 3.5 แอมป์	92
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ค(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 4 แอมป์	93
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ค(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 4.5 แอมป์	94
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ค(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 6 แอมป์	95
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ค(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 7 แอมป์	96
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ค(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 8 แอมป์	97
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ค(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 9 แอมป์	98
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ค(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 10 แอมป์	99

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

เนื่องจากในปัจจุบันในโรงงานอุตสาหกรรมทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ล้วนแต่ใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับมีข้อได้เปรียบมากกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงในหลายด้าน ดังตัวอย่างเช่น เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงจำเป็นต้องใช้คอมมิวเตเตอร์ (commutator) และแปรงถ่านในการทำงาน ทำให้ถูกจำกัดในเรื่องความเร็ว (speed) ของเครื่องจักรกล ซึ่งมีความจำเป็นในการซ่อมบำรุงเป็นพิเศษ และที่พิกัดเท่ากัน เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับมีข้อได้เปรียบมากกว่า ในด้านของประสิทธิภาพ

ในการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับทั้งเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัส เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ และเครื่องจักรกลไฟฟ้าสมัยใหม่ จำเป็นต้องใช้หลักการของสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating field) ซึ่งสนามแม่เหล็กหมุนเป็นปัจจัยสำคัญทำให้เกิดแรงบิดในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับและเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

เนื่องจากการศึกษาเพื่อการเรียนรู้ในทางปฏิบัติยังไม่เคยเกิดขึ้นเกี่ยวกับการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กหมุนหรือวัตต์ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) ของสนามแม่เหล็กหมุน ที่คร่อมที่ช่องอากาศ, ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นแกนเหล็กในวงจรแม่เหล็ก, ค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็ก ( $\phi_p$ ), ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด ( $B_m$ ) ทั้งในย่านเชิงเส้นและในช่วงที่ทำให้เกิดที่เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็กโดยจะศึกษาในรูปแบบของ พลังงานร่วมและแรงบิดในช่องอากาศ เพื่อพิสูจน์ว่าแรงบิดในช่องอากาศเกิดจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศจริง โดยสามารถเปรียบเทียบแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กกับแรงบิดที่เพลาทังย่านแกนเหล็กไม่อิ่มตัว และในย่านที่แกนเหล็กอิ่มตัว ฉะนั้นโครงการนี้จะทำการศึกษาสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อเป็นประโยชน์ในการศึกษาเชิงวิชาการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง กับทฤษฎีของสนามแม่เหล็กหมุน

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. มีความรู้และความเข้าใจในหลักการทำงานของสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับและสามารถอธิบายคุณลักษณะของสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้น
2. มีความรู้และความเข้าใจในการหาโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ เช่น ลักษณะการพันของขดลวดอาร์มาเจอร์ จำนวนรอบของขดลวด จำนวนและตำแหน่งของขั้วแม่เหล็ก
3. มีความรู้และความเข้าใจในการใช้วิธีการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรแม่เหล็ก เช่น แรงเคลื่อนแม่เหล็ก ความต้านทานแม่เหล็ก และเส้นแรงแม่เหล็ก
4. มีความรู้และสามารถอธิบายแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นที่ช่องอากาศได้ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับและพิสูจน์ว่าแรงบิดในช่องอากาศเกิดจากแรงเคลื่อนแม่เหล็ก
5. มีความรู้และความเข้าใจในเรื่องแรงบิดในช่องอากาศ (Electromagnetic Torque) และค่าพลังงานร่วม (Co-energy) โดยสามารถเปรียบเทียบแรงบิดในช่องอากาศกับแรงบิดที่เพลลาได้ และอธิบายผลของแรงบิดที่เกิดขึ้นขณะแกนเหล็กอยู่ในย่านอิ่มตัว

## 1.3 ขอบเขต

1. หาโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อความเข้าใจในเครื่องจักรกลต้นแบบที่จะทำการศึกษได้แก่ ทฤษฎีการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ , วิธีการหาจำนวนขั้วแม่เหล็ก และวัดขนาดที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลอง (dimension) และจะเน้นไปที่การศึกษาและการวิเคราะห์หาวิธีการทำการทดลองเพื่อวัดค่าที่ได้และเปรียบเทียบกับทฤษฎี
2. หาวงจรแม่เหล็กโดยใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าสลับ (AC Machine) แบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส (Three-Phase Induction Machine) เพื่อที่จะหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นแกนเหล็กในวงจรแม่เหล็ก, ค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็ก, ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด ทั้งในย่านเชิงเส้นและในย่านที่ทำให้เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็ก
3. หาสนามแม่เหล็กหมุน ที่เกิดขึ้นที่ช่องอากาศ (air gap) โดยการใช้ search coil
4. หาค่าเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็ก ความเข้มสนามแม่เหล็ก พลังงานที่ส่งผ่านที่ช่องอากาศ ( $W_{fld}$ ) และแรงบิดที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็ก ( $T_{fld}$ )

## 1.4 แผนการดำเนินงาน

## ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินการ	ปีการศึกษา 2558									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ศึกษาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กหมุน	↔									
ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเอกสารที่เกี่ยวข้อง	↔									
ทดสอบเพื่อหาจำนวนขั้วแม่เหล็ก, วัด dimensions รวมถึงศึกษาโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำต้นแบบ		↔								
ใส่ search coil เพื่อจับสัญญาณแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเพื่อหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็กและค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็กที่ทำให้แกนเหล็กอิ่มตัว			↔							
แก้ไขปัญหาเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่เกิดการเหนี่ยวนำที่โรเตอร์มีลักษณะไม่สมดุลทั้งสามเฟส							↔			
พิสูจน์ว่าแรงบิดในช่องอากาศเกิดจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศจริงโดยเปรียบเทียบกับแรงบิดที่เพลลา									↔	
ทดลองจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในย่านแกนเหล็กอิ่มตัวและแกนเหล็กไม่อิ่มตัวเพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้น									↔	
สรุปและเปรียบเทียบผลการทดลอง									↔	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถนำการทดลองที่ได้ออกแบบทำเป็นเอกสารประกอบการทดลองทางวิศวกรรมไฟฟ้า
2. สามารถพัฒนาเพื่อนำไปเป็นสื่อการเรียนรู้ทางวิศวกรรมทางวิศวกรรมไฟฟ้าสำหรับนักศึกษาและผู้ที่มีความสนใจ
3. สามารถนำความรู้ที่ได้รับไปใช้ในชีวิตการทำงานของผู้ศึกษา
4. ทำให้ผู้อ่านเข้าใจหลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้า อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กหมุน



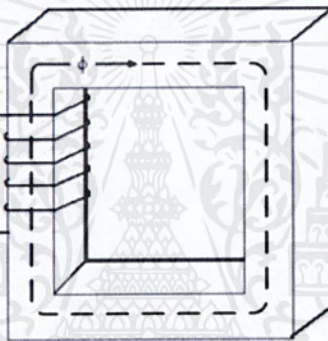
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วงจรแม่เหล็ก[1]

วงจรแม่เหล็กเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งของเครื่องจักรกลไฟฟ้า เป็นตัวกลางในการผ่านของสนามแม่เหล็ก ในวงจรแม่เหล็กนั้นมีความต้านทานทางแม่เหล็กเช่นเดียวกับความต้านทานทางไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า จึงทำให้เกิดความสูญเสียที่แกนเหล็ก นอกจากนี้วงจรแม่เหล็กยังประกอบไปด้วยช่องอากาศ ซึ่งเป็นที่สะสมพลังงานที่อยู่ในรูปสนามแม่เหล็กซึ่งมีค่าความต้านทานทางแม่เหล็กเช่นกัน



รูปที่ 2.1 วงจรแม่เหล็ก

#### 2.2 สารแม่เหล็ก (Magnetic Material) [2]

สารแม่เหล็กเป็นสารที่ใช้ในการนำมาสร้างวงจรแม่เหล็กโดยแต่ละชนิดจะมีค่าความซึมซาบทางแม่เหล็ก (Permeability) สารที่ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กสูงเมื่อเทียบกับอากาศจะมีค่าความต้านทานทางแม่เหล็กต่ำเหมาะแก่การนำมาสร้างเป็นวงจรแม่เหล็ก โดยค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กจะแปรผันอยู่กับค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ (Relative permeability)

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

เมื่อ  $\mu_0$  คือความซึมซาบทางแม่เหล็กของอากาศมีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7}$  หน่วย Wb/At.m

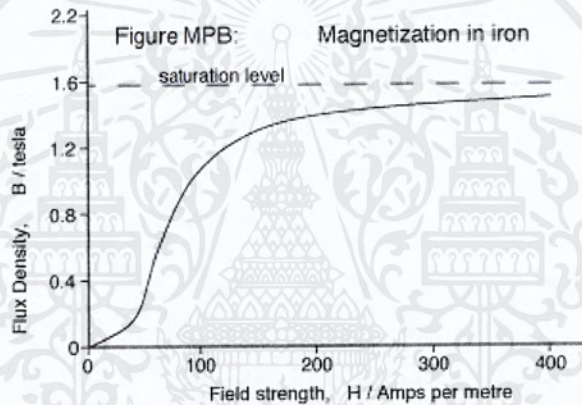
$\mu$  คือ Permeability หน่วย Wb/At.m

$\mu_r$  คือ ความซึมซาบทางสัมพัทธ์ หน่วย หน่วย Wb/At.m

ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์สามารถแบ่งสารแม่เหล็กออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. สาร Diamagnetic เป็นสารที่มีค่า  $\mu_r$  น้อยกว่า 1 เช่น ตะกั่ว เป็นต้น ซึ่งจะเกิดค่าสนามแม่เหล็กได้น้อยมาก
2. สาร Paramagnetic เป็นสารที่มีค่า  $\mu_r$  ประมาณเท่ากับ 1 หรือมากกว่า 1 เล็กน้อย เช่น อากาศ ทองแดง อลูมิเนียม เป็นต้น ซึ่งอาจจะกำหนดให้ว่ามีค่า  $\mu_r$  คงที่ประมาณเท่ากับ  $\mu_0$
3. สาร Ferromagnetic เป็นสารที่มีค่า  $\mu_r$  ประมาณมากกว่า 1 ( $10^2$ - $10^6$ ) เช่น เหล็ก นิกเกิล เป็นต้น ซึ่งจะเกิดค่าสนามแม่เหล็กได้มาก แต่จะมีค่าไม่คงที่เมื่อ  $H$  เปลี่ยนแปลงไป

การอิมตัวของวัสดุตัวนำแม่เหล็ก คือ สภาพที่วัสดุตัวนำแม่เหล็กยอมรับสภาพการเปลี่ยนแปลงเป็นแม่เหล็กเต็มที่แล้ว ซึ่งพฤติกรรมของการเกิดสนามแม่เหล็กของสารแม่เหล็กเราจะพิจารณาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความเข้ม (Magnetic field intensity :  $H$ ) และค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (Magnetic flux density :  $B$ )



รูปที่ 2.2 การเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามแม่เหล็กต่อความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก[2]

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มค่ากระแสมากขึ้นจะทำให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจึงทำให้ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นจนถึงจุดๆ หนึ่งที่เมื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กแล้ว แต่ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับเพิ่มขึ้นน้อยมากหรือไม่เพิ่มขึ้นเราเรียกย่านนี้ว่าย่านแกนเหล็กอิ่มตัว (Saturated region) โดยถ้าสารแม่เหล็กมี

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นไปอย่างเชิงเส้นจะสามารถเขียนความสัมพันธ์เป็นไปอย่างเชิงเส้นได้เป็น

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad \text{..... (2.2)}$$

เมื่อ	$H$ คือความเข้มสนามแม่เหล็ก	หน่วย At/Wb
	$B$ คือความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก	หน่วย Tesla

### 2.3 ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance) [2]

ความต้านทานแม่เหล็กคือ ความต้านทานที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็ก ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาว  $l$  และเป็นสัดส่วนผกผันกับพื้นที่หน้าตัด  $A$  และ  $\mu$  ที่เส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi$  ผ่านไปจะได้

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad \text{..... (2.3)}$$

เมื่อ	$\mathcal{R}$ คือ ความต้านทานแม่เหล็ก	หน่วย A/Wb
	$A$ คือ พื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็ก	หน่วย $m^2$

### 2.4 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance) [2]

เมื่อมีการกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวด ที่มีจำนวนรอบ  $N$  รอบ ซึ่งจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi(t)$  ดังนั้น จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด ของขดลวดจำนวนรอบ  $N\phi(t)$  รอบ จากกฎของ Faraday's law สรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้น (Induced voltage) ในแต่ละรอบของขดลวด ซึ่งขดลวดจำนวนรอบ  $N$  รอบ ก็คือ

$$e(t) = v(t) = N \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad \text{..... (2.4)}$$

เมื่อ	$\lambda$ คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้อง (Flux Linkage)	หน่วย (Wb - T)
-------	---	----------------

ซึ่งจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่จำนวนรอบ  $N$  รอบ  $N\phi(t)$  นั้นขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด นั่นคือ

$$\lambda = N\phi = Li$$

ดังนั้น

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\phi}{i} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

ดังนั้น “ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขดลวดจะเป็นค่าของจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องต่อหนึ่งหน่วยกระแส”

จาก

$$\phi = BA, \quad B = \mu H, \quad H = \frac{Ni}{l}$$

จะได้

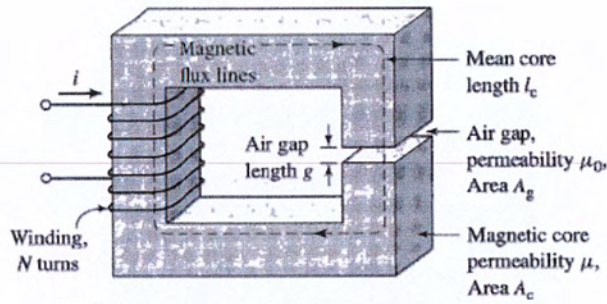
$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\phi}{i} = \frac{NBA}{i} = \frac{N\mu HA}{i} = \frac{N\mu NiA}{il}$$

เพราะฉะนั้น ถ้าเราเลือกแกนเหล็กที่ใช้สาร Ferromagnetic ที่มีค่า  $\mu_r$  สูงมากๆ จะทำให้ค่า

$\mathcal{R}_g \gg \mathcal{R}_c$  ( $\mathcal{R}_c = 0$ ) จะได้สมการหาค่าความเหนี่ยวนำใหม่ คือ

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}_g} = \frac{N^2 \mu_0 A_g}{l_g} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

แสดงให้เห็นว่าค่า  $L$  จะมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่ากระแส แต่ค่า  $L$  จะมีค่าแปรผันตรงกับค่า  $N^2$  และแปรผกผันกับค่า  $l_g$  ดังนั้นเราจึงสามารถปรับค่า  $L$  ได้ตามความต้องการเช่น ถ้าต้องการค่า  $L$  ที่เปลี่ยนแปลงอย่างมาก ก็สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่าจำนวนรอบของขดลวด  $N$  แต่ถ้าต้องการค่า  $L$  ที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ก็สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนระยะช่องว่างอากาศ  $l_g$  ดังรูป



รูปที่ 2.3 วงจรแม่เหล็กเมื่อความต้านทานแม่เหล็กมีค่าน้อยมาก[2]

สำหรับระบบที่มีขดลวดหลายขด ค่าของตัวเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนขดลวดแต่ละขดนั้น จะมี 2 ค่า คือ

2.4.1 Self-Inductance[2]



รูปที่ 2.4 การเกิด Self-Inductance[2]

$$L_{11} = \frac{\lambda_{11}}{i_1} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$L_{22} = \frac{\lambda_{22}}{i_2} \dots\dots\dots (2.8)$$

เมื่อ  $L_{11}$  คือ Self-Inductance ของขดลวด 1 หน่วย H

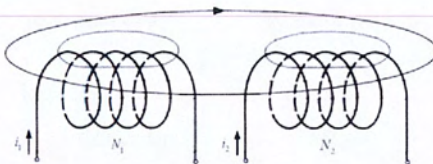
$\lambda_{11}$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้อง (Flux Linkage) ของขดลวด 1 หน่วย Wb

$L_{22}$  คือ Self-Inductance ของขดลวด 2 หน่วย H

$\lambda_{22}$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้อง (Flux Linkage) ของขดลวด 2 หน่วย Wb

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.2 Mutual Inductance [2]



รูปที่ 2.5 การเกิด Mutual Inductance[2]

$$L_{12} = \frac{\lambda_{12}}{i_2} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

เมื่อ  $L_{12}$  คือ Mutual Inductance ของขดลวด 1 อันเกิดจากการเหนี่ยวนำของ ขดลวด 2

หน่วย H

$\lambda_{12}$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้อง (Flux Linkage) ที่เกิดของขดลวด 1 ซึ่งเกิดจากกระแสไหลในขดลวด 2

หน่วย Wb

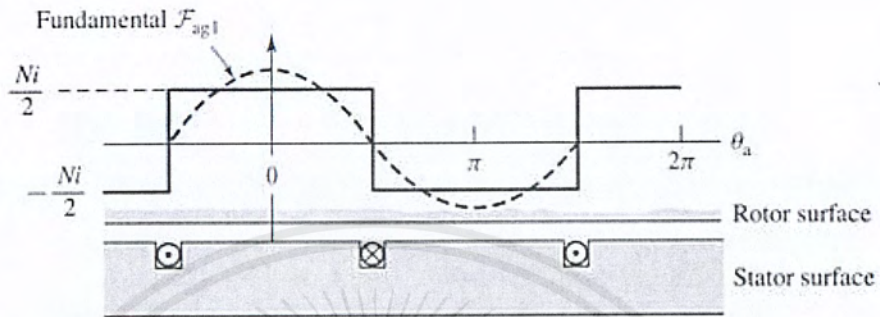
$i_2$  คือ กระแสที่ไหลในขดลวด 2

หน่วย A

## 2.5 ทฤษฎีการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน[1]

ในการศึกษาทฤษฎีการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน จำเป็นที่จะต้องศึกษาแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetomotive force, mmf) ที่ตกคร่อมที่ช่องอากาศ เมื่อทำการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีตัวโรเตอร์เป็นลักษณะทรงกระบอก (Cylindrical rotor) ซึ่งทำให้ความกว้างของช่องอากาศคงที่ เมื่อเราถือว่าค่า Relative permeability  $\mu_r$  ของแกนเหล็กที่ใช้ทำแกนสเตเตอร์และโรเตอร์มีค่าสูงมาก ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ตกคร่อมแม่เหล็กถือว่าน้อยมาก โดยแรงเคลื่อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะถือว่าตกคร่อมที่ช่องอากาศทั้งหมด

ในการพันขดลวดแบบเป็นก้อน (Concentric coil) ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่กระจายโดยรอบของช่องอากาศจะมีขนาดคงที่ตลอดช่วงของขั้วแม่เหล็กค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จึงเป็นในรูปแบบ Square wave



รูปที่ 2.6 การกระจายของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ช่องอากาศ[3]

จากการกระจายของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากขดอาร์มาเจอร์ จะใช้ Fourier series ในการแตกองค์ประกอบของ Square wave ของ mmf ที่มีขนาดเท่ากับ K ได้ดังนี้

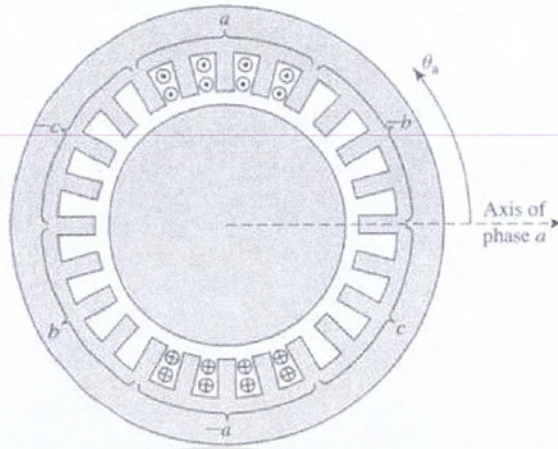
$$F(\theta) = \frac{4}{\pi} K [\cos \theta - \frac{1}{3} \cos 3\theta + \frac{1}{5} \cos 5\theta - \frac{1}{7} \cos 7\theta + \frac{1}{9} \cos 9\theta - \dots] \quad (2.10)$$

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

$$K = \frac{N_{ph} i(t) K_w}{P} \quad \dots\dots (2.11)$$

เมื่อป้อนกระแส  $i(t) = I_m \cos(\omega t)$

เมื่อเราพิจารณาเฉพาะแรงเคลื่อนแม่เหล็กมูลฐาน และกำหนดให้แกนของเฟส  $a$  ที่สเตเตอร์อยู่ที่มุม  $\theta = 0^\circ$



รูปที่ 2.7 ตำแหน่งของขดลวด เฟส  $a$  ที่พื้นแบบกระจาย (concentrated winding) [3]

จะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กมูลฐาน

$$F(\theta, t) = F_{max} \cos(\theta) \cos(\omega t) \quad \dots\dots (2.12)$$

$$F(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{max} \cos(\theta + \omega t) \quad \dots\dots (2.13)$$

โดยที่ค่า  $F_{max} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_p h I_m}{P} \quad \dots\dots (2.14)$

เมื่อ  $F(\theta, t)$  คือเป็นค่าของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่มุม  $\theta$  และเวลา  $t$  ใดๆ

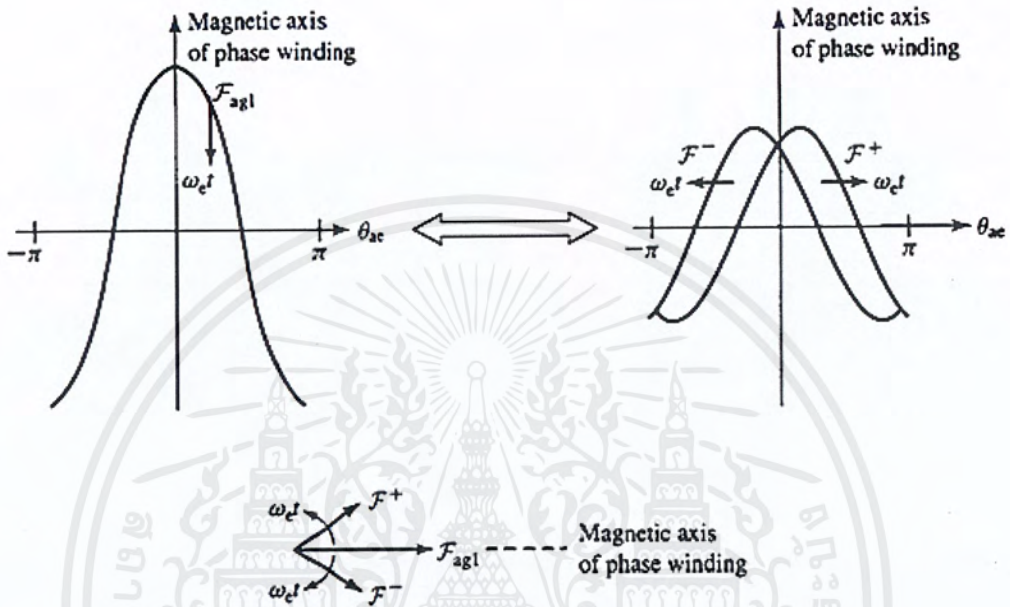
$I_m$  คือค่าสูงสุดของกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก

$\theta$  คือตำแหน่งมุมใดๆในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับโดยมีแกนของเฟส  $a$  เป็น แกนอ้างอิง

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์จะมีทิศทางอยู่ในแนวแกนของขดลวดเฟส  $a$  และมีขนาดตามกระแสสลับที่ป้อนเข้าซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสองเทอมคือ

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

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

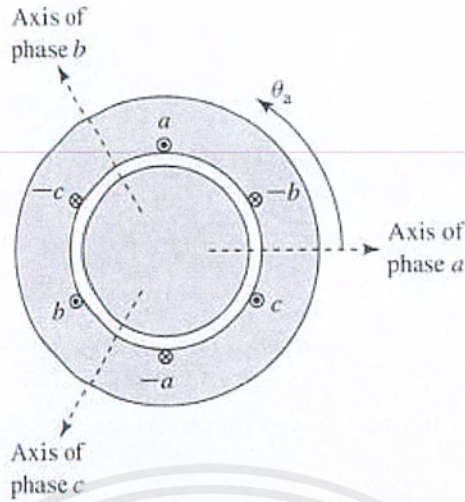


รูปที่ 2.8 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เป็น traveling wave [3]

การที่มีสนามแม่เหล็กสองชุดเคลื่อนที่ตรงกันข้ามกันแบบนี้จะทำให้เกิดการหักล้างกันของแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กเพราะเทอมแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เคลื่อนตัวทศบวก จะทำให้เกิดแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กดึงไปในทิศบวก ในขณะที่เทอมแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เคลื่อนตัวทศลบ จะทำให้เกิดแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กดึงไปในทิศลบ ดังนั้นแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กชั่วขณะจะเป็นศูนย์ ทำให้ไม่มีแรงบิดลัพท์การป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ที่ขดอาร์มาเจอร์ ดังนั้นถ้าต้องการสนามแม่เหล็กที่หมุนในทิศทางเดียวจะต้องมีขดลวดที่จะไฟฟ้าจ่ายกระแสสลับมากกว่า 1 เฟส ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส

โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส จะมีขดลวดอาร์มาเจอร์ 3 ชุด ที่สเตเตอร์ โดยที่ขดลวดจะวางห่างกัน  $120^\circ$  ไฟฟ้าดังรูป ( $\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ตำแหน่งการวางขดลวดสามเฟส ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ สองขั้วแม่เหล็ก[3]

โดยกำหนดให้

แกนของขดลวดเฟส  $a$  อยู่ที่ตำแหน่ง  $0^\circ$

แกนของขดลวดเฟส  $b$  อยู่ที่ตำแหน่ง  $120^\circ$

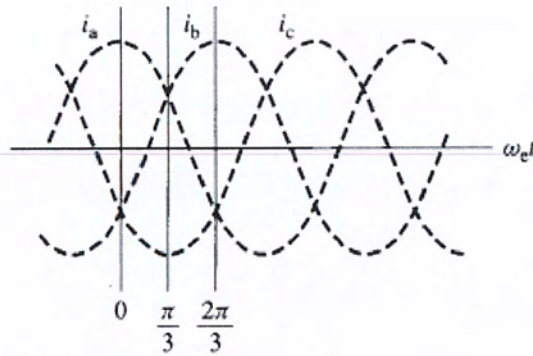
แกนของขดลวดเฟส  $c$  อยู่ที่ตำแหน่ง  $240^\circ$

เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าที่ขดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยมีค่าของกระแสสามเฟสดังนี้

$$i_a(t) = I_m \cos(\omega t) \quad \dots\dots (2.15)$$

$$i_b(t) = I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \quad \dots\dots (2.16)$$

$$i_c(t) = I_m \cos(\omega t - 240^\circ) \quad \dots\dots (2.17)$$



รูปที่ 2.10 สัญญาณกระแสไฟฟ้าสามเฟส[3]

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแส  $i_a(t)$  เข้าที่ขดเฟส a และแกนของขดเฟส a อยู่ที่  $0^\circ$  ทางไฟฟ้า

$$F_a(\theta, t) = F_{max} \cos(\theta) \cos(\omega t) \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

$$F_a(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{max} \cos(\theta + \omega t) \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแส  $i_b(t)$  เข้าที่ขดเฟส b และแกนของขดเฟส b อยู่ที่  $120^\circ$  ทางไฟฟ้า

$$F_b(\theta, t) = F_{max} \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ) \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

$$F_b(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{max} \cos(\theta + \omega t - 240^\circ) \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแส  $i_c(t)$  เข้าที่ขดเฟส c และแกนของขดเฟส c อยู่ที่  $240^\circ$  ทางไฟฟ้า

$$F_c(\theta, t) = F_{max} \cos(\theta + 240^\circ) \cos(\omega t + 240^\circ) \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

$$F_c(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{max} \cos(\theta + \omega t - 120^\circ) \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

เมื่อรวมทั้งสามเทอมเข้าด้วยกัน จะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ (Rotating mmf wave)

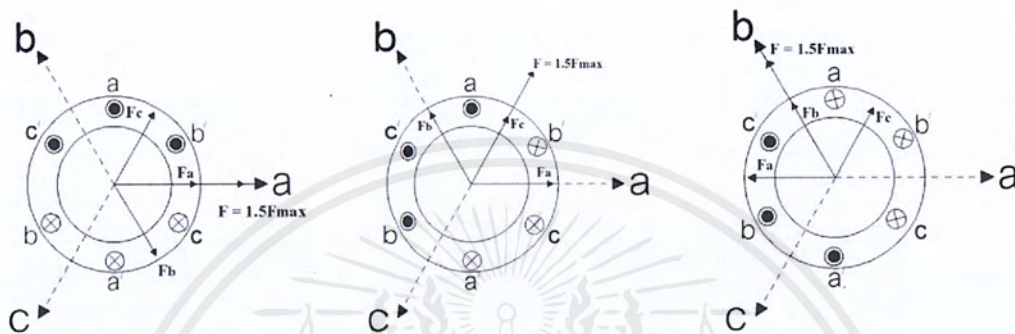
$$F_{total}(\theta, t) = F_a(\theta, t) + F_b(\theta, t) + F_c(\theta, t) \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

โดยที่เทอม

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

$$F_{total}(\theta, t) = \frac{3}{2}F_{max}\cos(\theta - \omega t) \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

เมื่อ  $F_{total}(\theta, t)$  : เป็นค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กหลัก (Rotating mmf wave) ที่มุม  $\theta$  และเวลา  $t$  ใดๆ



รูปที่ 2.11 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสสามเฟสในขดลวดที่วางห่างกัน 120° ทางไฟฟ้า[3]

### 2.6 ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน (Synchronous Speed) [3]

สนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับเกิดจากการหมุนชั่วแม่เหล็กของโรเตอร์หรือเกิดจากการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าที่ขดอาร์มาเจอร์สามเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับจะเรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed)  $n_s$

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

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad \dots\dots\dots (2.26)$$

และสามารถเขียนเป็นความเร็วเชิงมุมซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมทางกลและความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า หน่วย  $rad/s$  ได้

$$\omega_e = \frac{P}{2} \omega_m \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

และจะสามารถเขียนเป็นความถี่ของไฟฟ้า ( $f$ ) และความถี่เชิงกล ( $f_m$ ) หน่วย Hz หรือ รอบ/วินาที

$$f = \frac{P}{2} f_m \quad \dots\dots\dots (2.28)$$

ทำการแปลงหน่วยความถี่ทางให้เป็นหน่วย รอบ/นาที ได้สมการ

$$f = \frac{P}{2} \left( \frac{n_s}{60} \right) \quad \dots\dots\dots (2.29)$$

จะได้สมการของความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad \dots\dots\dots (2.30)$$

เมื่อ  $n_s$  คือ ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน (Synchronous Speed)

$f$  คือ ความถี่ของไฟฟ้าที่ป้อนขดอาร์มาเจอร์

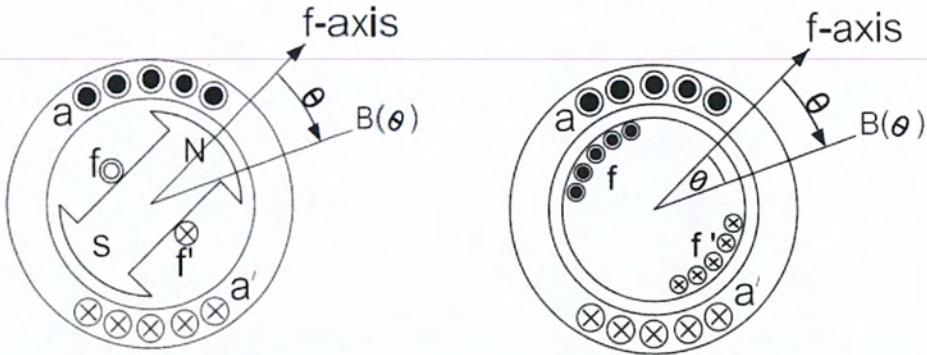
$P$  คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

## 2.7 การกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสสลับ 3 เฟส[1]

การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับนั้นเพื่อต้องการสร้างไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส โดยที่ลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าเป็นแบบรูปคลื่นไซน์ (sine wave) แต่ละเฟสห่างกันเท่ากับ 120 องศา

โดยที่การกระจายของค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับจะมีการเปลี่ยนแปลงตามแบบ sine function

ขั้วแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการกระจายความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเป็นแบบไซน์ฟังก์ชัน สามารถสร้างได้ทั้งโครงสร้างโรเตอร์แบบขั้วยื่น (Salient pole) หรือตัวโรเตอร์แบบทรงกระบอก (Cylindrical rotor) โดยแบบขั้วยื่นจะใช้ความกว้างของช่องอากาศเป็นตัวกำหนดค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่มุมต่างๆของขั้วแม่เหล็ก ส่วนที่โรเตอร์แบบทรงกระบอกจะอาศัยการกระจายแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กที่มุมต่างๆจากการพันกระจาย (Distribution winding)



รูปที่ 2.12 โรเตอร์แบบขั้วยื่นและโรเตอร์แบบทรงกระบอกของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ

การกระจายค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่มุม  $\theta$  ใดๆเมื่อเทียบจากจุดกึ่งกลางของขั้วแม่เหล็กเป็นแกนอ้างอิงที่  $\theta = 0^\circ$  จะได้ว่า

$$B(\theta) = B_m \cos \theta \quad \dots\dots\dots (2.31)$$

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

$$\phi_p = \int B(\theta) dA$$

$$\phi_p = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} B_m \cos \theta l r d\theta = 2 B_m l r \quad \dots\dots\dots (2.32)$$

เมื่อ  $l$  เป็นความยาวตามแนวแกนและ  $r$  เป็นรัศมีของช่องอากาศ

และในกรณีที่มี  $P$  ขั้วแม่เหล็ก ถ้าโครงสร้างของเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวตามแนวแกนเท่ากัน จะพบว่าพื้นที่ของขั้วแม่เหล็กจะลดลงทำให้ค่าเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วลดลงตามจำนวนขั้ว

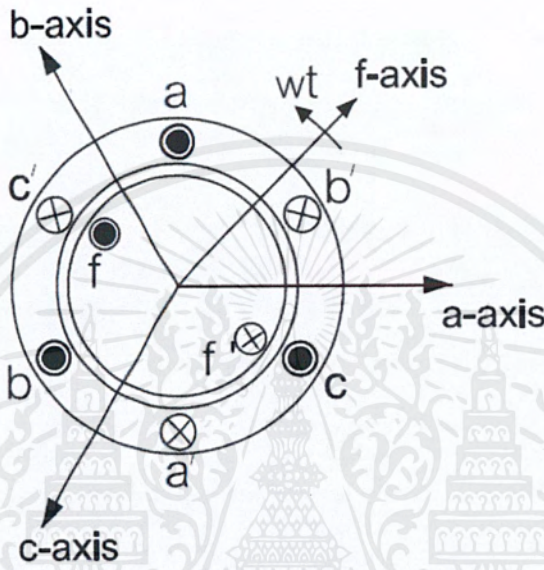
$$\phi_p = \frac{2}{P} 2 B_m l r \quad \dots\dots\dots (2.34)$$

เมื่อมีการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ 3 เฟสที่ตัวสเตเตอร์(Stator) โดยขดลวดแต่ละเฟสวางห่างกันเท่ากับ 120 องศาไฟฟ้า ดังแสดงตามรูปที่ 2.13 จะได้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องของขดลวดแต่ละเฟสที่พันแบบอัดเป็นก้อน(Concentric coil) ที่มีจำนวนรอบของขดลวดเท่ากับ  $N$  และความกว้างของขดลวดเท่ากับ 180 องศาไฟฟ้า

$$\lambda_a = N\phi_p \cos \omega t \quad \dots\dots\dots (2.35)$$

$$\lambda_b = N\phi_p \cos(\omega t - 120^\circ) \quad \dots\dots\dots (2.36)$$

$$\lambda_c = N\phi_p \cos(\omega t - 240^\circ) \quad \dots\dots\dots (2.37)$$



รูปที่ 2.13 ตำแหน่งวางขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดในกรณีที่มีเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องในขดลวด (Flux linkage:  $\lambda$ ) โดยที่  $\lambda = N\phi_p \cos \omega t$

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = N \frac{d(\phi_p \cos \omega t)}{dt} \quad \dots\dots\dots (2.38)$$

$$e = N \left( \frac{d\phi_p}{dt} \right) \cos \omega t - \omega N\phi_p \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (2.39)$$

ผลการทำการหาอนุพันธ์(Differentiate) จะได้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดออกมาเป็น 2 เทอมที่เกิดจาก  $\phi_p$  และ  $\cos \omega t$  โดยเรียกชื่อจากที่มาของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังนี้

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 ไม่ว่าจะเป็นขดลวดอาร์มาเจอร์เคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็กที่ตัดสนามแม่เหล็กหรือขั้วแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดจะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจาก  $\frac{d(\cos \omega t)}{dt}$

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

$$e = -\omega N \phi_p \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (2.40)$$

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

$$e_a = \omega N_{ph} \phi_p K_w \sin \omega t = E_{a,max} \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (2.41)$$

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

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

หรือ 
$$E_{af} = 4.44 f N_{ph} \phi_p K_w \quad \dots\dots\dots (2.42)$$

จากสมการสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ของ  $E_{af}$  กับ  $\phi_p$  และ  $f$  โดยที่ความถี่ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ( $f$ ) สามารถหาค่าได้กึ่งสมการต่อไปนี้

$$E_{af} = K f \phi_p \quad \dots\dots\dots (2.43)$$

เมื่อ  $K$  : เป็นค่าคงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_{af}$  กับ  $\phi_p$  และ  $f$

ในทำเดียวกันสามารถหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด b และ c

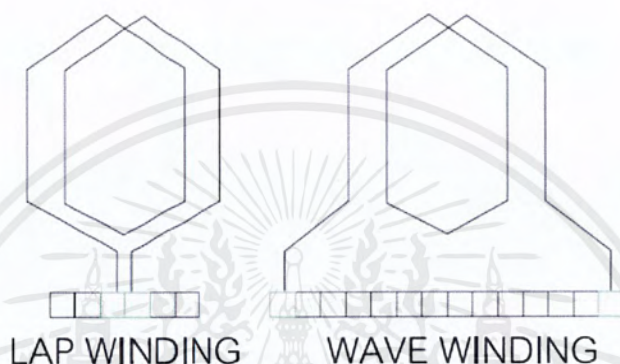
$$e_b = \omega N_{ph} \phi_p K_w \sin(\omega t - 120^\circ) = E_{a,max} \sin(\omega t - 120^\circ) \quad \dots\dots\dots (2.44)$$

$$e_c = \omega N_{ph} \phi_p K_w \sin(\omega t - 240^\circ) = E_{a,max} \sin(\omega t - 240^\circ) \quad \dots\dots\dots (2.45)$$

## 2.8 การพันขดลวดอามาเจอร์[2]

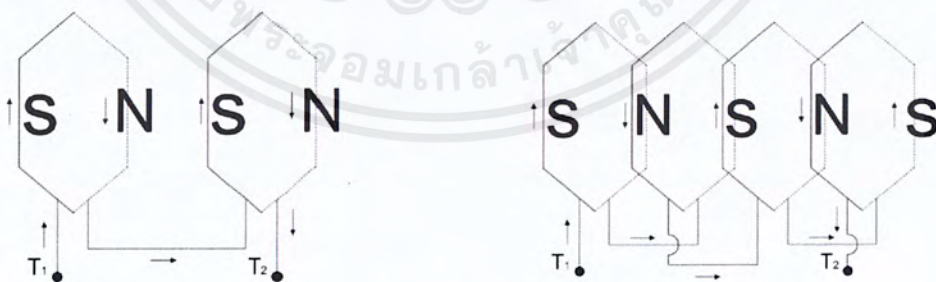
การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้สร้างแรงดันเอาต์พุต ได้ตามต้องการ สิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงคือ การพันขดลวดอามาเจอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับมีการพันขดลวดอามาเจอร์แตกต่างกัน โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมีการพันลักษณะวงจรรปิด แต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเป็นทั้งแบบวงจรรเปิด(สตาร์) และวงจรรปิด(เดลต้า)

### 2.8.1.ขดลวดอามาเจอร์ของเครื่องกำเนิด 1 เฟส (Single Phase Winding) [2]



รูปที่ 2.14 การพันขดลวดด้านซ้ายแบบแล็ป และด้านขวาแบบเวฟ[2]

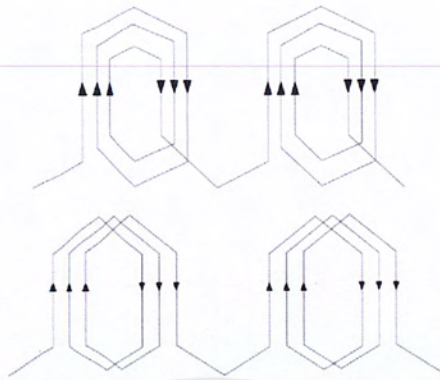
เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส จะใช้งานเฉพาะสถานที่ การพันขดลวด 1 เฟสนิยมพันแบบแล็ป และแบบเวฟ ซึ่งทั้ง 2 แบบให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากัน จากรูปที่ 2.14เป็นการพันแบบเวฟและแบบแล็ป แต่การพันแบบแล็ปทำได้ง่ายกว่าแบบเวฟ จากรูปที่ 2.15 การพันแบบนี้ใน 1 ร่องสลีตมี 1 คอยล์ไซด์ เรียกว่า half-coil winding จำนวน coil-group ต่อเฟสเท่ากับครึ่งหนึ่งของขั้วแม่เหล็ก การต่อขดลวดแต่ละ coil-group เข้าด้วยกันแบบปลายต่อต้น ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การพันขดลวดด้านซ้ายแบบชั้นเดียว และด้านขวาแบบสองชั้น

การพันขดลวดอามาเจอร์แบบแล็ปและแบบเวฟ สองชั้น ในร่องสลีตมี 2 คอยล์ไซด์ เรียกว่า whole-coil winding จำนวน coil-group ต่อเฟสเท่ากับจำนวนขั้วแม่เหล็ก การต่อขดลวดแต่ละ coilgroup ต่อแบบปลายต่อปลายอีกแบบหนึ่งที่ใช้ในการพันขดลวด แบบสไปแรล ดังรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



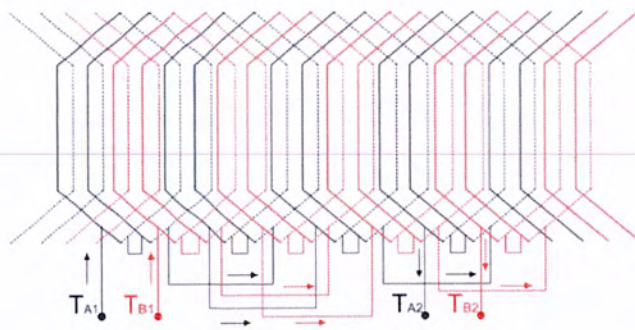
รูปที่ 2.16 การพันขดลวดแบบสไปแรล[2]

การพันขดลวดอานาเมอร์แบบแฉับและแบบเวฟส่วนใหญ่จะพัน 2 ชั้น มี 2 ร่องต่อ  
หนึ่งขั้วแม่เหล็กหรือ 2 coil/group และมีจำนวน coil-group ทั้งหมด 4 coil group ดังรูปที่ 2.17

รูปที่ 2.17 การพันขดลวดอานาเมอร์ 1 เฟส 2 ชั้นแบบแฉับ มี 2 ร่องต่อ 1 ขั้วแม่เหล็ก

### 2.8.2. ขดลวดอานาเมอร์ของเครื่องกำเนิด 2 เฟส (Two Phase Winding) [2]

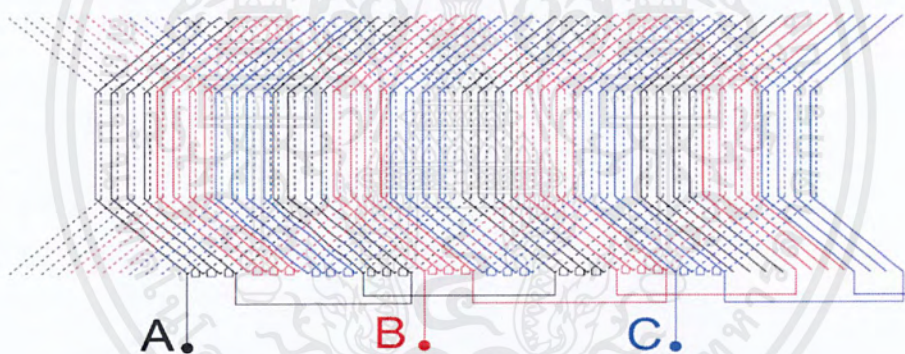
ลักษณะการพันจะคล้ายกับแบบ 1 เฟส แต่จะมีขดลวดเพิ่มมา 1 เฟส ภายใต้อานาเมอร์ 1 ขั้วมีขดลวดพันอยู่ 2 ชุด ขดลวดแต่ละชุดพันเรียงห่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ขดลวดอาเมเจอร์ 2 เฟส พัน 2 ชั้นแบบแลมมี 2 ร่องขั้ว/เฟส

### 2.8.3 ขดลวดอาเมเจอร์ของเครื่องกำเนิด 3 เฟส (Three Phase Winding) [2]

ขดลวดอาเมเจอร์แบบสามเฟส คือขดลวดอาเมเจอร์แบบหนึ่งเฟส 3 ชุดอยู่ในร่อง ภายใต้ขั้วแม่เหล็ก 1 ขั้ว ดังรูปที่ 2.19 ขดลวดแต่ละชุดจะพันเรียงห่างกัน 120 องศาไฟฟ้าแต่ละ coil-group ประกอบด้วยขดลวด 4 ขดต่ออนุกรมหรือมีจำนวนคอยล์ 4 coil/group



รูปที่ 2.19 ขดลวดอาเมเจอร์แบบ 3 เฟส พัน 2 ชั้นแบบแลมมีคอยล์พิชเติม

จากรูปที่ 2.17 เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มี 48 ร่อง 4 ขั้วแม่เหล็กดังนั้นให้

$$\begin{aligned}
 n &= \text{จำนวนร่องต่อหนึ่งขั้วแม่เหล็ก} \\
 &= \frac{\text{slot}}{\text{pole}} \\
 &= \frac{48}{4} \\
 &= 12 \text{ ร่อง} \\
 m &= \text{จำนวนร่องต่อหนึ่งขั้วแม่เหล็กต่อหนึ่งเฟส}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{slot}}{\text{pole} \times \text{phase}} \\
 &= \frac{48}{4 \times 3} \\
 &= 4
 \end{aligned}$$

ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางขั้ว N วัตไปยังกึ่งกลางขั้ว S ที่อยู่ประชิดกันเรียกว่า 1 โพลพิช

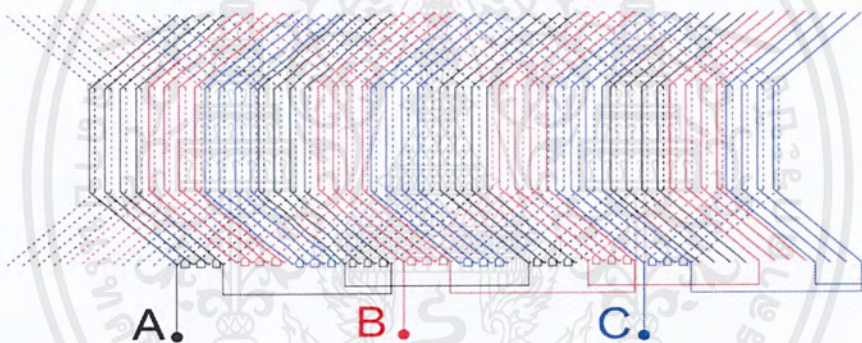
$$= 180 \text{ องศาไฟฟ้า}$$

ให้  $\beta$  = มุมระหว่างร่องสองร่องที่อยู่ประชิดกัน (slot pitch or slot angle)

$$\begin{aligned}
 &= \frac{180}{\text{slot} \times \text{phase}} \\
 &= \frac{180}{4 \times 3} \\
 &= 15 \text{ องศาไฟฟ้า}
 \end{aligned}$$

## 2.9 ขดลวดอาเมเจอร์ของเครื่องกำเนิดสามเฟส

### 2.9.1 ขดลวดอาเมเจอร์ของเครื่องกำเนิดสามเฟสแบบพิชเต็ม (Full Pitch) [2]

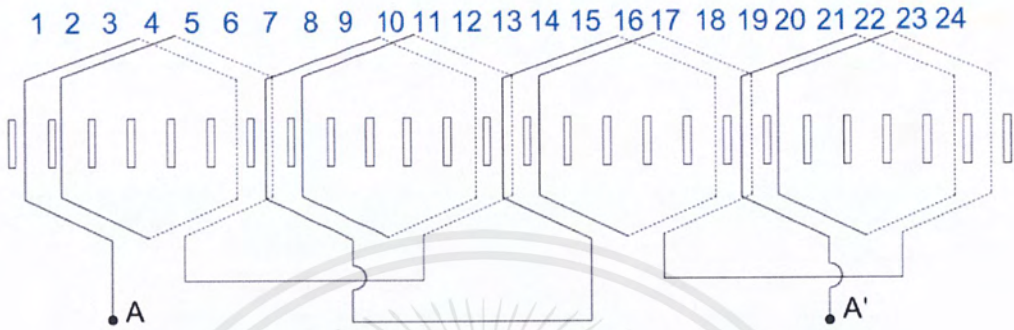


รูปที่ 2.20 การพันขดลวดอาเมเจอร์ 3 เฟสแบบพิชเต็ม

จากรูปที่ 2.20 ขดลวดแต่ละชุดจะพันลงในสลิตห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า จำนวนสลิตต่อหนึ่งขั้วแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 12 สลิต ดังนั้น จำนวนสลิตต่อหนึ่งขั้วแม่เหล็กต่อหนึ่งเฟส มีค่าเท่ากับ 4 สลิต และขั้วแม่เหล็ก 1 ขั้วกว้าง 180 องศาไฟฟ้าหรือต้นและปลายของขดลวดเดียวกันพันห่างกัน 180 องศาไฟฟ้า ดังนั้น สลิตแต่ละสลิตห่างเท่ากับ  $180/12 = 15$  องศาไฟฟ้า การพันขดลวดในเฟส a จะเริ่มที่สลิตที่ 1 ส่วนปลายของคอยล์ที่ 1 จะพันลงในด้านล่างของสลิตที่ 13 ในทำนองเดียวกันต้นของคอยล์ที่ 2 จะเริ่มที่สลิตที่ 2 และปลายคอยล์จะลงสลิตที่ 14 เป็นอย่างนี้เรื่อย ๆ ไป พันจนหมดทุกเฟส ขดลวดที่พันจะเป็นเฟสเดียวกันทั้งชุดที่อยู่ด้านบนและชุดที่อยู่ด้านล่าง

### 2.9.2 ขดลวดอาเมเจอร์ของเครื่องกำเนิดสามเฟสแบบพิชเศษส่วน (Short Pitch) [2]

คือ ระยะห่างระหว่างต้นและปลายของคอยล์เดียวกัน ที่พันลงในสล๊อตของขดลวดอาเมเจอร์มีค่าน้อยกว่า 180 องศาไฟฟ้า หรือระยะห่างน้อยกว่า 6 สล๊อต มีระยะห่างเพียง 5 สล๊อต นั่นคือ ระยะห่างหรือพิชเป็น  $5/6$  ของขดลวดตั้งรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การพันขดลวดอาเมเจอร์ 3 เฟสแบบพิชเศษส่วน[2]

จากรูปการพันขดลวดของแต่ละเฟส ต้นของเฟส a มีปลายของเฟส a มาลงเพียง 2 คอยล์เท่านั้น ส่วนอีกสองสล๊อตต้นของเฟส a ที่เหลือไปทางขวามือจะมีปลายของเฟส c มาลงอีกสองคอยล์ เมื่อนำการพันขดลวดทั้ง 2 แบบไปใช้งานแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตออกมา โดยขดลวดแต่ละชุด จะมีความแตกต่างกันดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดแบบพิชเต็ม และแบบพิชเศษส่วน

## 2.10 สัมประสิทธิ์ของการพันขดลวดอาร์มาเจอร์[1]

ในการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ที่มีจำนวนร่องสลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส ( $n$ ) มากกว่า 1 ร่องสลิต แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำในก้อนขดลวดของเฟสเดียวกันแต่อยู่ต่างร่องสลิตจะมีขนาดเท่ากันแต่จะมีการเลื่อนเฟสระหว่างขดลวด

จากสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในก้อนขดลวด ในกรณีที่ความกว้างของขดลวดเท่ากับความกว้างของขั้วแม่เหล็ก ( $Y_S = Y_p$ ) โดยขดลวดจะมีความกว้างเท่ากับ 180 องศาไฟฟ้า

$$E = 4.44fN_c\Phi_p \quad \text{..... (2.46)}$$

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

$$E_{ph} = 4.44fN_{ph}\Phi_p K_w \quad \text{..... (2.47)}$$

ซึ่งค่าของสัมประสิทธิ์ของการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ (Winding factor :  $K_w$ ) เป็นตัวคูณที่จะมาปรับตัวเลขให้ถูกต้องเนื่องมาจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าของขดลวดในแต่ละเฟสจะต้องรวมแบบเวกเตอร์และความกว้างของขดลวดแต่ละขดอาจน้อยกว่า 180 องศาไฟฟ้า

โดยกำหนดให้

$$K_w = K_d K_p \quad \text{..... (2.48)}$$

ซึ่งจะสามารถหาค่า Distribution factor ( $K_d$ ) ได้จาก

$$K_d = \frac{\text{Phasor sum of each phase}}{\text{Arithmetic sum of each phase}} \quad \text{..... (2.49)}$$

และค่า Pitch factor ( $K_p$ )

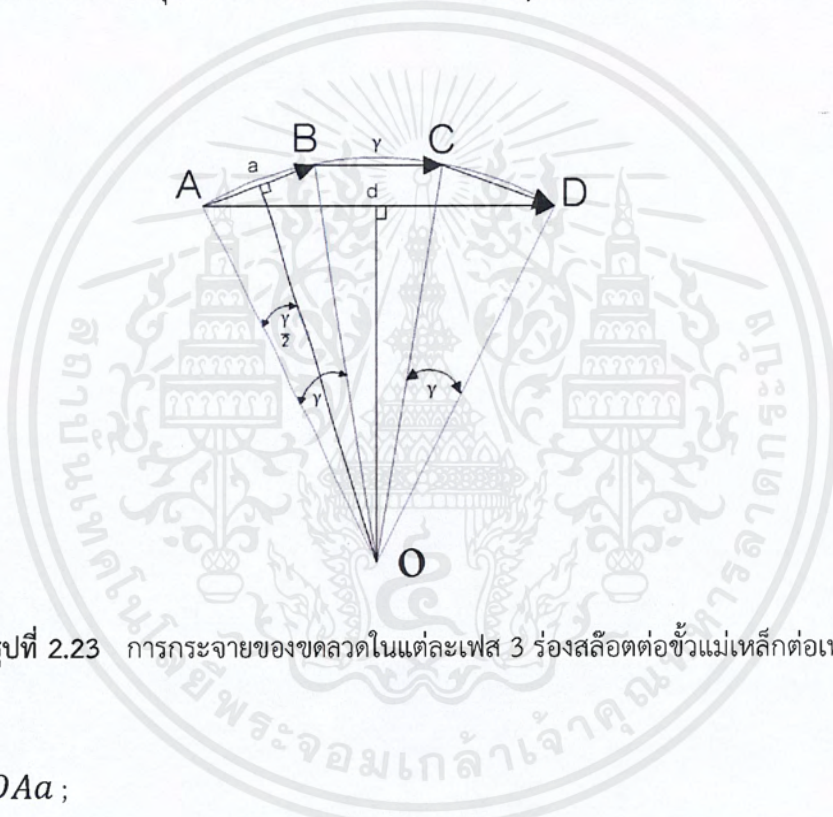
$$K_p = \frac{\text{Induced emf of fractional pitch coil}}{\text{Induced emf of full pitch coil}} \quad \text{..... (2.50)}$$

ในการพันขดลวดที่มีความกว้างของขดลวดที่มีความกว้างของขดลวดเท่ากับ ความกว้างของขั้วแม่เหล็กและมี 1 ร่องสลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส ค่าของสัมประสิทธิ์ของการพันขดลวด

อาร์มาเจอร์ ( $K_w$ ) จะเท่ากับ 1 แต่ถ้าความกว้างของขดลวดน้อยกว่าความกว้างของขั้วแม่เหล็ก ค่าของ Pitch factor จะมีค่าน้อยกว่า 1 ( $K_p < 1$ ) และถ้ามีจำนวนร่องสลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส ( $n$ ) มากกว่า 1 ร่องสลิต จะทำให้ค่าของ Distribution factor มีค่าน้อยกว่า 1 ( $K_p < 1$ )

## 2.11 การคำนวณหาค่า Distribution factor[1]

จากการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่มี 3 เฟส โดยมีจำนวนร่องสลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส ( $n$ ) มากกว่า 1 ร่องสลิต ในรูปที่ 2.23 จะมีค่าจำนวนร่องสลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส เท่ากับ 3 ร่องสลิต ซึ่งจะแสดงถึงเวกเตอร์ 3 ตัวรวมกันโดยแต่ละเวกเตอร์แต่ละตัวจะเท่ากับค่าความกว้างของร่องสลิต ( $\gamma$ ) และหาเวกเตอร์ลัพธ์



รูปที่ 2.23 การกระจายของขดลวดในแต่ละเฟส 3 ร่องสลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส[1]

จาก  $\triangle OAA$  ;

$$OA = \frac{Aa}{\sin \frac{\gamma}{2}} = \frac{AB}{2 \sin \frac{\gamma}{2}} \quad \dots\dots\dots (2.51)$$

จาก  $\triangle OAd$  ;

$$OA = \frac{Ad}{\sin \left( \frac{3\gamma}{2} \right)} = \frac{AD}{2 \sin \left( \frac{3\gamma}{2} \right)} \quad \dots\dots\dots (2.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสมการที่ 2.36 เท่ากับ 2.37 จะได้

$$\frac{AB}{2\sin\frac{Y}{2}} = \frac{AD}{2\sin\left(\frac{3Y}{2}\right)} \quad \text{..... (2.53)}$$

$$AD = AB \times \left( \frac{\sin\left(\frac{3Y}{2}\right)}{\sin\left(\frac{Y}{2}\right)} \right) \quad \text{..... (2.54)}$$

จากสมการข้างต้น สามารถคำนวณหาค่า Distribution Factor ( $K_d$ )

$$K_d = \frac{\text{Phasor sum of each phase}}{\text{Arithmetic sum of each phase}} \quad \text{..... (2.55)}$$

$$K_d = \frac{AD}{3 \times AB} = \frac{\sin\left(\frac{3Y}{2}\right)}{3 \sin\left(\frac{Y}{2}\right)} \quad \text{..... (2.56)}$$

ดังนั้นค่า Distribution Factor ( $K_d$ ) ของการกระจายในร่องสลิต

เมื่อเป็นของ Fundamental จะได้ค่า Distribution Factor of Fundamental ( $K_{d,1}$ )

$$K_{d,1} = \frac{\sin\left(\frac{\sigma}{2}\right)}{\left(\frac{\sigma}{2}\right)\sin\left(\frac{Y}{2}\right)} \quad \text{..... (2.57)}$$

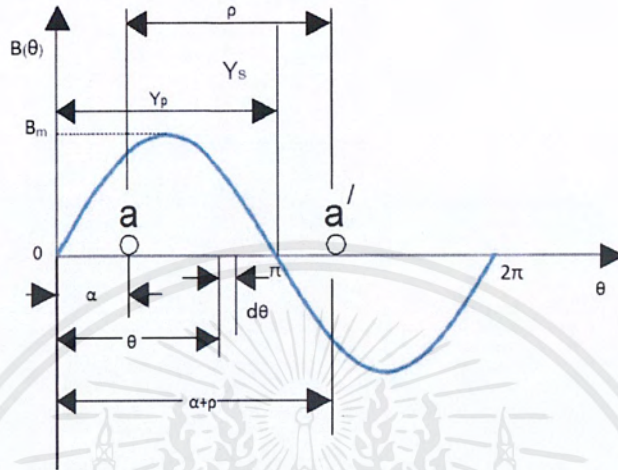
สำหรับ Harmonic order h; จะได้ค่า Distribution Factor of Harmonic Order h ( $K_{d,h}$ )

$$K_{d,h} = \frac{\sin\left(\frac{h\sigma}{2}\right)}{\left(\frac{\sigma}{2}\right)\sin\left(\frac{hY}{2}\right)} \quad \text{..... (2.58)}$$

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

2.12 การคำนวณค่า Pitch Factor[1]

การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่มี 3 เฟส ที่มีความกว้างของขดลวดน้อยกว่า 180 องศาไฟฟ้า ดังแสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ความกว้างของขดลวดน้อยกว่าความกว้างของขั้วแม่เหล็ก[1]

มุมของความกว้างของขดลวด ( $\rho$ ) สามารถคำนวณได้จาก

$$\rho = \frac{Y_s}{Y_p} \pi \dots\dots\dots (2.59)$$

เมื่อ  $Y_s$  คือความกว้างของขดลวด (Coil pitch)

$Y_p$  คือความกว้างของขั้วแม่เหล็ก (Pole pitch)

โดยทั้งที่  $Y_s$  และ  $Y_p$  เป็นจำนวนร่องสลิตที่พันขดลวดอาร์มาเจอร์ ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องขดลวดจาก

$$dY = NB_m \sin \theta \left( \frac{l r d\theta}{\frac{P}{2}} \right) \dots\dots\dots (2.60)$$

เมื่อ  $B_m$  คือเป็นค่าสูงสุดของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็ก

$l$  คือเป็นความยาวตามแนวแกนของขั้วแม่เหล็ก

$r$  คือเป็นรัศมีจากจุดศูนย์กลางของเครื่องจักรถึงช่องอากาศ

$N$  คือเป็นจำนวนรอบของขดลวด

Total flux linkage ( $\lambda$ )

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

$$\lambda = NB_m lr \frac{2}{p} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \rho)] \quad \dots\dots (2.61)$$

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

$$\lambda = NB_m lr \frac{2}{p} [\cos \omega t - \cos(\omega t + \rho)] \quad \dots\dots (2.62)$$

จาก

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

ดังนั้น

$$\lambda = NB_m lr \frac{4}{p} \cos\left(\frac{\pi - \rho}{2}\right) \cos\left(\omega t - \frac{\pi - \rho}{2}\right) \quad \dots\dots (2.63)$$

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \quad \dots\dots (2.64)$$

$$= -\omega NB_m lr \frac{4}{p} \cos\left(\frac{\pi - \rho}{2}\right) \sin\left(\omega t - \frac{\pi - \rho}{2}\right) \quad \dots\dots (2.65)$$

เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว

$$\phi_p = \int_0^{\pi} (B_m \sin \theta) l r \frac{2}{p} d\theta = B_m lr \frac{4}{p} \quad \dots\dots (2.66)$$

สามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้เป็น

$$e = -\omega N \phi_p \cos\left(\frac{\pi - \rho}{2}\right) \sin\left(\omega t - \frac{\pi - \rho}{2}\right) \quad \dots\dots (2.67)$$

หาค่า  $r_{ms}$  ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้จาก

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

$$= 4.44 f N \phi K_p \quad \dots\dots\dots (2.68)$$

เมื่อ  $K_p$ : เป็นค่า Pitch Factor

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

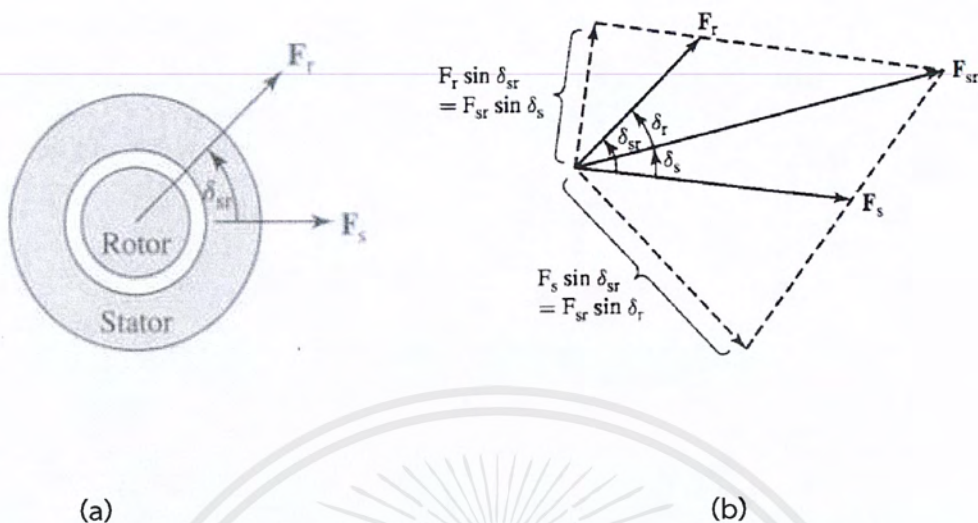
$$K_{p,1} = \cos\left(\frac{\pi - \rho}{2}\right) = \sin\frac{\rho}{2}$$

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

$$K_{p,h} = \sin\frac{h\rho}{2} \quad \dots\dots\dots (2.69)$$

ในการออกแบบการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ในส่วนของการเลือกความกว้างของขดลวดต้องดูความเหมาะสมของทั้งสองค่า 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 เพื่อสัญญาณขาออกของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะออกมาเป็นคลื่นไซน์

## 2.13 แรงบิด(Torque)และพลังงานที่ส่งผ่าน(Co-energy) [3]



รูปที่ 2.25 เครื่องจักรกลไฟฟ้าสองขั้วอย่างง่าย

(a) องค์ประกอบของแบบจำลอง (b) เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก[3]

แรงบิดเกิดจากผลของสนามแม่เหล็กจากสเตเตอร์และโรเตอร์ หมายเหตุ ภาพนี้ถูก

วาดโดยให้  $\delta_{sr}$  เป็นค่าบวกเมื่อ  $F_r$  คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์ $F_s$  คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์ $F_{sr}$  คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ส่งผ่านจากสเตเตอร์ไปที่โรเตอร์ $\delta_s$  คือ มุมระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์กับแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ส่งผ่านจากสเตเตอร์ไปที่โรเตอร์ $\delta_r$  คือ มุมระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์กับแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ส่งผ่านจากสเตเตอร์ไปที่โรเตอร์ $\delta_{sr}$  คือ มุมระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์และแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์

โดยที่ค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กและสัมพันธ์กับขนาดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์รวมทั้งยังขึ้นอยู่กับมุม  $\delta_{sr}$  ที่สามารถวัดได้จากมุมระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์และแรงเคลื่อนแม่เหล็กของโรเตอร์

ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยทั่วไปฟลักซ์แม่เหล็กส่วนใหญ่จะถูกสร้างขึ้นโดย ขดลวดที่สเตเตอร์และขดลวดที่โรเตอร์โดยข้ามผ่านช่องอากาศและที่ไหลอยู่ในตัวมันเองมันถูกเรียกว่า ฟลักซ์เกี่ยวค้ำ ซึ่งคล้ายคลึงกับฟลักซ์เกี่ยวค้ำหรือฟลักซ์กระตุ้นในหม้อแปลง อย่างไรก็ตามฟลักซ์บางส่วนที่ถูกสร้างขึ้นโดยขดลวดที่สเตเตอร์และขดลวดที่โรเตอร์ไม่ได้ผ่านช่องอากาศซึ่งเหมือนกับฟลักซ์รั่วไหลในหม้อแปลงซึ่งถูกเรียกว่าฟลักซ์รั่วไหลที่โรเตอร์และฟลักซ์รั่วไหลที่สเตเตอร์

เมื่อหาค่าแรงบิด จำเป็นที่จะต้องทราบกระแสที่ไหลในขดลวดหรือทราบแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์โดยไม่คำนึงถึงผลของความเหนี่ยวนำรั่วไหลโดยจะได้รับผลของพลังงานที่สะสมที่อยู่ในช่องอากาศ (Co-energy) โดยที่เกิดจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กของโรเตอร์และแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์และมุม  $\delta_{sr}$  ระหว่างแกนแม่เหล็ก ซึ่งสมการแรงบิดสามารถหาได้จากการหาอนุพันธ์ของสมการพลังงานที่สะสมในช่องอากาศ

สำหรับการวิเคราะห์อย่างง่ายจะให้ความยาวของรัศมีของช่องอากาศ ( $g$ ) เล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างรัศมีของโรเตอร์และสเตเตอร์ สำหรับเครื่องจักรกลที่มีช่องอากาศราบเรียบสร้างจากแกนเหล็กที่มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูงโดยค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กมีผลต่อค่าฟลักซ์ในช่องอากาศซึ่งมีความแตกต่างเล็กน้อยระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่หน้าผิวของสเตเตอร์และหน้าผิวของโรเตอร์หรือที่รัศมีของช่องอากาศซึ่งสนามแม่เหล็กในช่องอากาศสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของค่าความซึมสนามแม่เหล็ก ( $H_{ag}$ ) และค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ( $B_{ag}$ ) โดยค่าสนามนี้จะเปลี่ยนแปลงตามมุมตามเส้นรอบวง โดยที่การหาปริพันธ์ของความซึมสนามแม่เหล็กผ่านช่องอากาศจะเท่ากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ที่อยู่ในช่องอากาศซึ่งถูกสร้างโดยขดลวดที่สเตเตอร์และขดลวดที่โรเตอร์

$$H_{ag} = \mathcal{F}_{sr} \quad \dots\dots\dots (2.70)$$

โดยที่  $\mathcal{F}$  แทนด้วยแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ขึ้นอยู่กับมุมรอบเส้นรอบวง

แรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์ เป็นรูคสี่เหลี่ยมโดยที่  $\delta_{sr}$  เป็นมุมระหว่างแกนแม่เหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์โดยเป็นมุมทางไฟฟ้าโดยสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของ  $F_s$  และ  $F_r$  แสดงได้ดังรูป 2.25 โดยแรงลัพธ์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก  $F_{sr}$  ที่ข้ามช่องอากาศก็เป็นรูคสี่เหลี่ยมเช่นกันจากสมการทางตรีโกณมิติแสดงได้ดังนี้

$$F_{sr}^2 = F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos \delta_{sr} \quad \text{..... (2.71)}$$

ซึ่ง  $F$  เป็นค่าแรงเคลื่อนสูงสุด และค่า  $H_{ag}$  ก็เป็นรูปคลื่นไซน์เช่นกันซึ่งมีค่าความเข้มสนามสูงสุดเท่ากับ  $H_{ag,peak}$

$$H_{ag,peak} = \frac{F_{sr}}{g} \quad \text{..... (2.72)}$$

เมื่อพิจารณาพลังงานสนามแม่เหล็กที่สะสมอยู่ในช่องอากาศ จากสมการต่อไปนี้

$$W'_{fld} = \int_v \frac{\mu H^2}{2} dv \quad \text{..... (2.73)}$$

ความหนาแน่นของพลังงานสะสมในช่องอากาศที่จุดที่มีความเข้มสนามแม่เหล็ก  $H$  เท่ากับ

$$W'_{fld} = \frac{\mu_0 H^2}{2} \quad \text{ในหน่วย SI} \quad \text{..... (2.74)}$$

ดังนั้น ความหนาแน่นพลังงานสะสมเฉลี่ยที่อยู่ในช่องอากาศคือ  $\frac{\mu}{2}$  เท่าของค่าเฉลี่ย  $H_{ag}^2$

$$\text{ความหนาแน่นพลังงานสะสมเฉลี่ย} = \frac{\mu_0 (H_{ag,peak}^2)}{2} = \frac{\mu_0}{4} \left(\frac{F_{sr}}{g}\right)^2 \quad \text{..... (2.75)}$$

พลังงานที่สะสมในช่องอากาศที่เกิดขึ้นหาได้จาก

$$\begin{aligned} W'_{fld} &= (\text{average co-energy density}) (\text{volume of air gap}) \\ &= \frac{\mu_0}{4} \left(\frac{F_{sr}}{g}\right)^2 (\pi D l g) \\ &= \left(\frac{\mu_0 \pi D l}{4}\right) F_{sr}^2 \quad \text{..... (2.76)} \end{aligned}$$

เมื่อ  $l$  คือค่าความยาวตามแนวแกนช่องอากาศ

$D$  คือค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย

สามารถหาพลังงานสะสมในช่องอากาศได้ ซึ่งอยู่ในเทอมของค่าสูงสุดของค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่มาจากสเตเตอร์และโรเตอร์และค่าของมุมระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสอง

$$W'_{fld} = \left( \frac{\mu_0 \pi D l}{4} \right) (F_s^2 + F_r^2 + 2 F_s F_r \cos \delta_{sr})^2 \quad \dots\dots\dots (2.77)$$

(การรักษาค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กให้คงที่ ทำได้โดยการรักษากระแสให้คงที่)

สามารถเขียนสมการแรงบิดได้ในเทอมความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาของสนามแม่เหล็ก โดยทำอนุพันธ์แยกส่วนของพลังงานที่ส่งผ่าน เทียบกับมุมระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์และแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์

$$T = \frac{\partial W'_{fld}}{\partial \delta_{sr}} = - \left( \frac{P}{2} \right) \left( \frac{\mu_0 \pi D l}{2g} \right) F_s F_r \sin \delta_{sr} \quad \dots\dots\dots (2.78)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

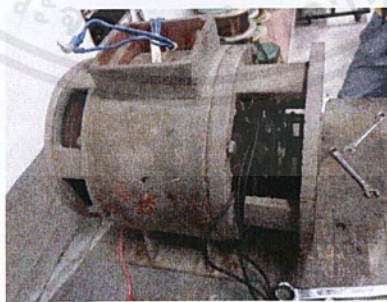
#### การออกแบบและผลการทดลองเบื้องต้น

##### บทนำ

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่สำคัญของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำสามเฟส ในบทนี้จะนำทฤษฎีพื้นฐานเหล่านั้น มาพิสูจน์และยืนยันผลลัพธ์ที่ได้กับทฤษฎี เช่น การทดสอบหาจำนวนขั้วแม่เหล็ก , การทดสอบหาค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำโดยใช้ขดลวดทดสอบ , การวิเคราะห์ผลของการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน, การทดสอบปริมาณแรงเคลื่อนที่ตกคร่อมที่ช่องอากาศ , การทดสอบแรงบิดที่เกิดขึ้นที่ช่องอากาศ (Electromagnetic Torque) และพลังงานร่วมในช่องอากาศ (Co-energy air gap) และการทดสอบอื่นๆที่สำคัญอีกมากมาย ซึ่งในการคำนวณหาค่าต่างๆ ควรจะทราบค่าองค์ประกอบพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับนั้นๆ ดังนี้

เครื่องจักรกลที่ใช้เป็นชนิดเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำแบบสามเฟส โดย Rotor เป็นแบบ wound rotor (three-phase induction machine wound rotor )

จำนวนขั้วแม่เหล็ก	4 pole	l (length)= 8.05cm
ความถี่	50 Hz	inner diameter stator= 15.15 cm
แรงดัน	220 V	diameter rotor = 14.97 cm
กระแส	3 A	radius of gap= 7.495 cm
ความเร็ว	1450 rpm	ขนาดกำลัง 2 kW

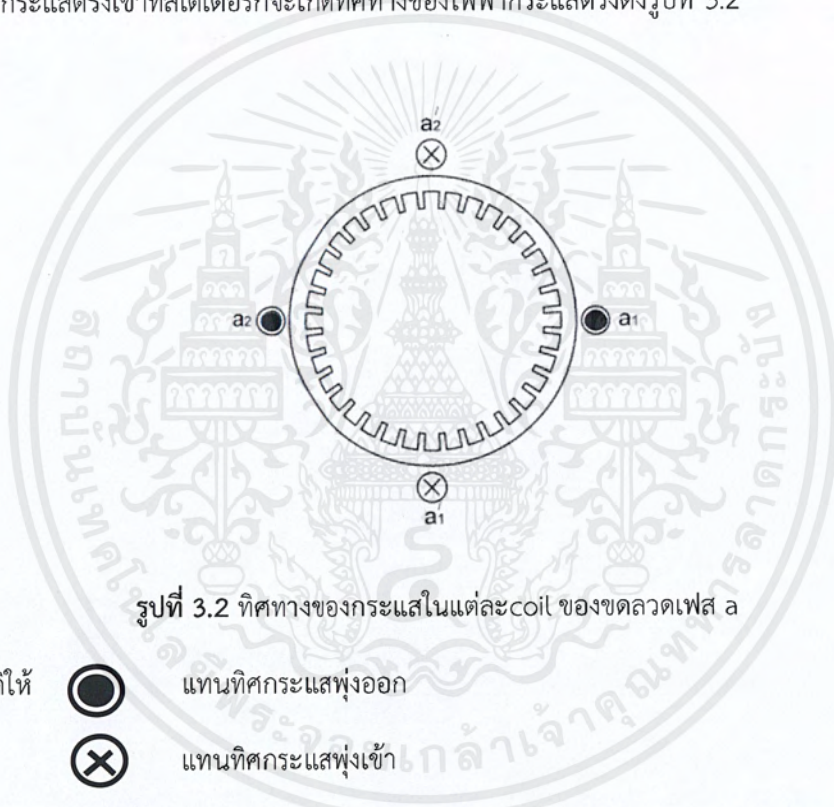


รูปที่ 3.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

### 3.1 การหาจำนวนขั้วแม่เหล็ก

เนื่องจากเครื่องจักรกลที่ใช้ในโครงการนี้ ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นต่างๆ ดังนั้นก่อนที่จะศึกษาไปถึงสนามแม่เหล็กหมุน จึงต้องหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเสียก่อน เช่น จำนวนขั้ว เป็นต้น

การหาจำนวนขั้วแม่เหล็กสามารถทำได้โดยนำความรู้ในทฤษฎีเกี่ยวกับขั้วแม่เหล็กมาใช้ในการทดสอบ ใช้ความสัมพันธ์ของทิศทางกระแสไหลกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก ซึ่งเปรียบเทียบกับกฎมือขวา โดยจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่เฟส a เข้าที่สเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่สเตเตอร์ก็จะเกิดทิศทางของไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 3.2

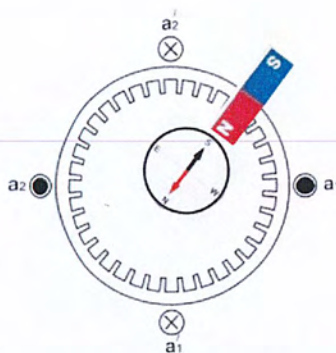


รูปที่ 3.2 ทิศทางของกระแสในแต่ละcoil ของขดลวดเฟส a

โดยสมมติให้

- แทนทิศกระแสพุ่งออก
- ⊗ แทนทิศกระแสพุ่งเข้า

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของกระแสและทิศทางของสนามแม่เหล็ก โดยเปรียบเทียบกับกฎมือขวาพบว่าจุดที่ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กสูงสุดคือบริเวณตรงกลางระหว่าง coil ของแต่ละ coil ของ phase a หรือสามารถนำเข็มทิศมาช่วยในการทดสอบได้ แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การใช้เข็มทิศแสดงบริเวณจุดที่มีสนามแม่เหล็กมากที่สุด

โดยถ้าเข็มทิศอยู่บริเวณกึ่งกลางดังรูปที่ 3.3 พบว่าทิศทางของเข็มทิศจะแสดงทิศใต้ เพราะบริเวณนั้นเป็นบริเวณของขั้วเหนือ หลังจากนั้นทำการวางเข็มทิศไปรอบๆ บริเวณขอบของสเตเตอร์ จะพบว่าเข็มทิศมีการเปลี่ยนทิศระหว่างทิศเหนือ (N) ไปทิศใต้ (S) จำนวนครั้งในการวนเข็มทิศไป 1 รอบของสเตเตอร์จะทำให้ทราบจำนวนขั้วแม่เหล็กได้ ดังผลการทดลองที่ 4.1



รูปที่ 3.4 ภาพจริงในการทดลองการใช้เข็มทิศเพื่อหาขั้วแม่เหล็ก

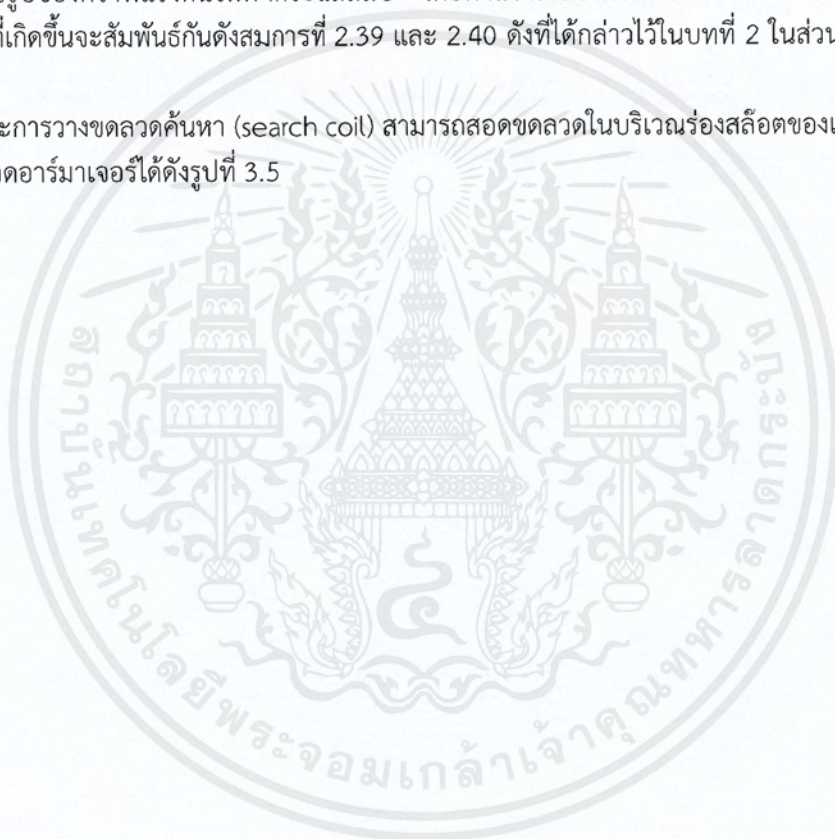
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

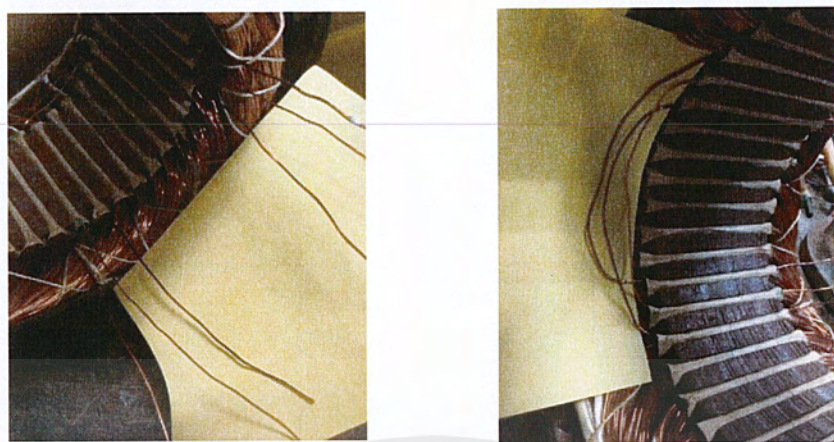
### 3.2 การหาตำแหน่งของขดลวดอาร์มาเจอร์

การหาตำแหน่งของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ของแต่ละเฟสเป็นส่วนสำคัญที่จะต้องนำไปใช้ในการวิเคราะห์ ในเรื่องต่างๆ ซึ่งถือว่าเป็นโครงสร้างหลักของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

การที่จะศึกษาค้นหาตำแหน่งการวางขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ ศึกษาได้โดยการประยุกต์ใช้ความรู้และทฤษฎีเกี่ยวกับปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่เกิดขึ้นจากการจ่ายแรงดันเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ โดยจะใช้ขดลวดค้นหา(search coil) เป็นตัวแทนของขดลวดที่ฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่านหรือเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถวัดโดย oscilloscope ที่จะแสดงออกมาในรูปของกราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กันดังสมการที่ 2.39 และ 2.40 ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

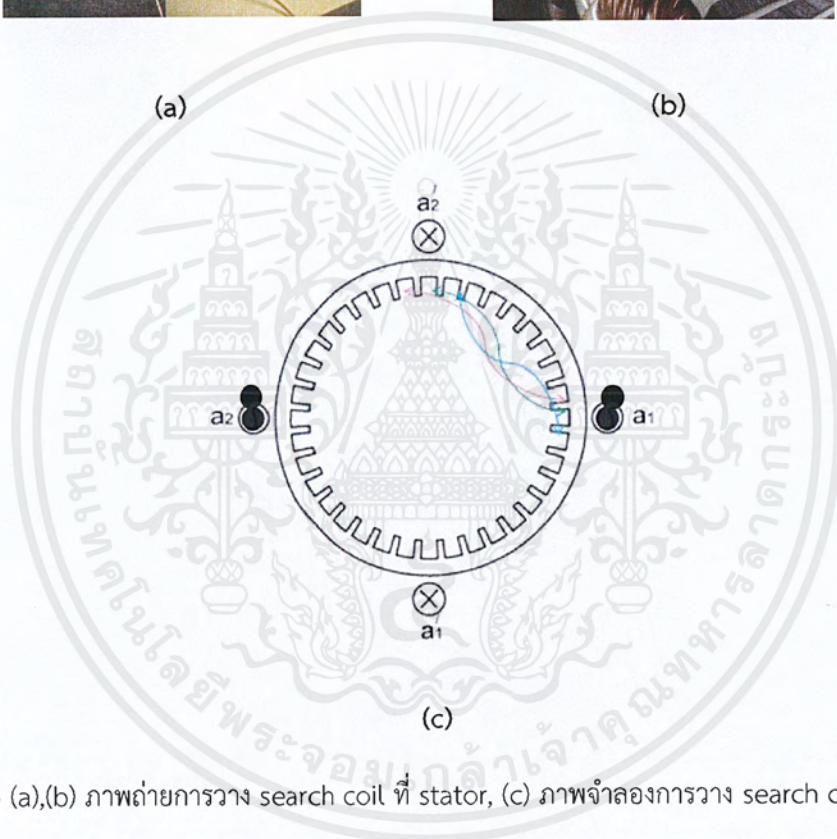
ซึ่งลักษณะการวางขดลวดค้นหา (search coil) สามารถสอดขดลวดในบริเวณร่องสลิตของแกนเหล็กของขดลวดอาร์มาเจอร์ได้ดังรูปที่ 3.5





(a)

(b)



(c)

รูปที่ 3.5 (a),(b) ภาพถ่ายการวาง search coil ที่ stator, (c) ภาพจำลองการวาง search coil ที่ stator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใส่ขดลวดค้นหาลงในร่องสลิตของแกนเหล็ก ที่สเตเตอร์นี้เป็นการพันแบบ Concentric เพื่อที่จะสะดวกในการการคำนวณค่าแรงดันเหนี่ยวนำ ซึ่งจะมีความกว้างของขดลวดเป็น 180 องศาทางไฟฟ้า เพื่อให้ได้องศาทางไฟฟ้าเท่ากับหนึ่งขั้วแม่เหล็กของแต่ละเฟสตรงกับลักษณะการพันของขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าตัวนี้

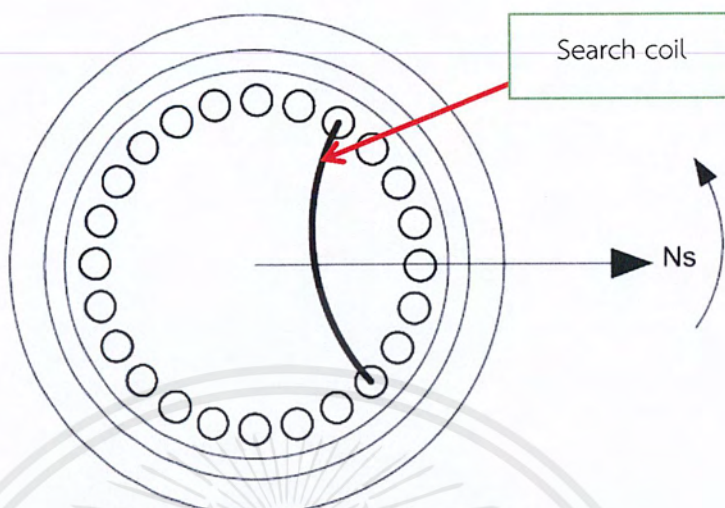
การทดสอบเรื่องตำแหน่งของขดลวดอาร์มาเจอร์นี้สามารถตั้งสมมุติฐานได้คือตำแหน่งของขดที่อยู่ตรงขั้วแม่เหล็กที่สุดจะเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ไม่มีการเลื่อนเฟสและขดที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีขนาดสูงสุดซึ่งจะถือว่าเป็นจุดกึ่งกลางของขดลวด โดยในการทดลองจะใช้ voltage probe จำนวน 3 เส้นและ current probe จำนวน 1 เส้น ให้ CH1 เป็น current probe เพื่อตรวจสอบกระแสไฟฟ้าที่ไหลในแต่ละเฟสไม่ให้เกิดค่าพิกัดเพื่อความปลอดภัย ส่วน CH2,3,4 จะวัดที่ขดลวดค้นหาแต่ละขดเพื่อเปรียบเทียบแอมพลิจูดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำแต่ละขด

โดยการทดลองนี้จะสามารถทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ (Winding factor) ดังสมการที่ 2.48 , 2.58 และ 2.69 ดังบทที่ 2 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ (Winding factor) เป็นค่าที่สำคัญมากเพราะเมื่อพูดถึงการคำนวณค่าต่างๆตามทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าสามเฟส ดังนั้นการที่รู้ถึงวิธีการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ก่อนจึงเป็นสิ่งที่สำคัญเพื่อที่จะต่อยอดไปถึงการทดสอบอื่นๆ

### 3.3 การศึกษาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน

การทดสอบแรกจะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าที่สเตเตอร์ผ่านขดลวดอาร์มาเจอร์ที่อยู่บนสเตเตอร์ โดยกระแสสลับสามเฟสจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนเกิดขึ้นที่ช่องอากาศ หลังจากนั้นทำการใส่ขดลวดค้นหาเข้าที่โรเตอร์เพื่อวัดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 3.6 และทำการหมุนโรเตอร์ไป 0-360 องศาทางกลหรือ 0-720 องศาทางไฟฟ้าเนื่องจากมีขั้วแม่เหล็กทั้งหมด 4 ขั้วพร้อมทั้งจ่ายแรงดัน 40 V และ 80 V และพันขดลวดค้นหาจำนวน 2 และ 3 รอบเพื่อวิเคราะห์แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะสามารถบอกขนาดของสนามแม่เหล็กได้จากสมการที่ 3.8 จะเห็นว่ามีพจน์ของฟลักซ์ต่อขั้ว ( $\phi_p$ ) เมื่อ ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งขณะที่หมุนโรเตอร์จะทราบค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่อ่านได้จาก oscilloscope ที่วัดขนาดของแรงดันที่อ่านได้จากขดลวดค้นหา

$$e = -\omega N \phi_p \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (3.8)$$



รูปที่ 3.6 การใส่ search coil ที่สเตเตอร์

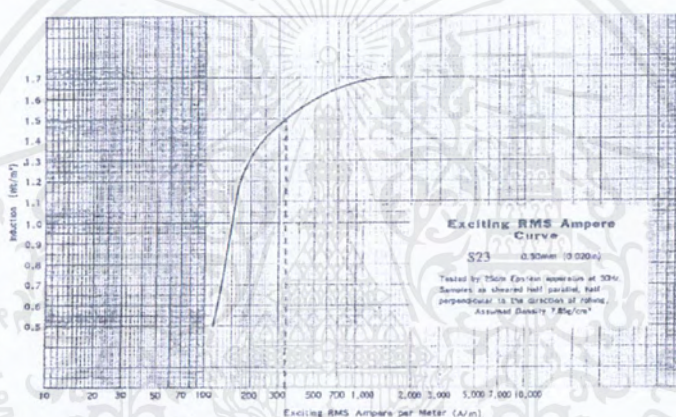
#### กรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส

การทดสอบที่สองจะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวเข้าที่สเตเตอร์ โดยกระแสไฟฟ้าเฟสเดียวจะสร้างฟลักซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำการใส่ขดลวดค้นหาเข้าที่โรเตอร์ดังรูปที่ 3.6 และทำการหมุนโรเตอร์ไป 0-360 องศาทางกลหรือ 0-720 องศาทางไฟฟ้าเนื่องจากมีขั้วแม่เหล็กทั้งหมด 4 ขั้วพร้อมทั้งจ่ายแรงดัน 40 V และ 80 V และพันขดลวดค้นหาจำนวน 2 และ 3 รอบเพื่อวิเคราะห์แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะสามารถบอกขนาดของสนามแม่เหล็กได้จากสมการที่ 3.8 จะเห็นว่ามีพจน์ของฟลักซ์ต่อขั้ว( $\phi_p$ ) เมื่อ ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งขณะที่หมุนโรเตอร์ และจะทราบค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจากขดลวดค้นหาที่อ่านได้จาก oscilloscope

### 3.4 การศึกษาย่านการอิ่มตัวของแกนเหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

การทดสอบนี้มีความสำคัญต่อการทดสอบอื่นๆซึ่งจะสามารถทราบค่าแรงดันที่มากที่สุดที่จะไม่ทำให้แกนเหล็กที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของเครื่องจักรกลไฟฟ้าอิ่มตัวได้ โดยจะอ้างอิงจากความสัมพันธ์ระหว่าง Magnetic flux density ( $B$ ) กับ Magnetic field intensity ( $H$ )หรือความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า( $V$ ) และกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) จะขึ้นกับส่วนผสมของสารที่นำมาใช้เป็นวงจรมแม่เหล็กและรวมถึงความสัมพันธ์ระหว่าง  $B$  กับ  $H$  ของสารกลุ่มเดียวกันยังไม่เป็นเชิงเส้นตลอดช่วงย่านการใช้งาน

เมื่อกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับจะได้ความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุด ( $B_m$ ) กับค่า rms exciting current per meter ( $H_{rms}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับจะขึ้นอยู่กับความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่มากระตุ้น



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุด ( $B_m$ ) กับค่า rms exciting current per meter ( $H_{rms}$ )[1]

แต่ในการทดสอบนี้จะใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย ( $V$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) เป็นตัวแทนของ B-H curve เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าแหล่งจ่าย( $I$ ) แปรผันโดยตรงกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก( $H$ ) ดังสมการที่ 3.9

$$Ni = HI \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

โดย  $H$  = ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity)

$l$  = Average length

$Ni$  = Magneto-motive force (mmf)

จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.9 ส่งผลให้สามารถแทนค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ( $H$ ) ด้วยกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายได้

และจากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.34 จะเห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) จะมีความสัมพันธ์กับค่าฟลักซ์ต่อขั้ว โดยที่ค่าฟลักซ์ต่อขั้วก็มีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด ( $B_m$ ) ดังสมการที่ 2.38

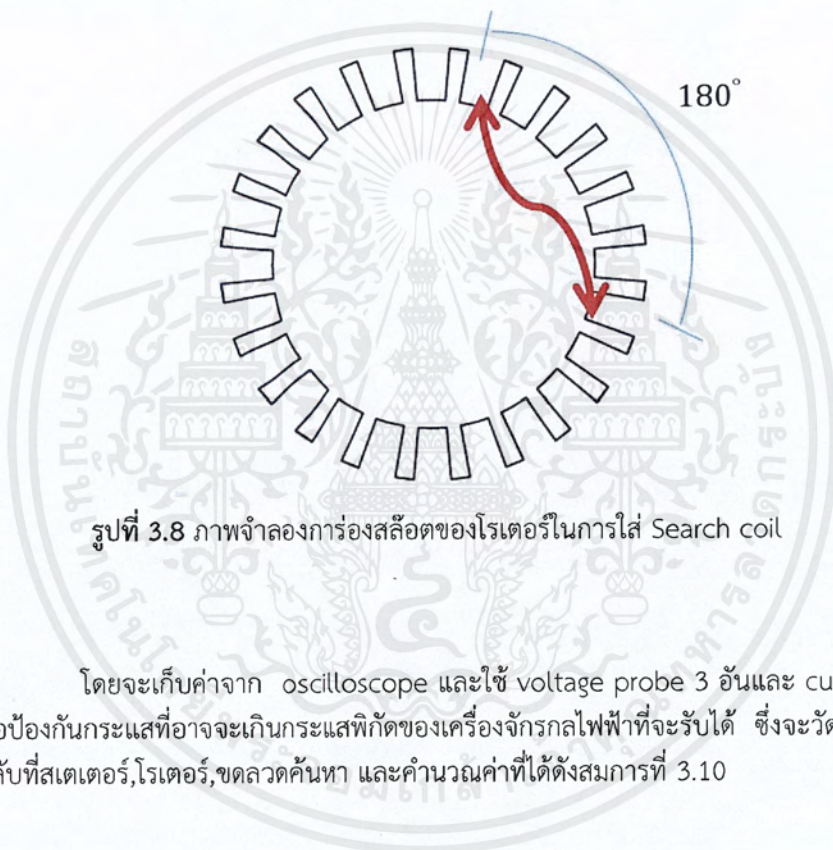
เพราะฉะนั้นสามารถแทน B-H curve ด้วย V-I curve ซึ่งทำการทดสอบได้โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์และใช้ voltage probe , current probe อ่านค่าจาก oscilloscope โดยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าทีละขั้นๆ ละ 10 V เพื่อวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ที่เกิดขึ้น และพล็อตกราฟ V-I curve เพื่อวิเคราะห์จุดอิ่มตัวของแกนเหล็กซึ่งเป็นตัวบ่งบอกแรงดันพิคก์ที่เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่กำลังทดสอบได้

### 3.5 การหาจำนวนรอบขดลวด

การทดสอบนี้มีความสำคัญมากเนื่องจากจำนวนรอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของส่วนประกอบที่ต้องทราบ โดยเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่เป็นตัวต้นแบบนั้นไม่มีแบบการพันของเครื่อง จึงมีความจำเป็นต้องหาวิธีวิเคราะห์และหาจำนวนรอบที่แท้จริงของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับตัวนี้ให้ได้ โดยทางผู้จัดทำเลือกใช้ขดลวดค้นหา ซึ่งเป็นวิธีการที่สะดวก เนื่องจากไม่ทราบทั้งจำนวนขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์และจำนวนขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์ จึงใช้ขดลวดค้นหาที่ทราบจำนวนรอบเป็นตัวกลางในการหาจำนวนรอบของขดลวดอาร์มาเจอร์ทั้งสองขด เนื่องจากจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเข้าที่ขดลวดฝั่งสเตเตอร์ ตามทฤษฎีของสนามแม่เหล็กหมุนจะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่มีขนาด 1.5 เท่ากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กของแต่ละเฟส เมื่อแรงเคลื่อนแม่เหล็กดังกล่าวเคลื่อนที่ผ่านช่องอากาศและผ่านขดลวดค้นหาดังกล่าวแล้ว จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ขดลวดค้นหาโดยค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วที่อยู่ในช่องอากาศมีค่าเท่ากันจึงสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3.10 แต่ต้องคูณด้วย 1.5 เนื่องจากค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กของฝั่งแหล่งจ่ายในสูตรเป็นค่าที่คิดจากกรณี 1 เฟสแต่ในความเป็นจริงค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กมีเป็น 1.5 เท่าของแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อเฟสดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

$$\frac{E_{af1}}{4.44fN_{ph1}K_{w1}} = \frac{1.5E_{af2}}{4.44fN_{ph2}K_{w2}} \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

โดยพันจำนวนรอบของขดลวดค้นหา 4 รอบ หรือ  $N_{ph,search\ coil} = 4$  ดังรูปที่ 3.8 โดยจะวางระยะขดลวด 180 องศาทางไฟฟ้าเพื่อให้อยู่ในลักษณะหนึ่งขั้วแม่เหล็ก โดยค่าสัมประสิทธิ์การพันของขดลวดค้นหาที่มีค่าเท่ากับ 1 และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การพันของขดลวดได้จากการทดสอบที่ 3.2 ที่ได้จากการศึกษาโครงสร้างการวางตัวของขดลวดและค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดค้นหาและจากแหล่งจ่ายจะคำนวณด้วยค่า rms



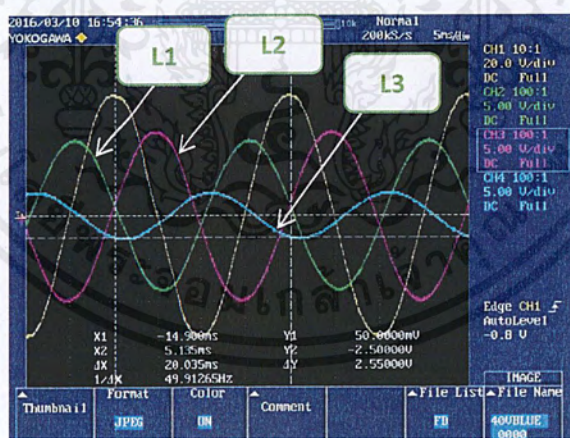
รูปที่ 3.8 ภาพจำลองการร้อยสล็อตของโรเตอร์ในการใส่ Search coil

โดยจะเก็บค่าจาก oscilloscope และใช้ voltage probe 3 อันและ current probe 1 อัน เพื่อป้องกันกระแสที่อาจจะเกินกระแสพิคคของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่จะรับได้ ซึ่งจะวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สเตเตอร์, โรเตอร์, ขดลวดค้นหา และคำนวณค่าที่ได้ดังสมการที่ 3.10

### 3.6 การตรวจสอบและการแก้ไขปัญหาการ short turn บนขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์

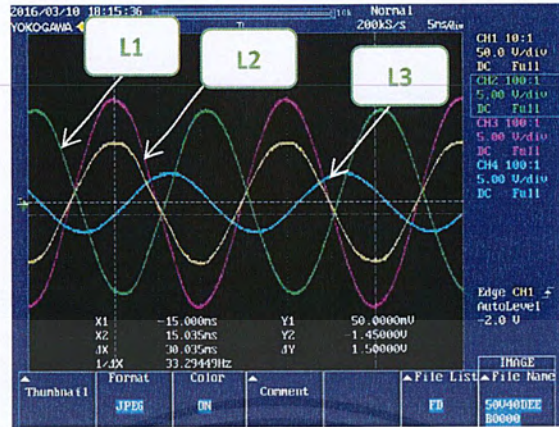
#### 3.6.1 การพบปัญหา

ในการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสต้นแบบนั้น พบปัญหาเกี่ยวกับขนาดของกระแสไฟฟ้าสามเฟสที่มีขนาดไม่สมดุลที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ ซึ่งเป็นสิ่งที่ผิดปกติสำหรับรูปแบบของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่จะสร้างสนามแม่เหล็กหมุนตามทฤษฎีสถนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสสลับสามเฟส เป็นผลทำให้ ขนาดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่อยู่ในช่องอากาศนั้นไม่เป็นไปตามรูปแบบของสนามแม่เหล็กหมุนที่ถูกต้องคือจะมีขนาดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กไม่เป็น 1.5 เท่าของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส เพราะจะมีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนโรเตอร์หนึ่งเฟสจากสามเฟสที่มีขนาดกระแสไฟฟ้าไม่เท่ากับอีกสองเฟสที่เหลือ ดังนั้นในการศึกษาทฤษฎีสถนามแม่เหล็กหมุนนั้นจำเป็นที่จะต้องดำเนินการตรวจสอบแก้ไขปัญหาก่ที่เกิดขึ้นกับขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์

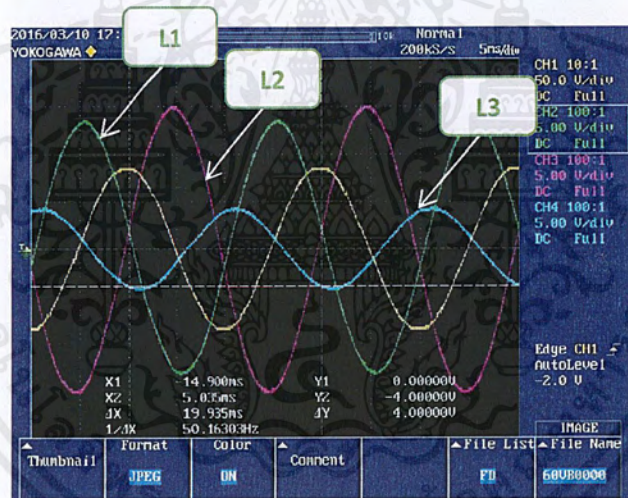


รูปที่ 3.9 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันสามเฟสสมดุลขนาด 40V L-N เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสของสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 กระแสเหนี่ยวนำสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันสามเฟสสมดุลงขนาด 50v L-N เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสของสเตเตอร์



รูปที่ 3.11 กระแสเหนี่ยวนำสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันสามเฟสสมดุลงขนาด 60v L-N เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสของสเตเตอร์

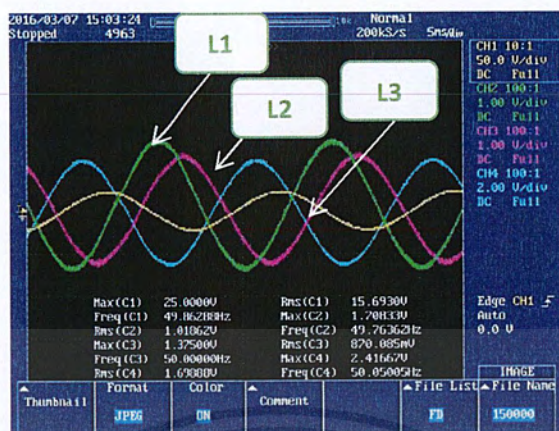
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การทดสอบจ่ายแรงดันสามเฟสเข้าสู่ขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสของโรเตอร์

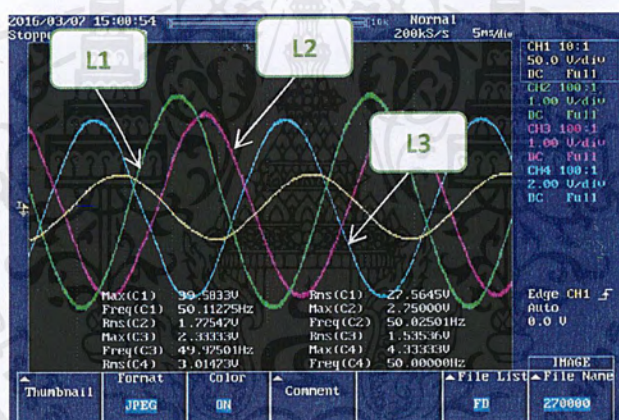
จากการพบปัญหาเรื่องกระแสบนขดลวดอาร์มาเจอร์บนโรเตอร์มีลักษณะเฟสไม่สมดุล จึงสันนิษฐานว่าการเกิดการเหนี่ยวนำของแรงเคลื่อนไฟฟ้าบนขดลวดอาร์มาเจอร์ทั้งสามเฟสของโรเตอร์นั้นไม่สมดุลทั้งสามเฟสจึงส่งผลให้กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นกับขดลวดทั้งสามเฟสนั้นจะมีขนาดไม่เท่ากัน ดังนั้นการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสจากแหล่งจ่ายเข้าสู่ขดลวดอาร์มาเจอร์บนโรเตอร์จะสามารถบอกความเท่าหรือความไม่เท่ากันของอิมพีแดนซ์ทั้งสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ได้โดยจะสังเกตได้จากกระแสไฟฟ้าสามเฟสจากแหล่งจ่ายโดยทำการทดลองในลักษณะดังรูปที่ 3.12 และใช้ oscilloscope ตรวจวัดกระแสที่เกิดขึ้นบนขดลวดอาร์มาเจอร์ทั้งสามเฟสของโรเตอร์ ดังรูปที่ 3.13 และ 3.14 พบว่าเส้น L1,L2 และ L3 มีแอมพลิจูดไม่เท่ากับและระยะห่างเฟสไม่เป็น 120 องศาทางไฟฟ้าตามลักษณะเฟสสมดุล



รูปที่ 3.12 การจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าสู่ขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสที่โรเตอร์โดยเพื่อทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสที่โรเตอร์



รูปที่ 3.13 กระแสไฟฟ้าสลับสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมมูลขนาด 15.69 V(L-N) เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสโรเตอร์โดยตรง

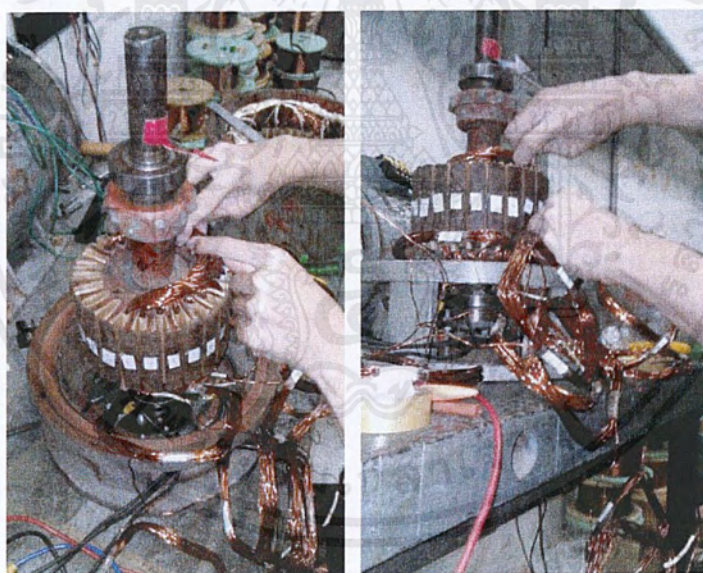


รูปที่ 3.14 กระแสสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันสามเฟสสมมูลขนาด 27.564 V(L-N) เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสที่โรเตอร์โดยตรง

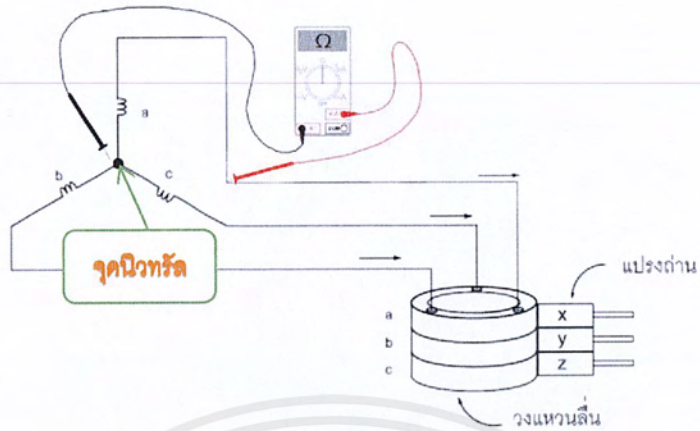
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.2 การตรวจสอบการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์และตรวจสอบความต้านทานของขดลวดแต่ละเฟส

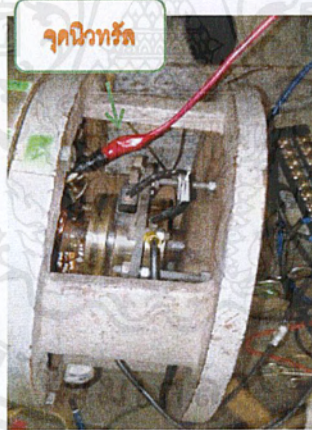
จากการทดลองที่ผ่านมายังมีข้อสันนิษฐานที่ยังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดเนื่องจากการที่กระแสไฟฟ้าสามเฟสที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์ไม่สมดุลนั้น อาจจะมีผลมาจากการที่เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ไม่เป็นแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมดุลที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ ซึ่งอาจจะมีผลมาจากการพันจำนวนรอบที่ไม่เท่ากันในบางเฟส หรืออาจจะเป็นผลมาจากการที่ขดลวดเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวด ทำให้จำนวนขดลวดในเฟสนั้นน้อยลงจึงมีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบการพันของขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์อย่างละเอียด โดยการแกะขดลวดออกมาจากตัวแกนเหล็กและตรวจสอบจำนวนรอบในแต่ละขดลวดของทุกเฟสดังรูปที่ 3.15 และทำการวัดค่าความต้านทานของแต่ละอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับปลายสาย เช่น แปรงถ่าน, วงแหวนลื่น, ขดลวดอาร์มาเจอร์ ดังรูปที่ 3.16 และ 3.17 โดยเมื่อทำการแยกชิ้นส่วนแล้วจะพบจุดเชื่อมต่อนิวทรัลของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่ต่ออยู่ในลักษณะ Y-connected



รูปที่ 3.15 การถอดขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์เพื่อนับจำนวนรอบ



รูปที่ 3.16 การวัดความต้านทานขดลวดสามเฟส

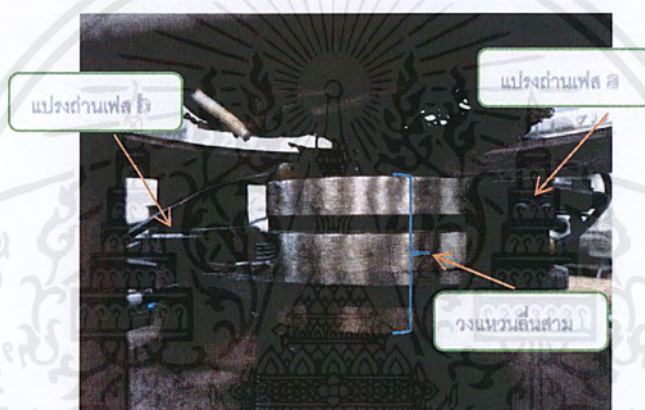


รูปที่ 3.17 การวัดค่าความต้านทานของขดลวดในแต่ละเฟส โดยวัดระหว่างจุดเชื่อมต่อที่ขั้วของแต่ละเฟสและจุดนิวทรัลของขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

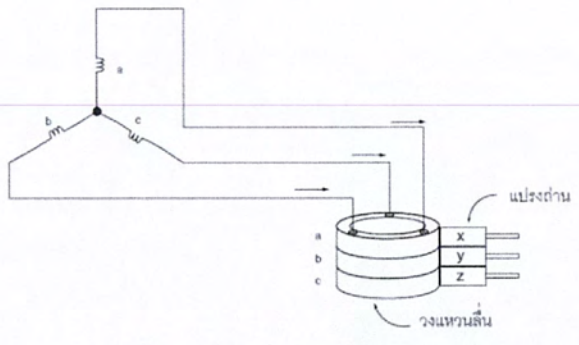
### 3.6.3 การตรวจสอบความต้านทานของจุดต่อในแต่ละชั้นส่วน

จากการตรวจสอบชั้นที่ผ่านมาไม่พบความผิดปกติของความต้านทานในขดลวดแต่อย่างใด จึงได้ทำการใส่ขดลวดกลับเข้าไปในแกนเหล็กเหมือนเดิมทุกประการและได้ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมดุลเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์อีกครั้งผลคือกระแสไฟฟ้ามีลักษณะสมดุล และบริเวณวงผิวของวงแหวนลื่นมีคราบที่เกิดจากการขัดถูกันของแปรงถ่านกับวงแหวนลื่นจึงได้ทำการขัดคราบแปรงถ่านออกแสดงได้ดังรูปที่ 3.18 จึงมีข้อสันนิษฐานว่าแปรงถ่านอาจจะมีผลต่อค่าความต้านทานที่ผิดปกติจึงได้ทำการสลับแปรงถ่านในแต่ละเฟสเพื่อดูผลของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมดุล

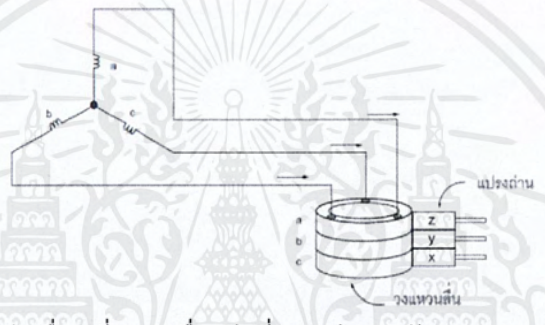


รูปที่ 3.18 วงแหวนลื่นหลังทำการขัดถ่านที่ติดอยู่ออกแล้ว

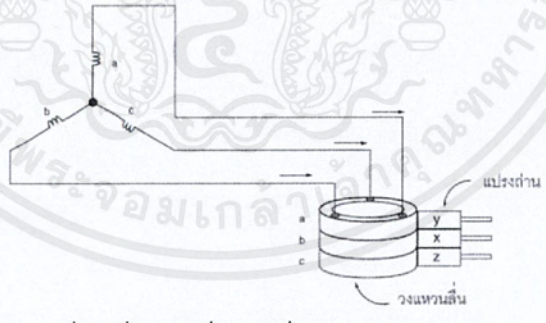
การทดสอบสลับแปรงถ่านในแต่ละเฟสเพื่อวัดความต้านทานของแต่ละจุดเชื่อมต่อทั้งสามเฟส เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าในขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ในแต่ละเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 3.19 และทดลองการสลับแปรงถ่านที่สัมผัสกับวงแหวนลื่นเพื่อดูว่าอิมพีแดนซ์รวมที่วัดจากจุดเชื่อมต่อจะมีผลกับค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสหรือไม่ เพราะการสลับจุดเชื่อมต่อระหว่างแปรงถ่านกับวงแหวนลื่นจะเป็นการสลับค่าความต้านทานของจุดเชื่อมต่อนั้นๆ ดังรูปที่ 3.19 – 3.22



รูปที่ 3.19 จุดเชื่อมต่อตั้งต้น a-x, b-y, c-z

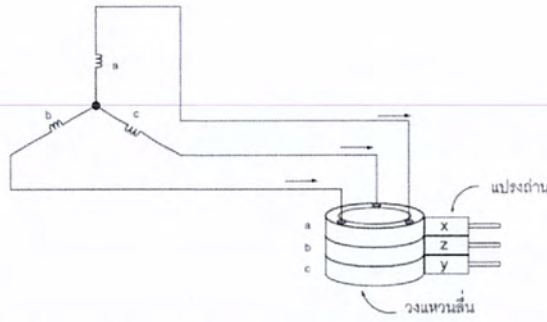


รูปที่ 3.20 จุดเชื่อมต่อเมื่อเปลี่ยนจุดเชื่อมต่อที่แปลงถ่าน(z กับ x) a-z, b-y, c-x



รูปที่ 3.21 จุดเชื่อมต่อเมื่อเปลี่ยนจุดเชื่อมต่อที่แปลงถ่าน(y กับ x) a-y, b-x, c-z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



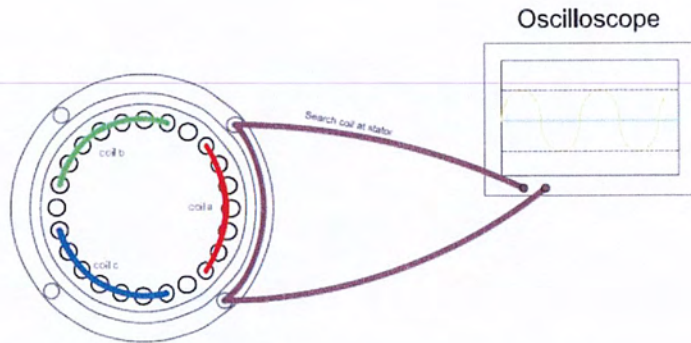
รูปที่ 3.22 จุดเชื่อมต่อเมอเปลี่ยนจุดเชื่อมต่อทแปรงถ่าน(z กับ y) a-x, b-z, c-y

### 3.6.4 การตรวจสอบการลัดวงจรของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์

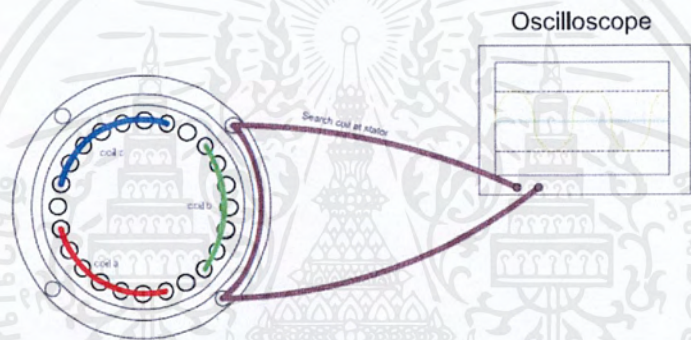
ในขั้นตอนก่อนหน้านั้นจะเป็นการตรวจสอบความผิดปกติต่างๆที่เกิดขึ้นกับขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ซึ่งได้ทำการตรวจสอบการพันขดลวดทั้งหมด ตรวจสอบค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวด และตรวจสอบค่าความต้านทานของจุดเชื่อมต่อต่างๆซึ่งไม่พบความผิดปกติที่ทำให้เกิดกระแสสามเฟสไม่สมดุลแต่อย่างใด

ในการทดสอบในขั้นตอนนี้จะเป็นการบ่งบอกว่าขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์นั้นมีการลัดวงจรระหว่างขดหรือไม่ เพราะการลัดวงจรระหว่างขดนั้นจะทำให้ขดลวดในวงจรเฟสที่เกิดการลัดวงจรมีจำนวนรอบลดลงไปส่งผลทำให้ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก(หน่วยแอมแปร์.รอบ) ในวงจรแม่เหล็กของขดลวดเฟสที่เกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดอยู่นั้นมีค่าลดลง

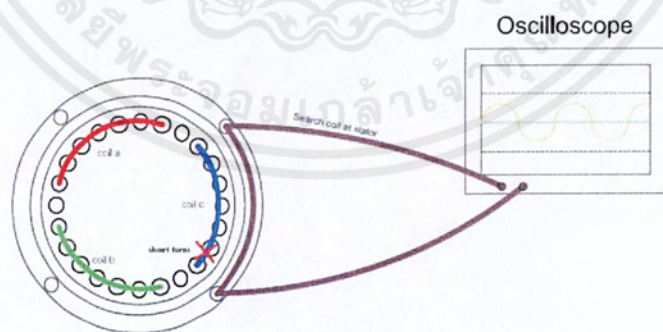
ในการทดสอบการลัดวงจรระหว่างขดจะทำการพันขดลวดค้นหาเพื่อวัดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นซึ่งโดยปกติแล้วแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กหมุนสามเฟสจะมีค่าคงที่ตลอดทุกตำแหน่งรอบช่องอากาศ แต่เมื่อใดที่หมุนตำแหน่งของขดลวดที่เกิดการลัดวงจรระหว่างขดมาตรงตำแหน่งของขดลวดค้นหาจะเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ต่ำลงเพราะค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กหมุนสามเฟสจะขึ้นกับจำนวนรอบต่อเฟสเพราะการลัดวงจรระหว่างเฟสจะทำให้จำนวนรอบที่เกิดการลัดวงจรลดลงไป โดยจะทำการหมุนโรเตอร์ไปทีละ 10 องศาทางกลเพื่อดูผลของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนขดลวดค้นหา โดยลักษณะการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 3.23 - 3.25



รูปที่ 3.23 ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของขดลวดค้นหาพันบนสเตเตอร์ ซึ่งเกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสามเฟสเข้าสู่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์



รูปที่ 3.24 ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของขดลวดค้นหาพันบนสเตเตอร์ ซึ่งเกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสามเฟสเข้าสู่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์

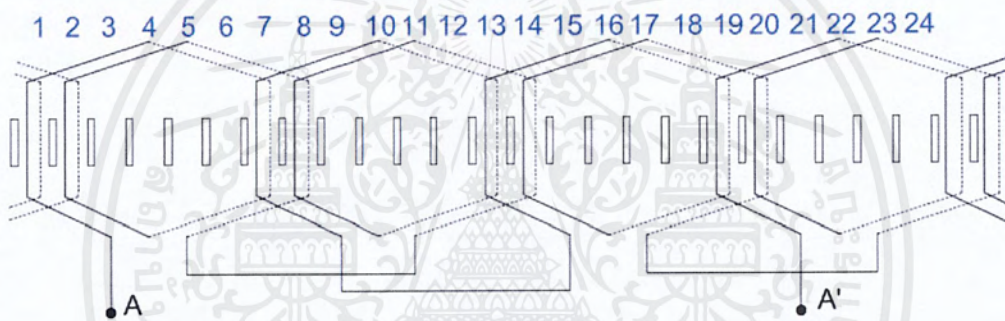


รูปที่ 3.25 ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของขดลวดค้นหาพันบนสเตเตอร์ ซึ่งเกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสามเฟสเข้าสู่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์

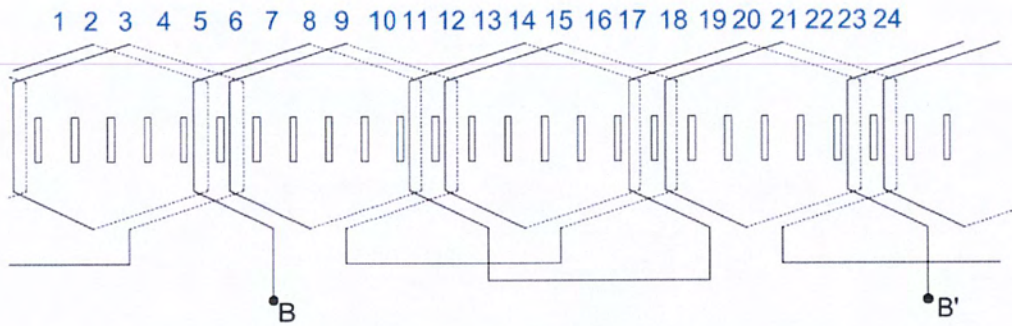
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.5 การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ใหม่

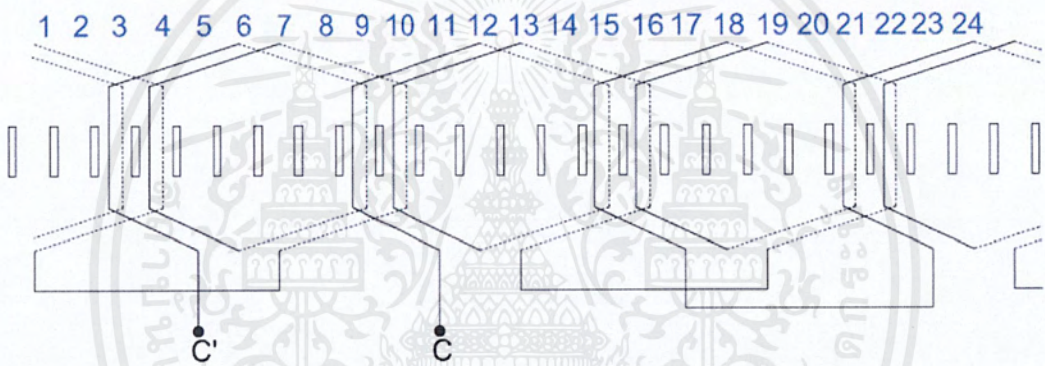
ในการตรวจสอบในหัวข้อ 3.6.4 จะพบว่ามี การลัดวงจรระหว่างขดจึงจำเป็นต้องมีการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ใหม่ เพื่อแก้ปัญหาการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดโดยการพันขดลวดขึ้นมาใหม่ในครั้งนี้จะยึดการพันขดลวดแบบกระจาย 2 สล็อต/ขั้ว/เฟส พันแบบ full pitch จำนวน 22 รอบเท่ากับขดลวดเดิม ซึ่งในการพันขดลวดใหม่จำเป็นต้องใช้ขนาดขดลวดใกล้เคียงขนาดของขดลวดเดิมที่ใช้พัน ซึ่งเลือกใช้ขดลวดขนาด SWG 19 เพื่อให้ได้พิคัดของตัวมอเตอร์เหนี่ยวนำต้นแบบใกล้เคียงเส้นลวดเดิมมากที่สุด ซึ่งจะแสดงรูปแบบการพันดังรูปที่ 3.26-3.28 และเริ่มการพันจากการใช้บ๊อบบินเพื่อแกนในการพันแสดงดังรูปที่ 3.29 และในขั้นตอนการพันต้องมีการระมัดระวังเป็นพิเศษจากโอกาสที่จะเกิดการลัดวงจรระหว่างเฟสโดยการใช้กระดาษรอง ดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.26 แบบการพันขดลวดอาร์มาเจอร์เฟส a ใหม่ของโรเตอร์

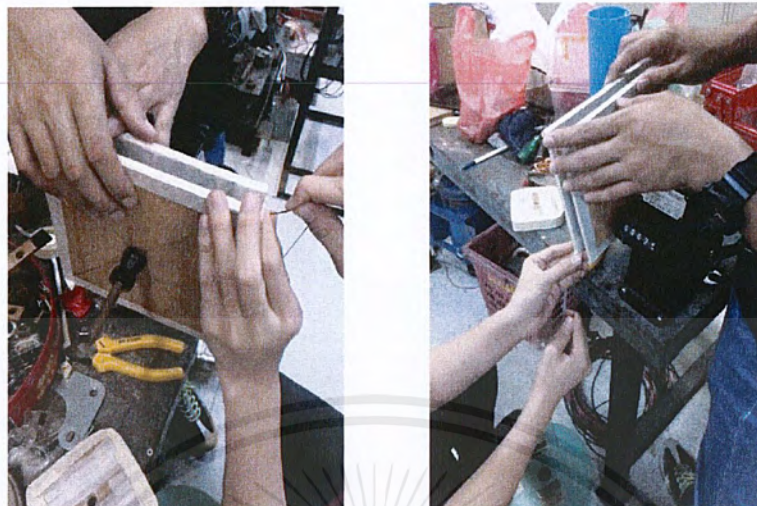


รูปที่ 3.27 แบบการพันขดลวดอาร์มาเจอร์เฟส b ใหม่ของโรเตอร์

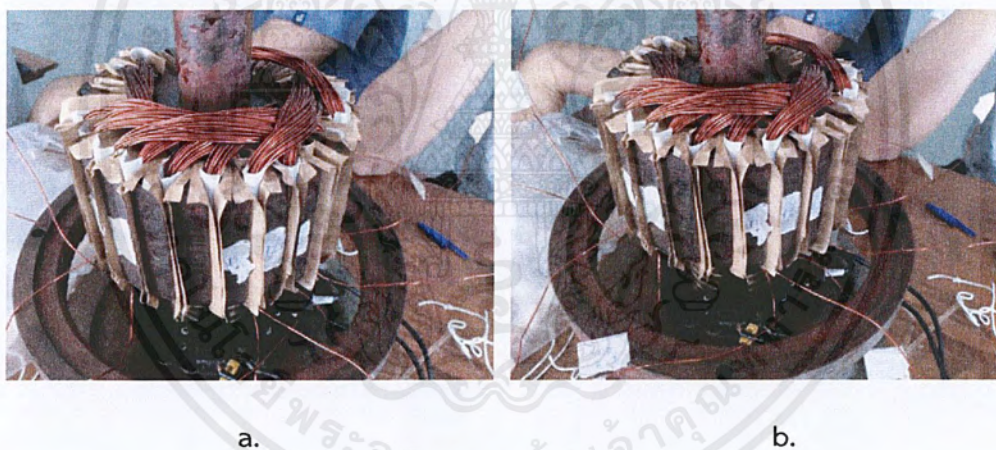


รูปที่ 3.28 แบบการพันขดลวดอาร์มาเจอร์เฟส c ใหม่ของโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 ขั้นตอนการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ใหม่จำนวน 22 รอบต่อขดด้วยบ๊อบบิ้น



รูปที่ 3.30 การนำขดลวดอาร์มาเจอร์ที่พันเป็นขดด้วยบ๊อบบิ้นและนำไปใส่ในร่องสลิตด้วยความระมัดระวัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 การหาแรงบิดสนามแม่เหล็กและพลังงานร่วมในช่องอากาศ

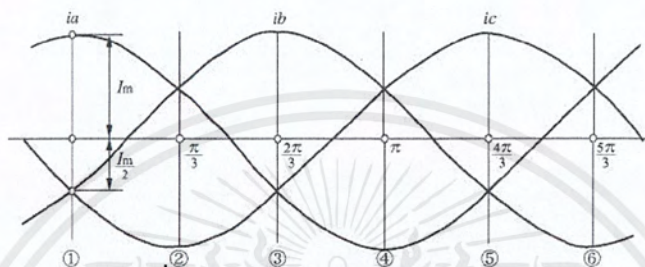
การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อพิสูจน์ว่าแรงบิดในสนามแม่เหล็กเกิดจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กจริงและความสำคัญอย่างยิ่งเพราะเป็นจุดมุ่งหมายสุดท้ายของปริญญาโท ซึ่งจะต้องผ่านการทดสอบอื่นๆดังที่กล่าวมาข้างต้น อันดับแรกจำเป็นต้องทราบโครงสร้างและพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลที่ใช้เป็นตัวทดสอบ หลังจากนั้นจำเป็นต้องสามารถบอกลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดในช่องอากาศในกรณีต่างๆได้ เมื่อสามารถหาแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าในช่องอากาศได้ก็จำเป็นต้องหาแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศจริงๆโดยคิดผลของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ตกคร่อมที่แกนเหล็กด้วย เมื่อทดสอบและเข้าใจสิ่งที่ทำมาทั้งหมดแล้วการทดสอบนี้จะเป็นการรวมการทดสอบทั้งหมดเข้าด้วยกัน โดยเริ่มจากสูตรค่าแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก (Electromagnetic torque) เป็นไปดังสมการที่ 2.63 และสูตรการหาค่า Co-energy ในช่องอากาศจากสมการที่ 2.62 จากบทที่ 2 จะเห็นว่าสมการที่ 2.63 เป็นการคิดแรงบิดในช่องอากาศจากค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบอื่นๆที่ได้ทำมา และค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับ Ampere's law ดังสมการที่ 3.11

$$N_i = \oint H \cdot d\vec{l} \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

เมื่อพิจารณาถึง B-H curve พบว่าเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าจนถึงจุดอิ่มตัวแล้วจะไม่ทำให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กไม่เพิ่มขึ้นด้วยเมื่อพิจารณาสมการค่าแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กดังสมการที่ 2.78 พบว่าเมื่อค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กไม่เพิ่มขึ้นส่งผลโดยตรงกับค่าแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กทำให้ค่าแรงบิดไม่เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นการคำนวณค่าแรงบิดในช่องอากาศไม่อาจสรุปได้ถึงค่าแรงบิดที่จะเกิดขึ้นจริงได้เนื่องจากผลของการอิ่มตัวของแกนเหล็ก ดังนั้นทางผู้จัดทำจึงทำการหาแรงบิดขาออกที่วัดได้จากเพลาลูกโดยตรง

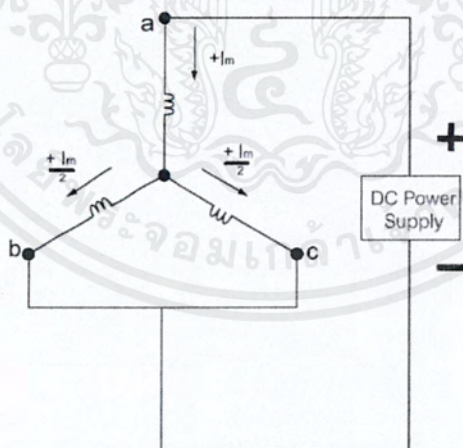
## วิธีการทดสอบและหาแรงบิดที่เพลลา

เนื่องจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสสลับที่ชนิด wound rotor จึงมีขั้วปลายสายไฟทั้งที่สเตเตอร์และโรเตอร์ ดังนั้นสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้ทั้งที่สเตเตอร์และโรเตอร์ โดยจะทำการจำลอง ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง ดังรูปที่ 3.31 ซึ่งเลือกค่าแอมพลิจูดกระแสตรงจุดหมายเลข 1 และจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยต่อปลายเข้าด้วยกันในลักษณะการต่อแบบ Y

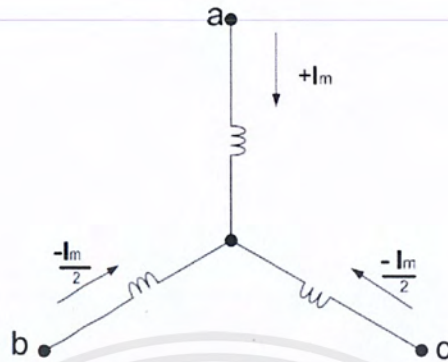


รูปที่ 3.31 กระแสไฟฟ้าสามเฟส ณ เวลาใดๆ

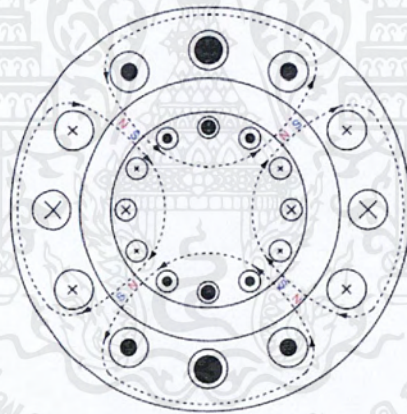
เมื่อทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่สเตเตอร์และโรเตอร์ จะมีลักษณะของกระแสรูปที่ 3.32 เฟสที่ต่อกับไฟบวกจะมีแอมพลิจูดตามแหล่งจ่าย ส่วนเฟสที่เหลือจะมีแอมพลิจูดเป็นครึ่งหนึ่งของแหล่งจ่าย หรือสามารถเขียนได้อีกแบบดังรูปที่ 3.33 ซึ่งตรงกับกระแสไฟฟ้าสามเฟส ณ จุดที่ 1



รูปที่ 3.32 ลักษณะการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดอาร์มาเจอร์สเตเตอร์และโรเตอร์

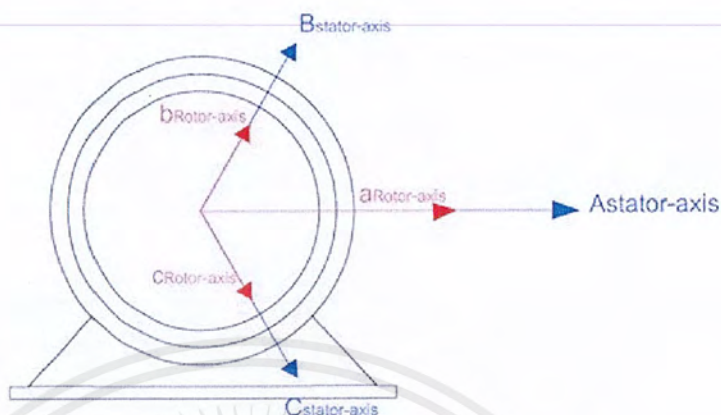


รูปที่ 3.33 ลักษณะการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดอาร์มาเจอร์สเตเตอร์และโรเตอร์



รูปที่ 3.34 ลักษณะทิศทางของกระแสในแต่ละ coil

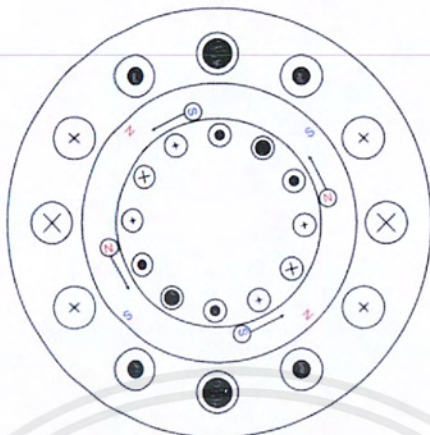
เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 3.33 ลักษณะทิศทางและปริมาณกระแสไฟฟ้าขดลวดอาร์มาเจอร์เฟส A ของทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์จะมีปริมาณกระแสไฟฟ้ามากที่สุด และกระแสไฟฟ้าของเฟส B และ C มีปริมาณครึ่งหนึ่งของกระแสไฟฟ้าเฟส A แสดงได้ดังรูปที่ 3.34 โดยแสดงออกมาในรูปแบบของสัญลักษณ์พุ่งเข้าและพุ่งออก สัญลักษณ์ที่ใหญ่จะแทนปริมาณกระแสที่มาก เมื่อมีกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กมีทิศทางตามกฎมือขวา โดยฟลักซ์แม่เหล็กจะเกิดทั้งที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์และที่โรเตอร์และจะเกิดทิศทางของสนามแม่เหล็ก และหลังจากจ่ายกระแสด้วยวิธีดังกล่าวจะทำให้เกิดจุดล่อคกันของสเตเตอร์และโรเตอร์ในลักษณะดังรูป หรือสามารถมองในรูปอย่างง่ายดังรูปที่ 3.35 โดยจะนำเสนอรูปแบบอย่างง่ายในลักษณะเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีจำนวนขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว



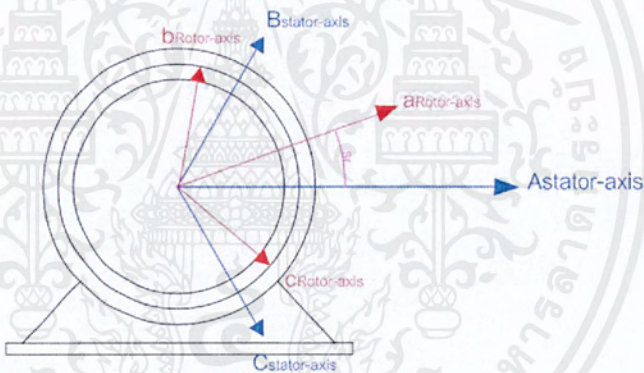
รูปที่ 3.35 แกนแม่เหล็กของเครื่องจักรกลแบบมีจำนวนขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว

เมื่อมองในลักษณะของแกนแม่เหล็กแสดงได้ดังรูปที่ 3.35 โดยจะเป็นแกนแม่เหล็กลัพธ์ ซึ่งจะอยู่ในแนวเดียวกับเฟส A เนื่องจากจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงในเฟส A ให้มีค่ามากที่สุด ซึ่งรูปดังกล่าวจะเป็นรูปในกรณีที่เครื่องจักรกลล๊อคกันอยู่เนื่องจากผลของทิศทางสนามแม่เหล็ก คือแกนแม่เหล็กลัพธ์ของทั้งที่สเตเตอร์และที่โรเตอร์อยู่ในแนวเดียวกัน (ทับกัน)

ซึ่งเมื่อพยายามบิดเพลาไปในมุมต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 3.36 ผลที่ได้คือจะต้องมีแรงที่ต้านการบิดเนื่องจากการดูดกันของทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์และเส้นแรงแม่เหล็กที่โรเตอร์ แสดงได้ในรูปอย่างง่ายในรูปที่ 3.37 โดยมุมระหว่างแกนแม่เหล็กของทั้งคู่คือมุมระหว่าง mmf ลัพธ์ของสนามแม่เหล็กจากขดลวดสเตเตอร์และสนามแม่เหล็กจากขดลวดโรเตอร์ จากสมการการหาแรงบิดที่ช่องอากาศ (Electromagnetic Torque) โดยจะหมุนเพลาเป็นมุมต่างๆโดยมุมที่บิดไปเป็นมุมทางกล เนื่องจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำการทดลองเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้า 4 ขั้วค่ามุมทางไฟฟ้าจึงเป็นสองเท่าของมุมทางกลแสดงได้ดังสมการที่ 2.26 เมื่อคำนวณตามสมการที่ 2.78 ผลที่ได้ควรจะสอดคล้องกับค่าไซน์ของมุมทางไฟฟ้าที่ทำการหมุน เพื่อพิสูจน์ว่าค่าแรงบิดที่ได้กับแรงบิดที่คำนวณได้มีค่าไปในแนวทางเดียวกัน



รูปที่ 3.36 ลักษณะทิศทางของกระแสในแต่ละ coil ขณะหมุนเฟลา



รูปที่ 3.37 แกนแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบ 2 ขั้วเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในลักษณะต่อแบบ Y

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \tag{3.12}$$

ลักษณะการหาแรงบิดที่เฟลา คือจะต่อแขนออกมาจากจุดศูนย์กลางของเฟลาแล้วใช้เครื่องวัดแรงเกี่ยวคล้องไว้กับแขนของเฟลาในลักษณะตั้งฉากเนื่องจากแรงบิดคือผลคูณของแรงกับระยะทางที่ตั้งฉาก ดังสมการที่ 3.13

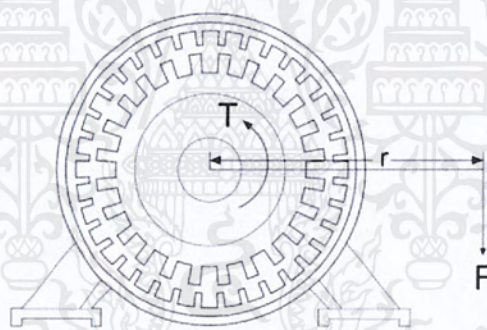
$$\tau = r \times F \tag{3.13}$$

โดยลักษณะของการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 3.38



(a)

(b)



(c)

รูปที่ 3.38 (a),(b),(c) ลักษณะการทดสอบหาแรงบิดที่เพลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบจะทดลองจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 3 A จนถึง 10 A และ หมุนเพลาไป ในมุมทางกลต่างๆตั้งแต่ 0 องศา ถึง 45 องศา หรือ 0 -180 องศาทางไฟฟ้า โดยค่าแรงบิดที่ได้วัดได้จะเป็นค่าแรงบิดขาออกซึ่งที่ได้จะต้องน้อยกว่าค่าแรงบิดในช่องอากาศเนื่องจากผลของการสูญเสียต่างๆซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.78 และสมการที่ 3.13 ในแต่ละองศาที่บิดไป โดยจะมองในรูปของ สัดส่วนความต่างซึ่งควรจะมีสัดส่วนความต่างเท่าๆกันตลอดทุกองศาที่บิดไป

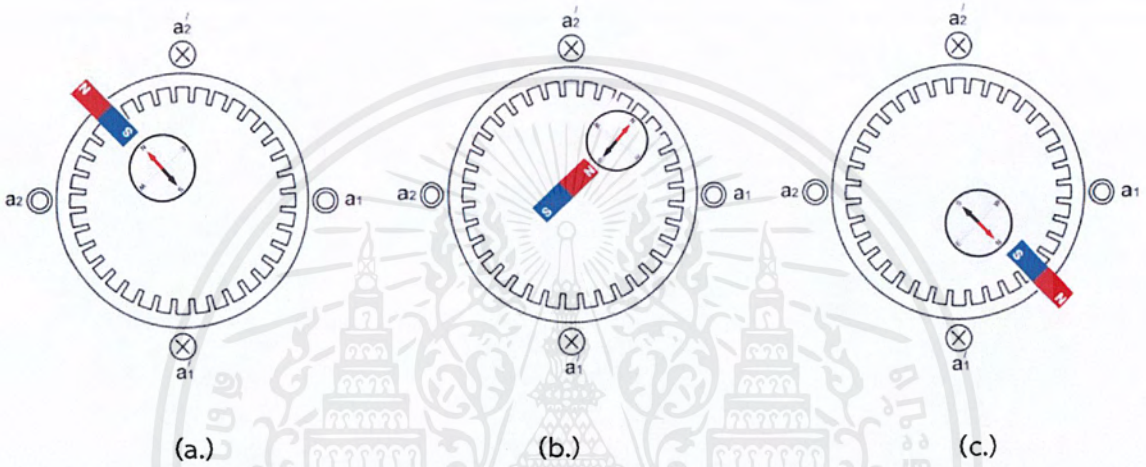


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

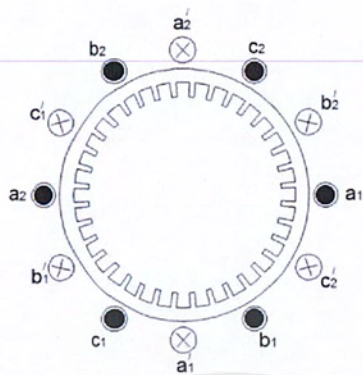
### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดสอบการหาจำนวนขั้วแม่เหล็ก



รูปที่ 4.1 (a),(b),(c)การใช้เข็มทิศแสดงบริเวณจุดที่มีสนามแม่เหล็กมากที่สุดแต่ละบริเวณ

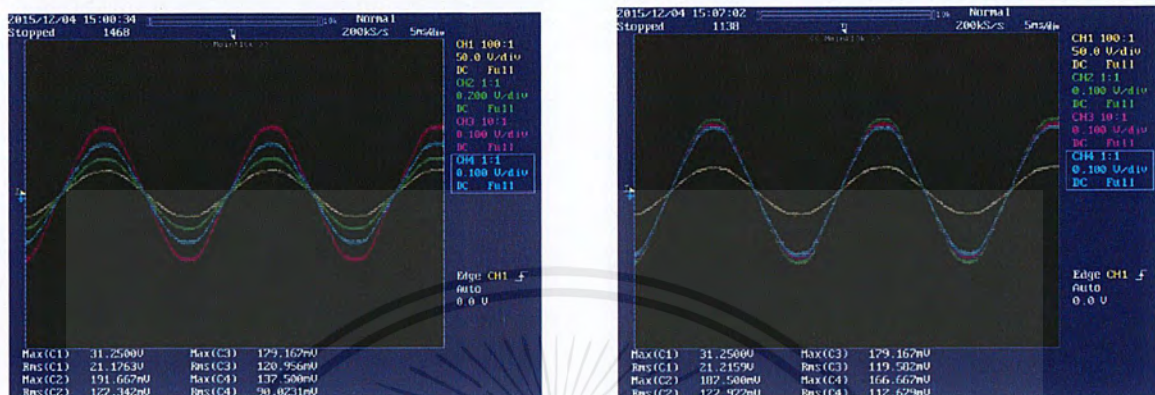
จากผลการทดลองที่ 4.1 จึงสรุปได้ว่าจำนวนขั้วของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับมีทั้งหมด 4 ขั้ว โดยเมื่อทำการทดสอบแบบเดียวกันทั้งเฟส b และเฟส c จะได้ผลการทดลองเดียวกันแต่จุดที่เข็มทิศมีการเปลี่ยนแปลงจะอยู่คนละบริเวณกันเนื่องจากตำแหน่งของ coil แต่ละเฟส ดังนั้นการทดลองนี้สามารถประมาณตำแหน่งของ coil แต่ละเฟสได้ด้วยจากทฤษฎีเดียวกัน แสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งของ coil แต่ละเฟสโดยประมาณ

จากการทดสอบที่ผ่านมาจะสามารถทราบจำนวนของขั้วแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้อีกทั้งยังสามารถประมาณตำแหน่งโดยประมาณของ coil แต่ละเฟสได้ด้วย ดังนั้นจำเป็นต้องทราบตำแหน่งที่แน่นอนของ coil แต่ละเฟส ซึ่งจะแสดงได้จากการทดสอบที่ 3.2

## 4.2 ผลการทดสอบการหาตำแหน่งของขดลวดอาร์มาเจอร์



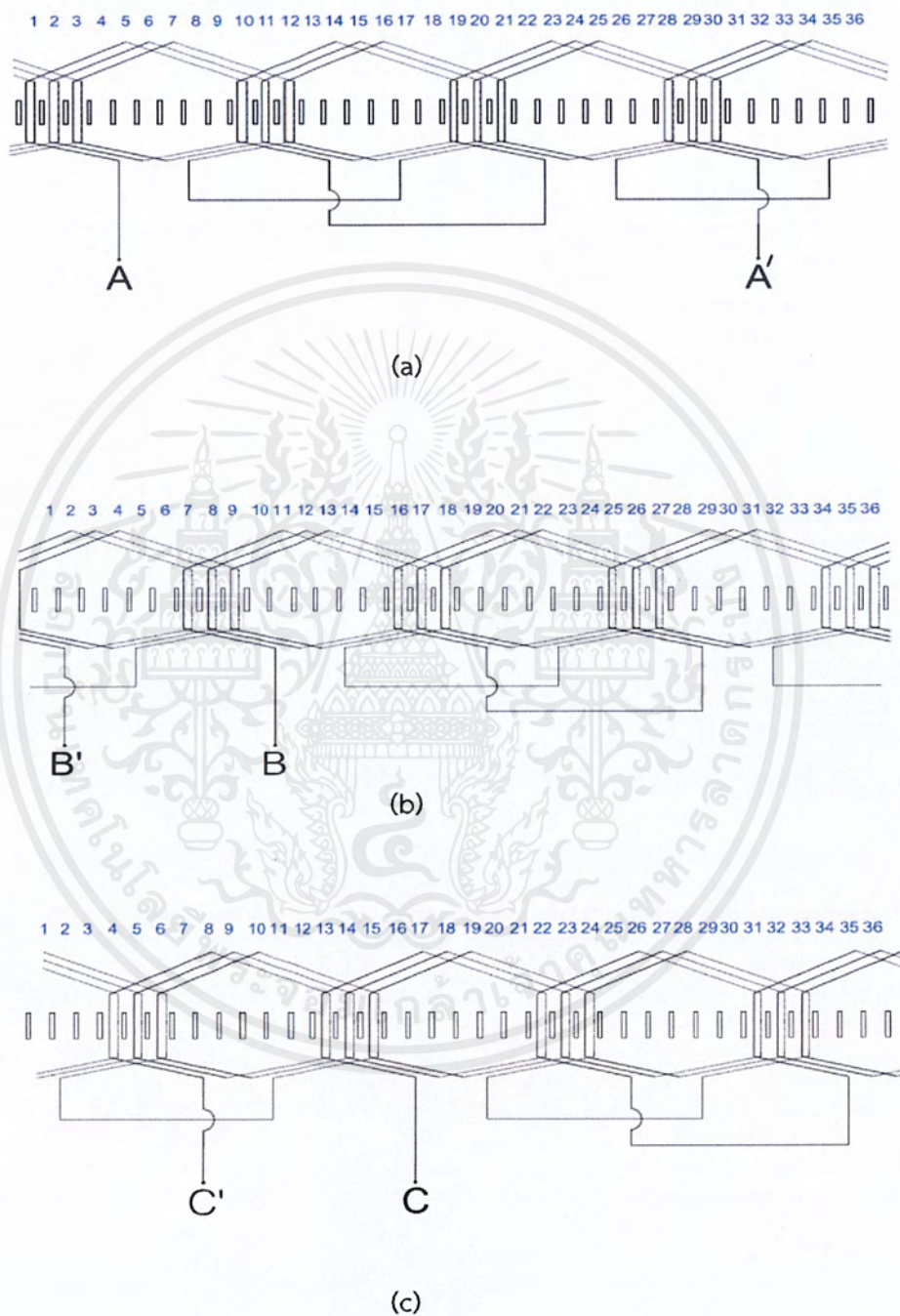
(a.)

(b.)

รูปที่ 4.3 (a)รูปสัญญาณของแรงดันที่วัดจากขดลวดคั่นหาที่ stator แต่ละตำแหน่งโดยจ่ายไฟฟ้า กระแสตรง

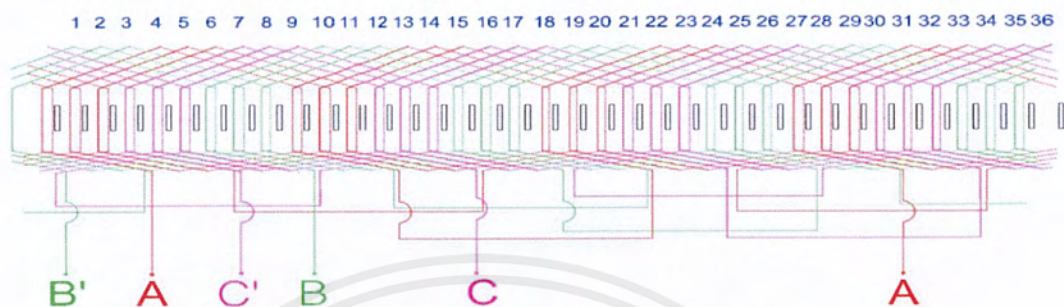
(b) รูปสัญญาณของแรงดันที่วัดจากขดลวดคั่นหาที่ stator โดยวางตำแหน่งแตกต่างจากภาพ (a.)

รูปสัญญาณที่เกิดขึ้น แสดงในรูปที่ 4.3 (a) จะเห็นว่าค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ Channel 2 มีค่าสูงที่สุดและ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ Channel4 มีค่าต่ำสุด (สัญญาณ Channel1 เป็นสัญญาณแรงดันที่ป้อนเข้า ขดอาร์มาเจอร์เฟส A สมมุติฐานที่เกิดขึ้นคือ ขดที่ Channel2 จับสัญญาณ ได้เป็นขดที่อยู่กึ่งกลางแต่ยังมีขดที่ Channel4 จับได้สัญญาณที่ต่ำกว่า Channel3 อยู่มากซึ่งจะทำให้การ เปลี่ยน ขดที่อยู่ Channel4 ไปอยู่ที่ สล็อตอีกฝั่งหนึ่งจากนั้นจับสัญญาณ รูปสัญญาณที่เกิดขึ้น แสดงในรูป ที่ 4.3 (b) สัญญาณแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำยังคงอยู่ที่ Channel2 และสัญญาณแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ เกิดขึ้นที่ Channel3 และ Channel4 มีค่าใกล้เคียงกันสรุปได้ว่าตำแหน่งของขดลวดเฟสA (a1) อยู่ที่ ตำแหน่งสล็อตที่ขดลวดคั่นหาทั้ง3วางตัวอยู่ นอกจากนี้ยังสามารถหาตำแหน่งของขด a2 ได้จากการเลื่อน จำนวนช่องสล็อตจากขด a1 ไป180 องศาทางไฟฟ้าหรือ 9 สล็อต (ความกว้าง1สล็อตเท่ากับ 20 องศา ทางไฟฟ้า) หลักจากนั้นทำเช่นเดียวกันกับเฟส B และเฟส C จะได้ตำแหน่งของขดลวด ทุกเฟสในทุกช่อง สล็อตดังรูปที่ 4.4 - 4.6



รูปที่ 4.4 (a)การวางขดลวดของเฟส a, (b)การวางขดลวดของเฟส b, (c)การวางขดลวดของเฟส c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ตำแหน่งการวางขดลวดของทุกเฟสบนสเตเตอร์สลิตแบบ Double layer



รูปที่ 4.6 การวางขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสบนสเตเตอร์สลิตแบบ Double layer

จากผลการทดสอบทำให้ทราบตำแหน่งการพันขดลวดที่ชัดเจนทั้งเฟส a, b, c และทราบค่าสัมประสิทธิ์การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของสเตเตอร์ได้จากสมการที่ 2.58 และ 2.69

จากรูปที่ 4.5 พบว่า  $n = 3$

$$\alpha = 20$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore K_d = \frac{\sin(30^\circ)}{3 \sin(10^\circ)} = 0.96$$

$$\begin{aligned} \therefore K_p &= \cos 0 \\ &= 1 \end{aligned}$$

$$\therefore K_w = K_d K_p$$

$$\therefore K_{w, \text{stator}} = 0.96$$

และสามารถทราบการพันขดลวดอาร์มาเจอร์บนโรเตอร์ได้โดยจำนวนร่องสลิตบนโรเตอร์ที่ทั้งหมด 24 ร่องสลิต

$$\therefore n = 2, \alpha = 30$$

$$\therefore K_d = \frac{\sin(30^\circ)}{2 \sin(15^\circ)} = 0.966$$

พบว่าเป็นการพันแบบ Full-pitch winding ( $\gamma=0$ )

$$\begin{aligned} \therefore K_p &= \cos 0 \\ &= 1 \end{aligned}$$

$$\therefore K_w = K_d K_p$$

$$\therefore K_{w, \text{rotor}} = 0.966$$

#### 4.3 ผลการทดลองคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน

ตารางที่ 4.1 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสที่ขดลวดค้นหาจำนวน 2 รอบ

	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
40V	0.346	0.359	0.371	0.370	0.385	0.390	0.380	0.380	0.372	0.356	0.357	0.353
80v	0.695	0.702	0.719	0.736	0.745	0.753	0.755	0.740	0.724	0.713	0.697	0.690

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงการเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ บนขดลวดค้นหาที่พันเป็นก้อนจำนวน สองรอบ ซึ่งเป็นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากกระแสสามเฟสสมดุขของขดลวด อาร์มาเจอร์สามเฟสที่สเตเตอร์ ซึ่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ 40 V จะเห็นได้ว่าเมื่อหมุนโรเตอร์ ไปที่ตำแหน่งมุม ต่างๆทางกล เปรียบเทียบรูปที่ 4.7 ที่มุม  $0^{\circ}$  ซึ่งตำแหน่งของขดลวดค้นหาจะอยู่ที่มุม 0 องศาทางกลมี ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.346 V เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.7 ที่มุม  $60^{\circ}$  ซึ่งตำแหน่งของขดลวดค้นหา อยู่ที่มุม 60 องศาทางกล ขนาดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กมีขนาดเท่ากับ 0.371 V และมุมของแรงเคลื่อน เหนี่ยวนำขณะอยู่ที่มุมเท่ากับ 60 องศาทางกลจะมีมุมเฟสหน้าหน้าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขณะอยู่ที่ 0 องศา ทางกลอยู่ 120 องศาทางไฟฟ้า และในทำนองเดียวกันเมื่อ เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.7 ที่มุม  $120^{\circ}$  ซึ่ง ตำแหน่งของขดลวดค้นหาอยู่ที่มุม 120 องศาทางกล มีขนาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำมีขนาด 0.385 V และมุมของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจะมีมุมเฟสหน้าหน้าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขณะอยู่ที่ 0 องศาทางกลอยู่ 240 องศาทางไฟฟ้า ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่าการที่เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในขดลวดค้นหาเมื่อหมุน ตำแหน่งของขดลวดค้นหาไปในแต่ละมุมทางกล จะทำให้เกิดมุมต่างเฟสเป็นมุมทางไฟฟ้าซึ่งสัมพันธ์กับ ตำแหน่งมุมทางกลของขดลวดค้นหาและมีขนาดที่เท่ากัน เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กหมุนที่มีขนาด คงที่ในทุกๆตำแหน่งมุมทางกล และผลของความต่างเฟสเกิดจากตำแหน่งของการเกิดแรงเคลื่อน เหนี่ยวนำของขดลวดค้นหา

เมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไปที่ 80 V ซึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าสามเฟส มีค่า เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.8 ที่มุม  $0^{\circ}$  แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ(ch2) บนขดลวดค้นหาที่พันจำนวน 2 รอบ แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสป้อนเข้าขนาด 40V ที่มุม  $0^{\circ}$  ที่มีขนาด 0.346 V เปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.8 ที่มุม  $0^{\circ}$  แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ(ch2) บนขดลวดค้นหาที่พันจำนวน 2 รอบ แรงดันไฟฟ้า3เฟสป้อนเข้า 80V ที่มุม  $0^{\circ}$  ซึ่งมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 0.659 V และมีมุมอินเฟสกัน เมื่อมีกระแสมากขึ้นจะทำให้ขนาดของฟลักซ์ แม่เหล็กต่อขั้วมีขนาดเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำมีขนาดที่มากขึ้น

ตารางที่ 4.2 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสที่ขดลวดค้นหาจำนวน 3 รอบ

	$0^{\circ}$	$30^{\circ}$	$60^{\circ}$	$90^{\circ}$	$120^{\circ}$	$150^{\circ}$	$180^{\circ}$	$210^{\circ}$	$240^{\circ}$	$270^{\circ}$	$300^{\circ}$	$330^{\circ}$
40V	0.518	0.544	0.557	0.577	0.582	0.572	0.572	0.564	0.548	0.529	0.529	0.522
80v	1.11	1.03	1.05	1.08	1.09	1.10	1.11	1.08	1.06	1.04	1.02	1.01

ตารางที่ 4.2 แสดงการเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเมื่อเพิ่มจำนวนขดลวดจากสองรอบเป็น สามรอบ พิจารณาที่ รูปที่ 4.9 ที่มุม  $0^{\circ}$  แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ(ch2) บนขดลวดค้นหา ที่พันจำนวน 2 รอบ แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสป้อนเข้า 40V ที่มุม  $0^{\circ}$  ซึ่งมีขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีขนาด 0.346 V เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.9 ที่มุม  $0^{\circ}$  แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ(ch2) บนขดลวดค้นหาที่พันจำนวน 3 รอบ แรงดันไฟฟ้า3เฟสป้อนเข้า 40V ที่มุม  $0^{\circ}$  ซึ่งมีขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีขนาด 0.518 V ที่มุมเฟส เดียวกัน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มจำนวนรอบจะทำให้ปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วมี ขนาดที่เพิ่มมากขึ้นและส่งผลให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำมีขนาดมากขึ้น เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า 80 V จะได้ ลักษณะเดียวกันดังรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.3 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้า 1 เฟสที่ขดลวดค้นหาจำนวน 2 รอบ

	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
40v	0.391	0.177	0.148	0.369	0.156	0.162	0.357	0.140	0.172	0.386	0.162	0.169
80v	0.776	0.346	0.306	0.732	0.317	0.307	0.709	0.289	0.335	0.763	0.318	0.339

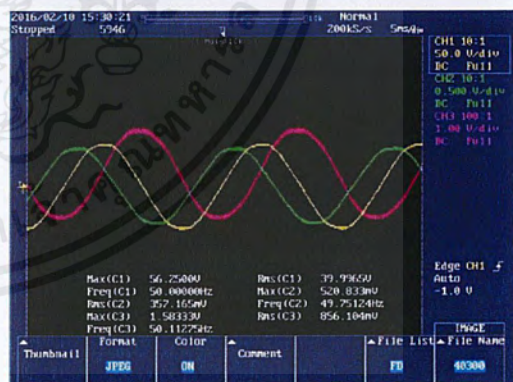
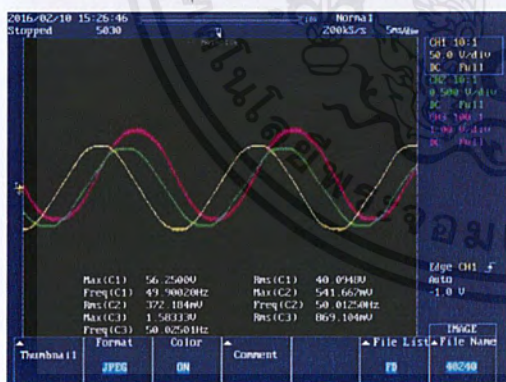
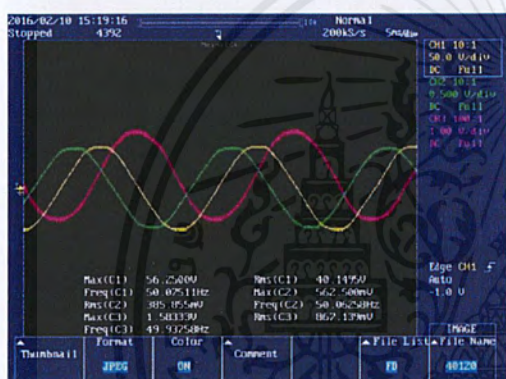
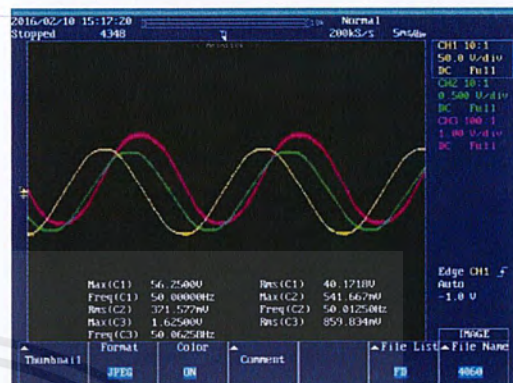
ตารางการที่ 4.3 แสดงการเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ บนขดลวดค้นหาที่พันเป็นก้อน จำนวนสองรอบ ซึ่งเป็นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งเกิดจากจ่าย ไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสจ่ายเข้าขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสที่เฟส a ของสเตเตอร์ ซึ่งจ่ายแรงดันที่ 40 V จะเห็นได้ว่าเมื่อหมุนตำแหน่งของขดลวดค้นหาไปที่ตำแหน่งมุมทางกลต่างๆ รูปที่ 4.11 ที่มุม 0° ซึ่ง ตำแหน่งของขดลวดค้นหาจะอยู่ที่มุม 0 องศาทางกล มีขนาด 0.391 V เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.11 ที่มุม 60° ซึ่งตำแหน่งของขดลวดค้นหาอยู่ที่มุม 60 องศาทางกล ขนาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำมีขนาด 0.148 V และมุมเฟสของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจะไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้า 1 เฟสจะไม่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน แต่จะเกิดสนามแม่เหล็กที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาในแนวแกนแม่เหล็ก ของเฟสนั้นๆ โดยปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กตัวชี้จะมีปริมาณน้อยลงเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของขดลวดค้นหา ออกไปจากแกนแม่เหล็กของเฟสนั้นๆ

เมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไปที่ 80 V ซึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.12 ที่มุม 0° แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ(ch2) บนขดลวดค้นหาที่พันจำนวน 2 รอบ แรงดันไฟฟ้า 1 เฟสป้อนเข้า 40V ที่ มุม 0° ที่มีขนาดเท่ากับ 0.391 V เปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.12 ที่มุม 0° แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ(ch2) บน ขดลวดค้นหาที่พันจำนวน 2 รอบ แรงดันไฟฟ้า 1 เฟสป้อนแรงดันเท่ากับ 80V ที่มุม 0° ซึ่งมีขนาดเพิ่มขึ้น เป็น 0.776 V และมีมุมเฟสที่มุมเฟสตรงกัน เนื่องการเพิ่มปริมาณของแรงดันไฟฟ้าส่งผลให้ฟลักซ์แม่เหล็ก ต่อตัวมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.4 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้า 1 เฟสที่ขดลวดค้นหาจำนวน 3 รอบ

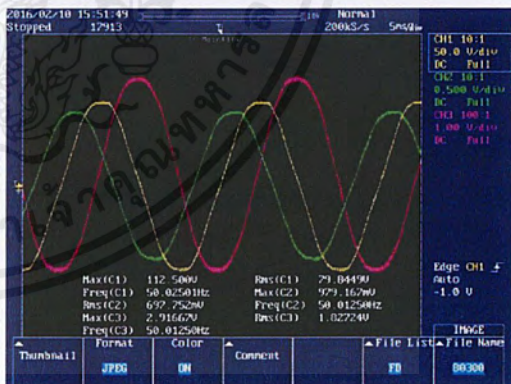
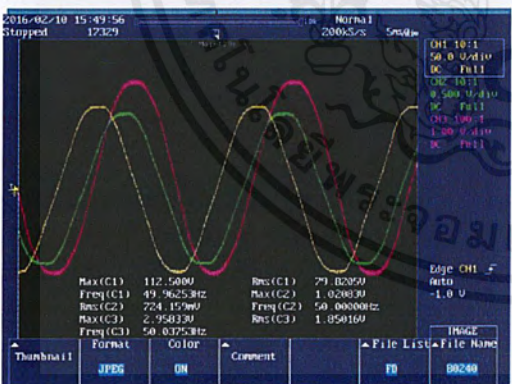
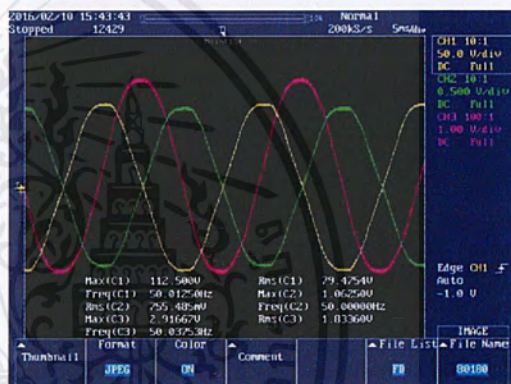
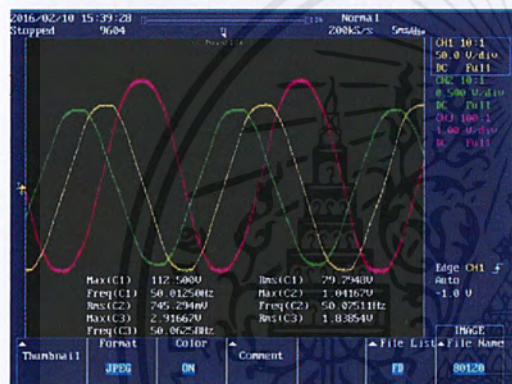
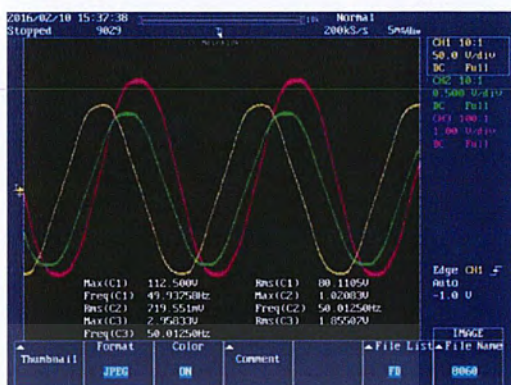
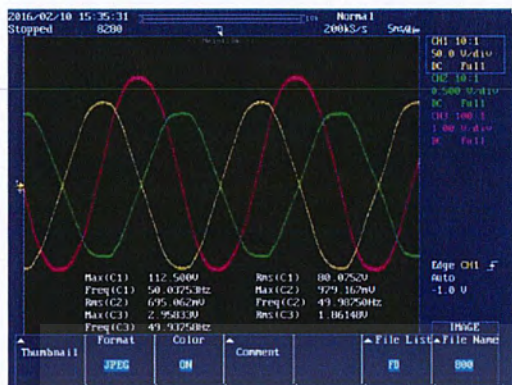
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
40v	0.531	0.252	0.235	0.573	0.250	0.263	0.584	0.239	0.242	0.549	0.159	0.215
80v	1.04	0.449	0.383	1.120	0.460	0.517	1.160	0.485	0.476	1.09	0.462	0.443

ตารางที่ 4.4 แสดงการเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเมื่อเพิ่มจำนวนขดลวดจากสองรอบเป็น สามรอบ พิจารณาที่ รูปที่ 4.11 ที่มุม 0° แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ(ch2) บนขดลวดค้นหาที่พันจำนวน 2 รอบ แรงดันไฟฟ้า 1 เฟสป้อนเข้าเท่ากับ 40V ที่มุม 0° มีขนาด 0.391 V เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.13 ที่มุม 0° แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ(ch2) บนขดลวดค้นหาที่พันจำนวน 3 รอบ แรงดันไฟฟ้า 1 เฟสป้อนเข้าขนาด 40V ที่มุม 0° ซึ่งมีขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีขนาด 0.531 V ที่มุมเฟสเดียวกัน เนื่องจากเมื่อเพิ่ม จำนวนรอบการพันขดลวดค้นหาจะส่งผลให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กมีขนาดเพิ่มขึ้น และได้ผลเดียวกันเมื่อป้อน แรงดันไฟฟ้าขนาด 80 V ดังรูปที่ 4.14



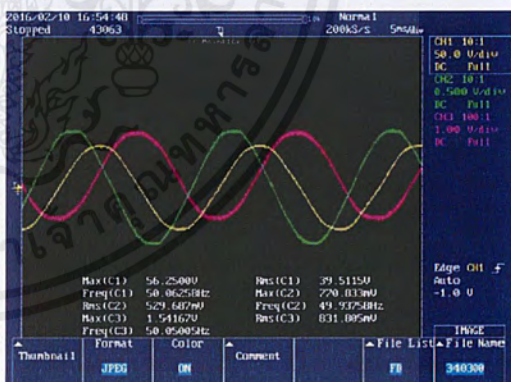
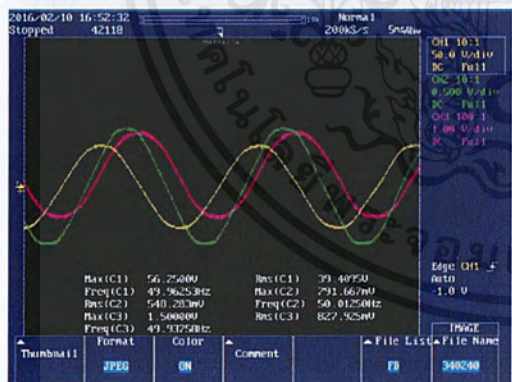
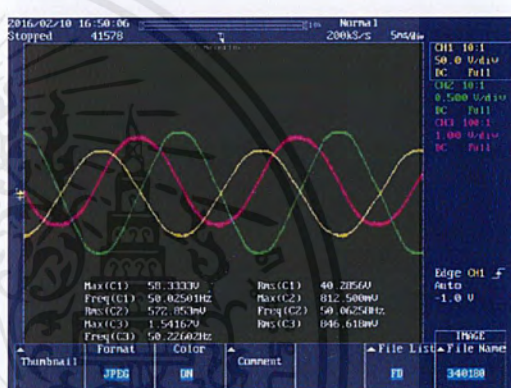
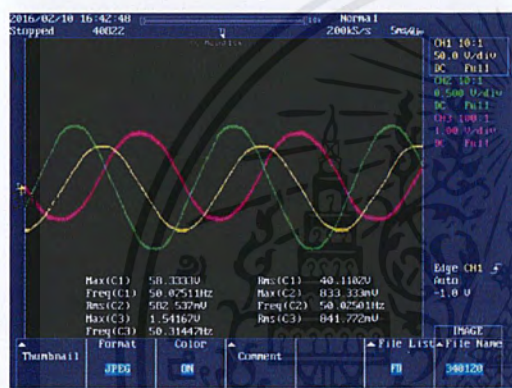
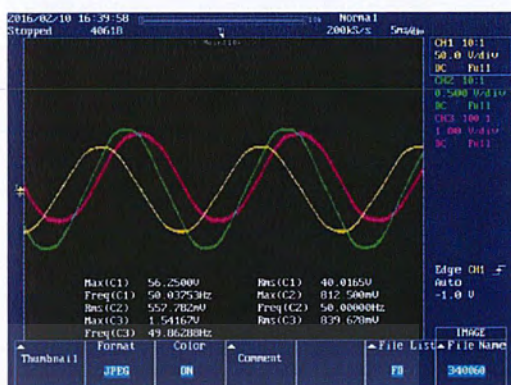
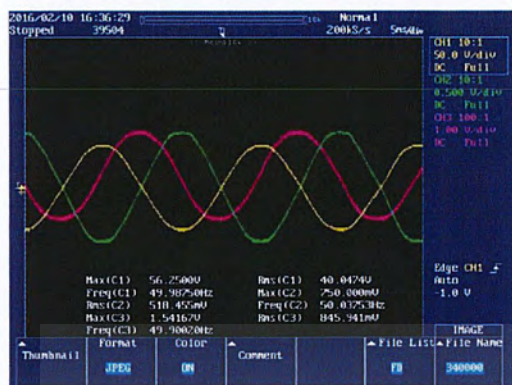
รูปที่ 4.7 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ(ch2) บน search coil ที่พัน 2 รอบ แรงดัน 3 เฟสป้อนเข้า 40V ที่มุม  $0^\circ$   $60^\circ$   $120^\circ$   $180^\circ$   $240^\circ$   $300^\circ$  ตามลำดับ (วัดจาก Magnetic axis ของขดลวดเฟส a ที่สเตเตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



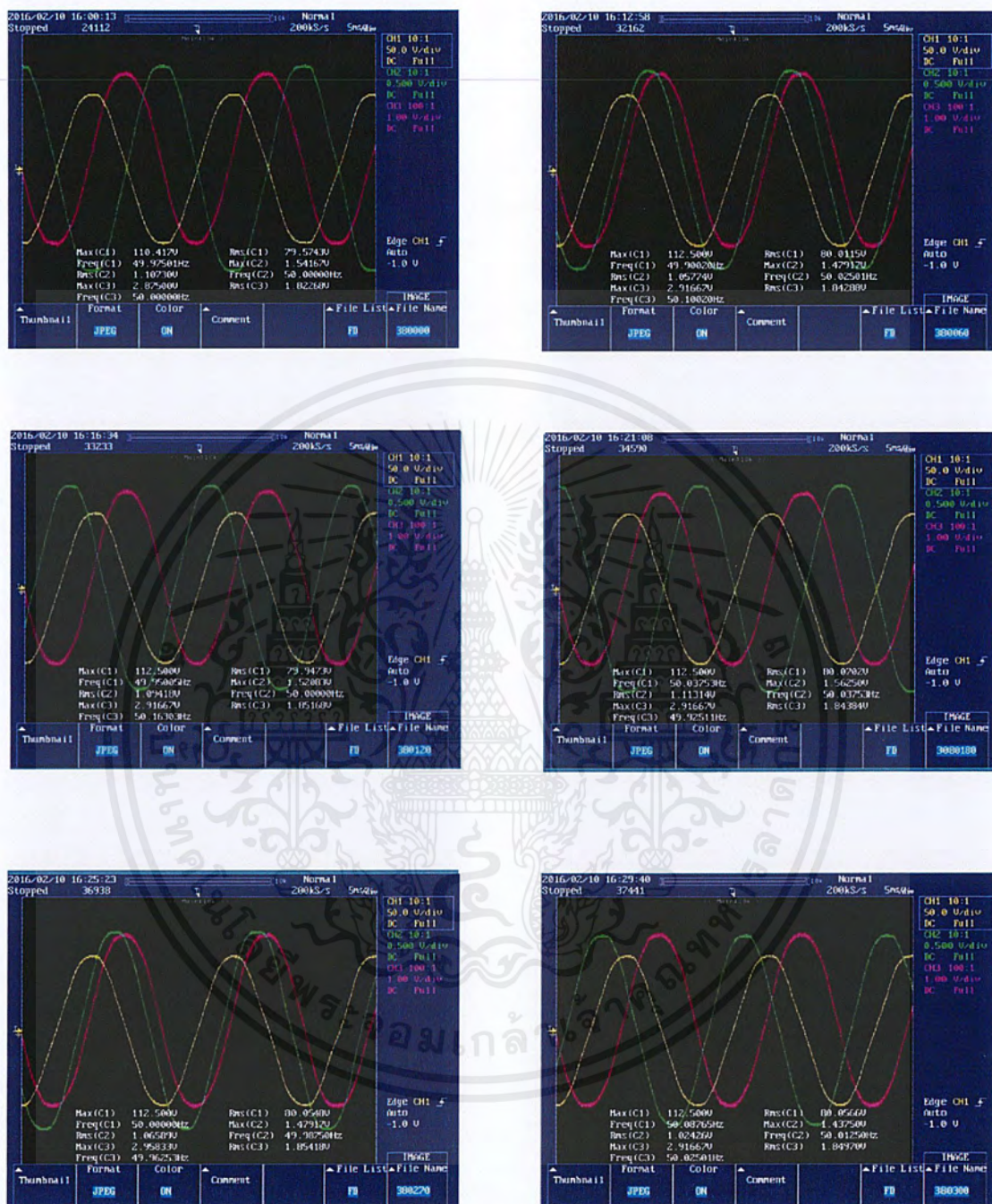
รูปที่ 4.8 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ(ch2) บน search coil ที่พัน 2 รอบ แรงดัน 3 เฟสป้อนเข้า 80V ที่มุม 0° 60° 120° 180° 240° 300° ตามลำดับ (วัดจาก Magnetic axis ของขดลวดเฟส a ที่สเตเตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



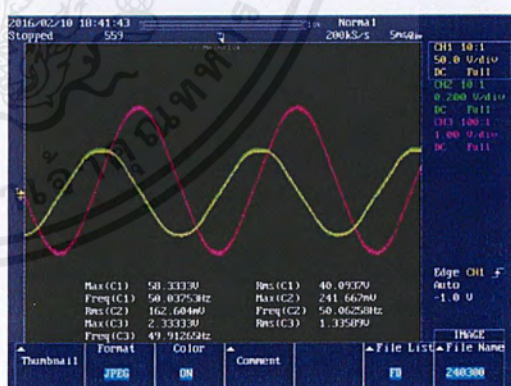
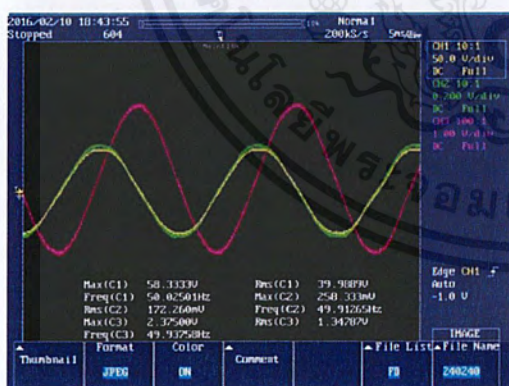
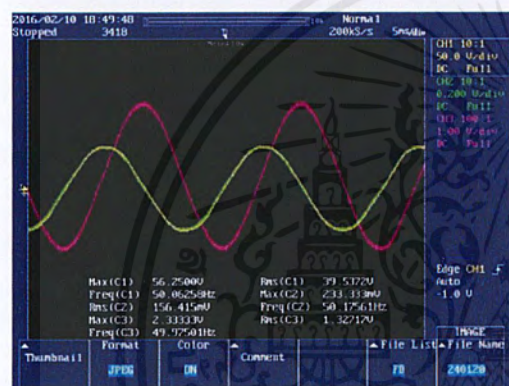
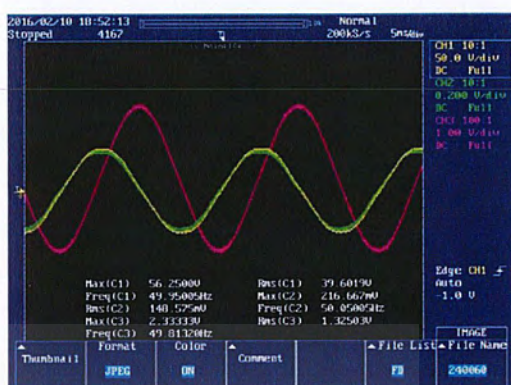
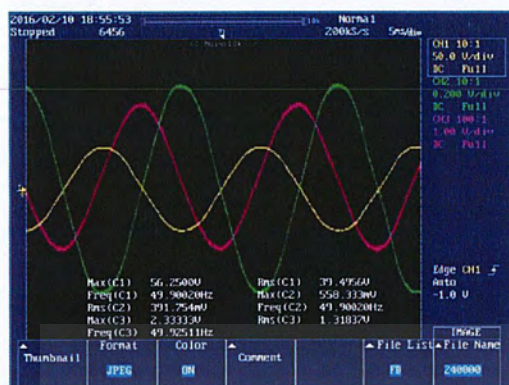
รูปที่ 4.9 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ(ch2) บน search coil ที่พัน 3 รอบ แรงดัน 3 เฟสป้อนเข้า 40V ที่มุม 0° 60° 120° 180° 240° 300° ตามลำดับ (วัดจาก Magnetic axis ของขดลวดเฟส a ที่สเตเตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่เว้นกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



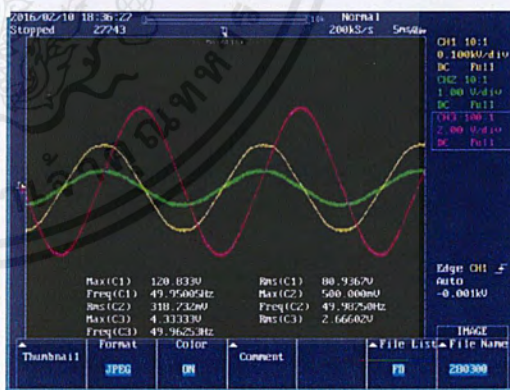
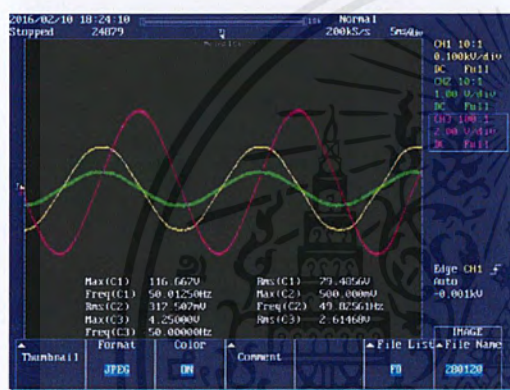
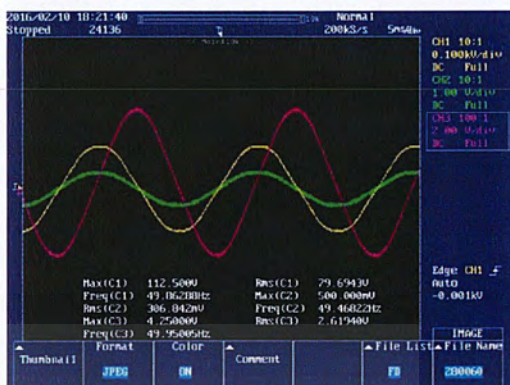
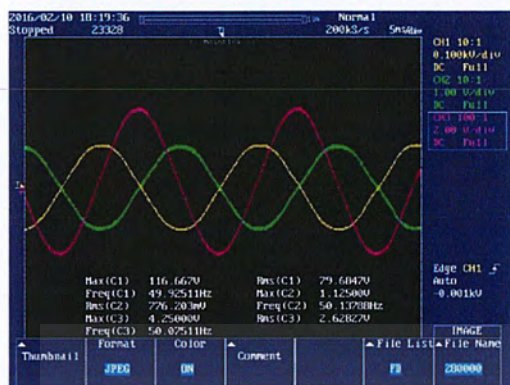
รูปที่ 4.10 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ(ch2) บน search coil ที่พัน 3 รอบ แรงดัน 3 เฟสป้อนเข้า 80V ที่มุม 0° 60° 120° 180° 240° 300° ตามลำดับ (วัดจาก Magnetic axis ของขดลวดเฟส a ที่สเตเตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



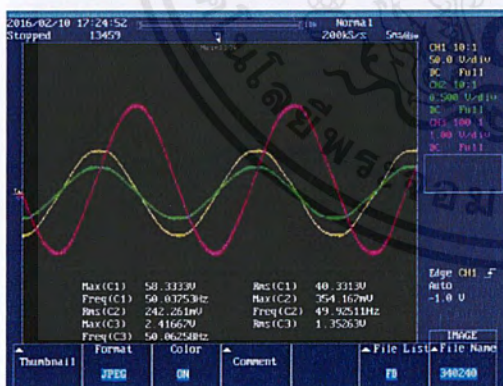
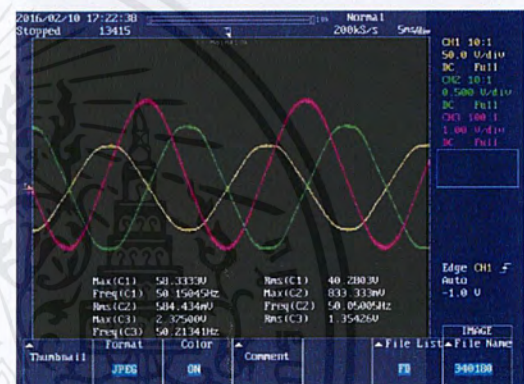
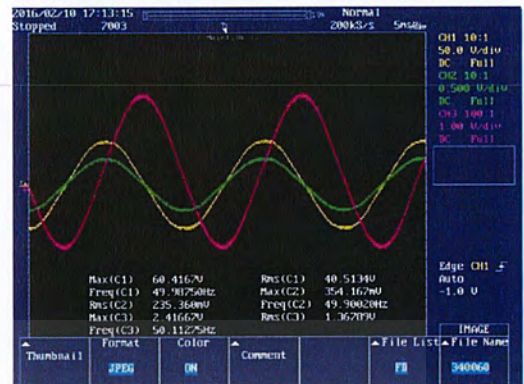
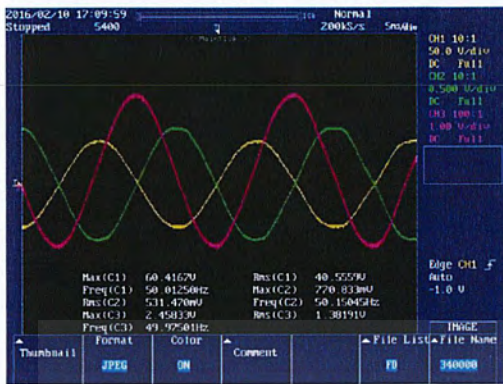
รูปที่ 4.11 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ(ch2) บน search coil ที่พัน 2 รอบ แรงดัน 1 เฟสป้อนเข้า 40V ที่มุม  $0^\circ$   $60^\circ$   $120^\circ$   $180^\circ$   $240^\circ$   $300^\circ$  ตามลำดับ (วัดจาก Magnetic axis ของขดลวดเฟส a ที่สเตเตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



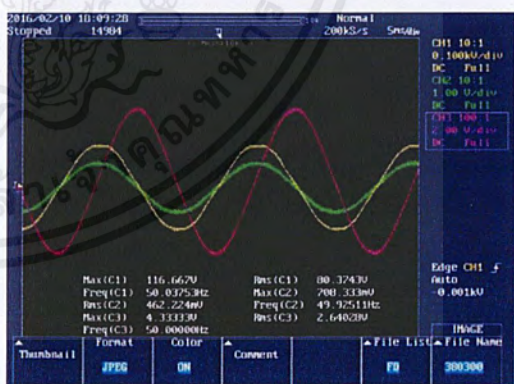
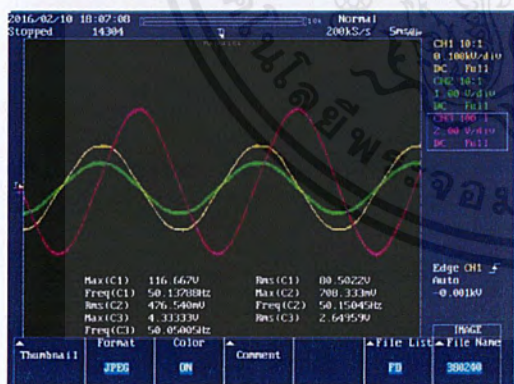
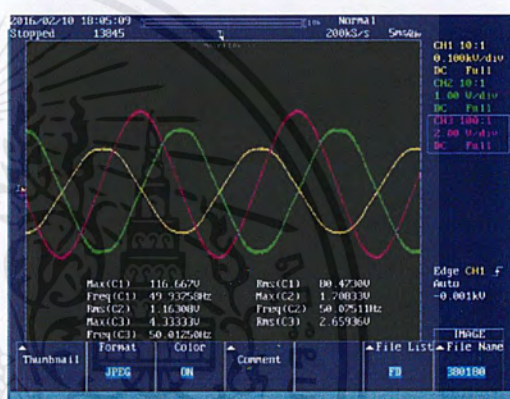
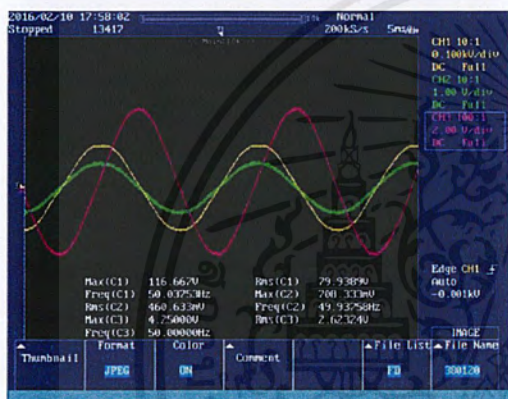
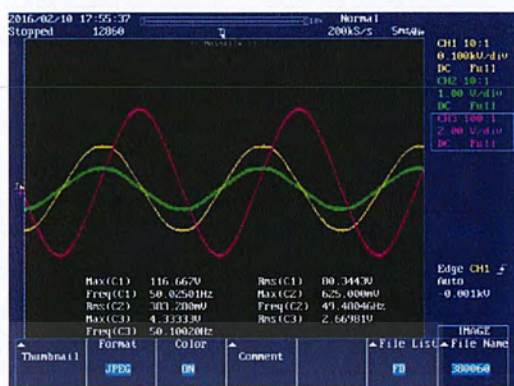
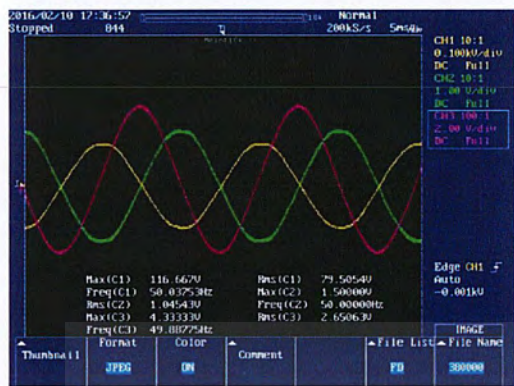
รูปที่ 4.12 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ(ch2) บน search coil ที่พัน 2 รอบ แรงดัน 1 เฟสป้อนเข้า 80V ที่มุม 0° 60° 120° 180° 240° 300° ตามลำดับ (วัดจาก Magnetic axis ของขดลวดเฟส a ที่สเตเตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ(ch2) บน search coil ที่พัน 3 รอบ แรงดัน 1 เฟสป้อนเข้า 40V ที่มุม  $0^\circ$   $60^\circ$   $120^\circ$   $180^\circ$   $240^\circ$   $300^\circ$  ตามลำดับ (วัดจาก Magnetic axis ของขดลวดเฟส a ที่สเตเตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



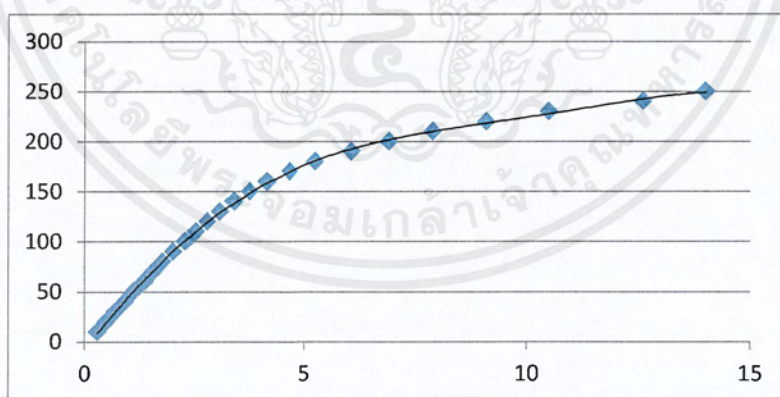
รูปที่ 4.14 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ(ch2) บน search coil ที่พัน 3 รอบ แรงดัน 1 เฟสป้อนเข้า 80V ที่มุม 0° 60° 120° 180° 240° 300° ตามลำดับ (วัดจาก Magnetic axis ของขดลวดเฟส a ที่สเตเตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ผลการทดสอบย่านการอิมิตัวของแกนเหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

ตารางที่ 4.5 ตารางความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย

Vrms	Irms	Vrms	Irms
10	0.289	130	3.06
20	0.485	140	3.37
30	0.693	150	3.73
40	0.912	160	4.13
50	1.11	170	4.64
60	1.34	180	5.25
70	1.54	190	6.06
80	1.76	200	6.9
90	2.00	210	7.89
100	2.27	220	9.1
110	2.50	230	10.5
120	2.77	240	12.6



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายและกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นตัวแทนของ B-H curve จะเห็นว่าในช่วงแรงดันไฟฟ้าประมาณ 0 – 150 โวลต์กราฟมีลักษณะเป็นเชิงเส้นเป็นย่านที่แกนแม่เหล็กยังไม่อิ่มตัวสามารถอธิบายได้ด้วย Ampere's law ช่วงแรงดันไฟฟ้าประมาณ 150 – 220 โวลต์กราฟมีลักษณะเริ่มโค้งคือกระแสที่เพิ่มขึ้นไม่ทำให้แรงดันเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นทำให้ไม่สามารถอธิบายด้วย Ampere's law ได้แล้ว เป็นผลมาจากการอิ่มตัวของแกนเหล็ก ช่วงแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์เป็นต้นไปกราฟมีลักษณะมีความชันน้อยมากหรือกระแสที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าน้อยมาก จึงประมาณได้ว่า แรงดันพิกัดของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับเครื่องนี้มีค่าอยู่ที่ 220 โวลต์ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญในการทำการทดสอบอื่นๆต่อไป

#### 4.5 ผลการทดสอบการหาจำนวนรอบขดลวด

ตารางที่ 4.6 ค่าที่ได้จากการวัดแรงดันที่สเตเตอร์,แรงดันที่โรเตอร์,แรงดันที่search coil

<i>V<sub>rms.stator</sub></i>	<i>I<sub>rms.stator</sub></i>	<i>V<sub>rms.search coil</sub></i>	<i>V<sub>line.rotor</sub></i>	<i>V<sub>rms.rotor</sub></i>
20.9	0.5	0.352	16.95	9.768
44.9	1.0	0.737	36.3	20.95
67.35	1.5	1.109	53.53	30.9
88.35	2.0	1.47	70.7	40.81
108.75	2.5	1.82	87	50.23
127.5	3.0	2.14	101	58.31

จาก

$$\frac{E_{af1}}{4.44fN_{ph1}K_{w1}} = \frac{1.5E_{af2}}{4.44fN_{ph2}K_{w2}}$$

ค่าจากตารางที่ 4.6 และจากผลการทดลองที่ 3.2 ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์เท่ากับ 0.96 และค่าสัมประสิทธิ์การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์เท่ากับ 0.967 สามารถคำนวณค่าได้ดังนี้

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณจำนวนรอบต่อเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ของสเตเตอร์และโรเตอร์

Vrms,stator	Irms,stator	Vrms,search coil	Vline,rotor	Vrms,rotor	Nph,stator	Nph,rotor
25.91	0.5	0.352	16.95	9.768	456.82	172.18
54.30	1.0	0.737	36.3	20.95	457.21	176.25
81.44	1.5	1.109	53.53	30.9	455.66	172.88
108.39	2.0	1.47	70.7	40.81	457.54	172.26
134.44	2.5	1.82	87	50.23	458.36	171.24
157.12	3.0	2.14	101	58.31	455.58	169.06

จากสมการในกรณี double layer

$$N_{ph} = 2 \times n \times \frac{P}{2} \times N_c$$

$$\therefore N_{c,stator} = 38 \text{ รอบ}$$

$$\therefore N_{c,rotor} = 22 \text{ รอบ}$$

#### 4.6 การแก้ไขปัญหา

##### 4.6.1 ปัญหาสนามแม่เหล็กหมุนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าสามเฟสที่ไม่สมดุลของโรเตอร์

จากรูปที่ 3.10 - 3.12 แสดงให้เห็นถึงค่าความไม่สมดุลของกระแสบนขดลวดอาร์มาเจอร์ทั้งสามเฟสบนโรเตอร์ จะเห็นว่าค่ากระแสไฟฟ้าเฟสหนึ่งที่มีแอมพลิจูดมากกว่าอีกสองเฟสที่เหลือนี้อาจแสดงถึงการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ไม่เท่ากันเนื่องจากผลการ short turn หรืออาจเกิดจากค่าความต้านทานของแต่ละเฟสบนขดลวดอาร์มาเจอร์บนโรเตอร์ไม่เท่ากัน ซึ่งผลที่ได้ไม่เป็นไปตามทฤษฎีสถนามแม่เหล็กหมุนสามเฟสสมดุลทำให้ไม่สามารถอธิบายลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากโรเตอร์ได้

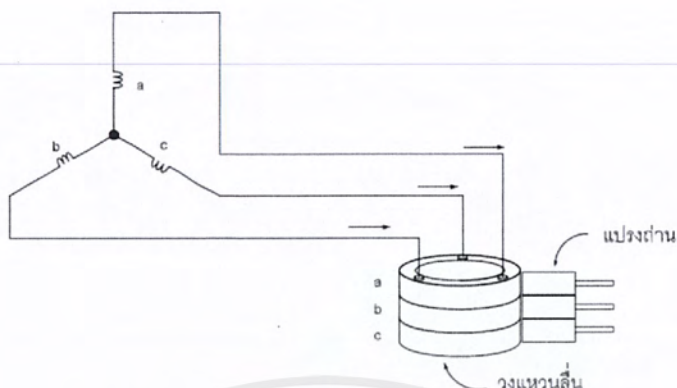
และจะพบว่าเมื่อทดลองจ่ายกระแสไฟฟ้าสามเฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์แอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้ามิเท่ากันและมีความห่างของแต่ละเฟสไม่เป็น 120 องศาทางไฟฟ้าแสดงถึงลักษณะของเฟสไม่สมดุลต่างๆที่แหล่งจ่ายเป็นแหล่งจ่ายแรงดันเฟสสมดุล จึงสันนิษฐานว่าเกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งการที่อิมพีแดนซ์ไม่เท่ากันอาจจะเกิดจากการ short turn ซึ่งยังไม่แน่ชัดจึงได้ทำการทดลองในแนวทางอื่น

#### 4.6.2 ผลการตรวจสอบการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์และผลตรวจสอบความต้านทานของขดลวดแต่ละเฟส



รูปที่ 4.16 การตรวจสอบการพันของขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสของโรเตอร์และนับจำนวนรอบของขดลวดทุกขดลวด

จากการตรวจสอบการพันขดลวดของขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสของโรเตอร์ไม่พบความผิดปกติในเรื่องของการพันขดลวดและจำนวนรอบของการพันเท่ากับ 22 รอบต่อขดเท่ากับทุกขดของทุกเฟส ดังนั้นความสรุปได้ว่าไม่มีความผิดปกติในเรื่องของการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์



รูปที่ 4.17 แสดงจุดเชื่อมต่อจุดต่างๆของมอเตอร์

จากรูปที่ 4.17 จะแสดงจุดเชื่อมต่อที่จุดต่อร่วมสตาร์หรือเรียกว่าจุดนิวทรัล ซึ่งใช้ในการวัดความต้านทานต่อเฟสของขดลวดในแต่ละเฟส ซึ่งจะวัดที่จุดเชื่อมต่อต่างๆได้แก่ ที่ขั้ว ที่วงแหวนลื่น หัวนอต ขั้วปลายสายไฟขดลวด ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.8 ค่าความต้านทานเมื่อวัดที่จุดเชื่อมต่อจุดต่างๆกับจุดต่อร่วมสตาร์

จุดเชื่อมต่อ	ความต้านทานเฟส a	ความต้านทานเฟส b	ความต้านทานเฟส c
ขั้วปลายสายไฟ	2.5Ω	2.5Ω	2.5Ω
วงแหวนลื่น	1.5Ω	1.6Ω	1.6Ω
หัวนอต	1.8Ω	1.8Ω	1.8Ω
ปลายสายทองแดง	1.6Ω	1.66Ω	1.61Ω

จะเห็นว่าการพันขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสบนโรเตอร์เป็นการพันกระจาย 2 slot/pole/phase แบบ Full pitch จำนวน 22 รอบต่อขดซึ่งเท่ากันในทุกๆขดของทุกเฟสและไม่พบสิ่งผิดปกติในกรณีการพันขดลวดที่ผิด และเมื่อวัดความต้านทานในแต่ละเฟสแนวโน้มนำได้ค่าความต้านทานเท่ากันทั้งสามเฟสและไม่พบความผิดปกติของความต้านทานของขดลวดทั้งสามเฟสที่ไม่เท่ากันแต่อย่างใด

#### 4.6.3 ผลการตรวจสอบความต้านทานของจุดต่อในแต่ละชั้นส่วน

ผลการตรวจสอบค่าอิมพีแดนซ์เมื่อวัดที่ขั้วแล้วเปลี่ยนจุดต่อในที่แปรปรวนและวงแหวน ลื่นในแต่ละชั้นส่วนเมื่อจ่ายแรงดันกระแสสลับสามเฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ ในแต่ละเฟส จะจ่ายแรงดันเฟสเท่ากับ 8V

ตารางที่ 4.9 ผลกระแสสามเฟสที่จุดเชื่อมต่อตั้งต้น a-x, b-y, c-z

เฟส	ค่ากระแส(rms)
a	3.2 A
b	3.0 A
c	2.86 A

ตารางที่ 4.10 ผลกระแสสามเฟสที่จุดเชื่อมต่อเมื่อเปลี่ยนจุดเชื่อมต่อที่แปรปรวน(y กับ x) a-y, b-x, c-z

เฟส	ค่ากระแส(rms)
a	3.06 A
b	3.07A
c	2.91 A

ตารางที่ 4.11 ผลกระแสสามเฟสที่จุดเชื่อมต่อเมื่อเปลี่ยนจุดเชื่อมต่อที่แปรปรวน(z กับ x) a-z, b-y, c-x

เฟส	ค่ากระแส(rms)
a	3.01 A
b	3.00A
c	2.89 A

ตารางที่ 4.12 ผลกระแสสามเฟสที่จุดเชื่อมต่อเมื่อเปลี่ยนจุดเชื่อมต่อที่แปรปรวน(z กับ y) a-x, b-z, c-y

เฟส	ค่ากระแส(rms)
a	3.07 A
b	3.17A
c	2.92 A

จากตารางการทดลองที่ 4.9 -4.12 ซึ่งแสดงค่ากระแสสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์ของแต่ละเฟสเมื่อมีการเปลี่ยนจุดต่อในแต่ละแบบ พบว่าค่ากระแสสามเฟสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจุด

ต่อทั้งสามรูปแบบนั้นไม่มีผลต่อค่ากระแสสามเฟส กระแสทั้งสามเฟสยังคงมีกระแสเฟส c ที่ต่ำกว่ากระแสอีกสองเฟสซึ่งขัดแย้งกับผลที่ได้ในหัวข้อ 3.7.1 ที่แสดงผลว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลบนขดลวดอาร์มาเจอร์มีขนาดไม่เท่ากัน ซึ่งยังไม่อาจสรุปผลความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ แต่สามารถสรุปได้ว่าความต้านทานภายในวงจรบนโรเตอร์นั้นไม่ผิดปกติแต่อย่างใด ดังนั้นการที่กระแสสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่ไม่สมดุลนั้น อาจเกิดจากการ short turn กันโดยที่ผลของการ short turn ไม่อาจแสดงออกมาได้ในรูปของความต้านทานที่ไม่เท่ากัน จึงได้ทำการวิเคราะห์และออกแบบการทดลองเพื่อตรวจสอบการ short turn ซึ่งจะแสดงในหัวข้อถัดไป

#### 4.6.4 ผลการตรวจสอบการลัดวงจรของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์

ตารางที่ 4.13 ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของขดลวดค้นหาพันบนสเตเตอร์ จ่ายไฟเข้าที่ขดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ 18V(L-N)

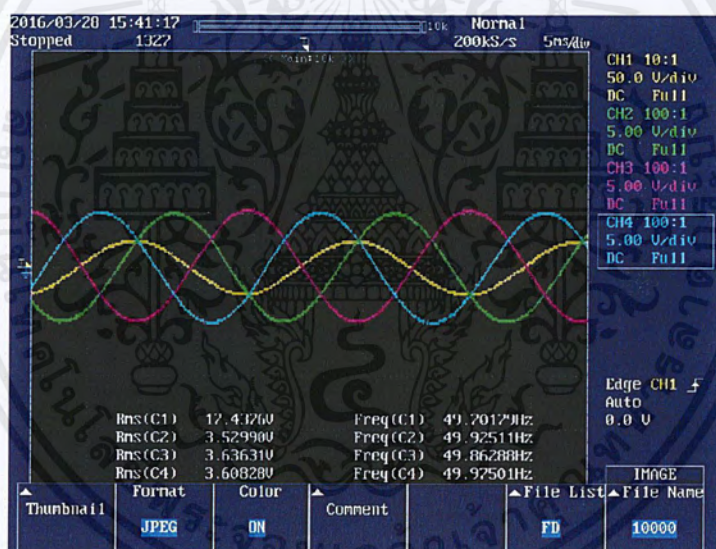
ตำแหน่งมุม	แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ	ตำแหน่งมุม	แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ
0°	540.3 mv	190°	553.2 mv
10°	530.7 mv	200°	492.1 mv
20°	477.6 mv	210°	213.5 mv
30°	528.7 mv	220°	50.7 mv
40°	549.3 mv	230°	87.8 mv
50°	552.5 mv	240°	82.6 mv
60°	512.9 mv	250°	170.8 mv
70°	449.5 mv	260°	289.8 mv
80°	445.5 mv	270°	489.2 mv
90°	478.3 mv	280°	483.5 mv
100°	471.9 mv	290°	286.9 mv
110°	413.5 mv	300°	65.6 mv
120°	430.8 mv	310°	62.8 mv
130°	501.5 mv	320°	60 mv
140°	546.7 mv	330°	115.2 mv
150°	541.9 mv	340°	197.5 mv
160°	514.6 mv	350°	483.5 mv
170°	511.4 mv	360°	540.8 mv
180°	533.4 mv		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

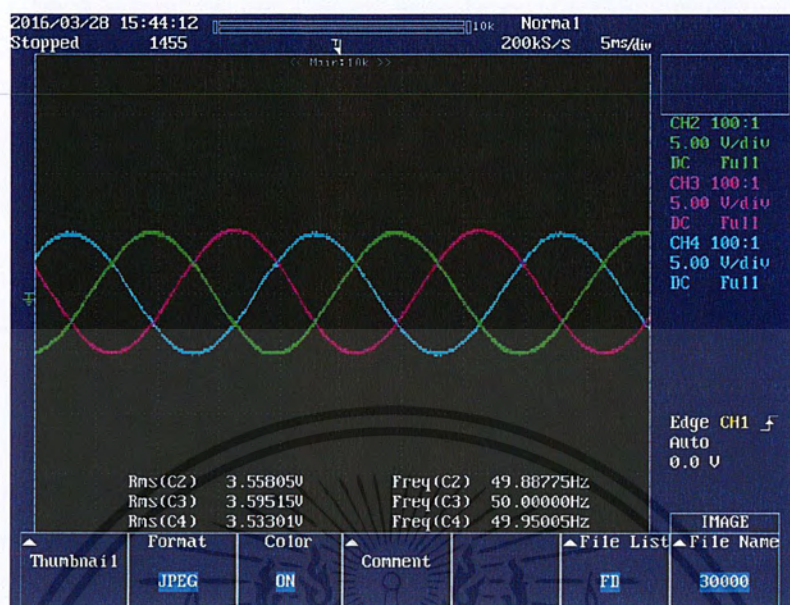
จากตารางผลการตรวจสอบการลัดวงจรของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์ จะสังเกตได้ว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆเส้นรอบวงของของอากาศจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 500 mv ถึง 550 mv แต่ในช่วงที่ตำแหน่งมุมของโรเตอร์หมุนไป  $210^{\circ}$  ถึง  $260^{\circ}$  และ  $290^{\circ}$  ถึง  $340^{\circ}$  จากแกนแม่เหล็กของเฟส  $\phi$  จะเกิดค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ที่ต่ำกว่าปกติ คือมีค่าอยู่ที่ประมาณ 50 mV ถึง 200 mV ซึ่งตำแหน่งเหล่านี้จะเป็นตำแหน่งของขดลวดที่เกิดการลัดวงจรระหว่างขด ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ในส่วนของความเหนี่ยวนำของขดลวดมีค่าลดลงเนื่องจากจำนวนรอบที่ลดลงจากการลัดวงจรระหว่างขดลวด

จากการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่าขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์เกิดการลัดวงจรระหว่างขด ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาให้สนามแม่เหล็กหมุนของโรเตอร์เป็นไปตามทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุน จะต้องทำการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ใหม่

#### 4.6.5 ผลการตรวจสอบกระแสไฟฟ้าสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ที่พันใหม่



รูปที่ 4.18 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ที่พันใหม่ เมื่อจ่ายแรงดันสามเฟส 17V(L-N) ที่สเตเตอร์



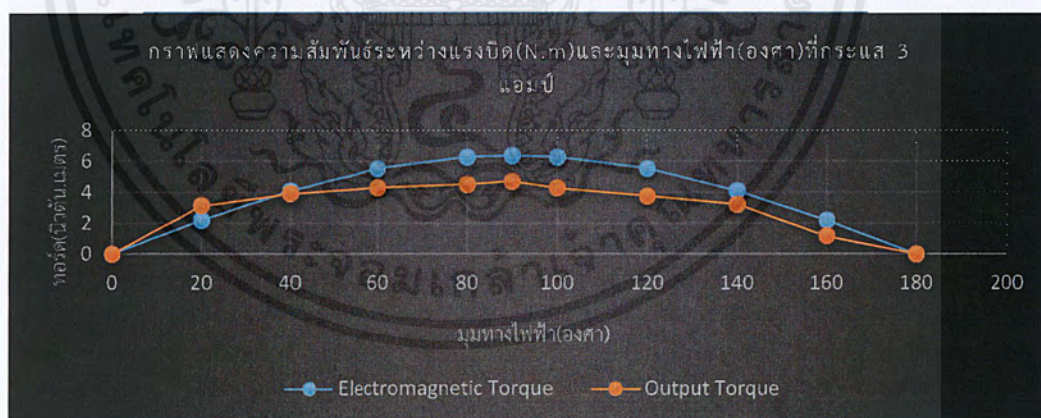
รูปที่ 4.19 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ที่พันใหม่ เมื่อจ่ายแรงดันสามเฟส 17V(L-N) ที่สเตเตอร์ เมื่อหมุนโรเตอร์ไป  $30^{\circ}$  ทางกล

จากผลการตรวจสอบกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ที่พันใหม่ เมื่อจ่ายแรงดันสามเฟส 17V(L-N) ที่สเตเตอร์จากรูปที่ 4.18 พบว่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดบนขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ มีขนาดเท่ากันทั้งสามเฟส ที่ความถี่ 50Hz เท่ากับความถี่ของแหล่งจ่าย (เพลาไม่หมุน) และเมื่อหมุนเพลาของโรเตอร์ไป  $30^{\circ}$  จะพบว่าค่ามมเฟสจะเลื่อนไปประมาณ  $60^{\circ}$  ทางไฟฟ้าตามหลักการของสนามแม่เหล็กหมุน จึงสามารถสรุปได้ว่าขดลวดอาร์มาเจอร์ที่พันใหม่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่เป็นไปตามทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนได้ และสามารถนำไปใช้ในการทดลองเพื่อหาค่าแรงบิดจากสนามแม่เหล็กหมุนตามทฤษฎีได้

#### 4.7 ผลการทดสอบการหาแรงบิดสนามแม่เหล็กและพลังงานร่วมในช่องอากาศ

ตารางที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 3 แอมป์

องศา	I,stator	I,rotor	น้ำหนักร	Output torque	Electromagnetic torque	Coenergy	%Error
0	3	3	0	0	0	8.1373028	0
10	3	3	0.8	3.1392	2.185325425	7.9446427	43.64909
20	3	3	1	3.924	4.107083741	7.3898987	4.4577552
30	3	3	1.1	4.3164	5.533496066	6.5399771	21.995065
40	3	3	1.15	4.5126	6.292526066	5.4973851	28.286352
45	3	3	1.2	4.7088	6.389644817	4.9426284	26.305763
50	3	3	1.09	4.27716	6.292628867	4.3878673	32.029044
60	3	3	0.96	3.76704	5.533792069	3.3452401	31.926607
70	3	3	0.82	3.21768	4.107537247	2.4952525	21.664009
80	3	3	0.3	1.1772	2.185881738	1.9404194	46.145302
90	3	3	0	0	0.000592024	1.747658	0

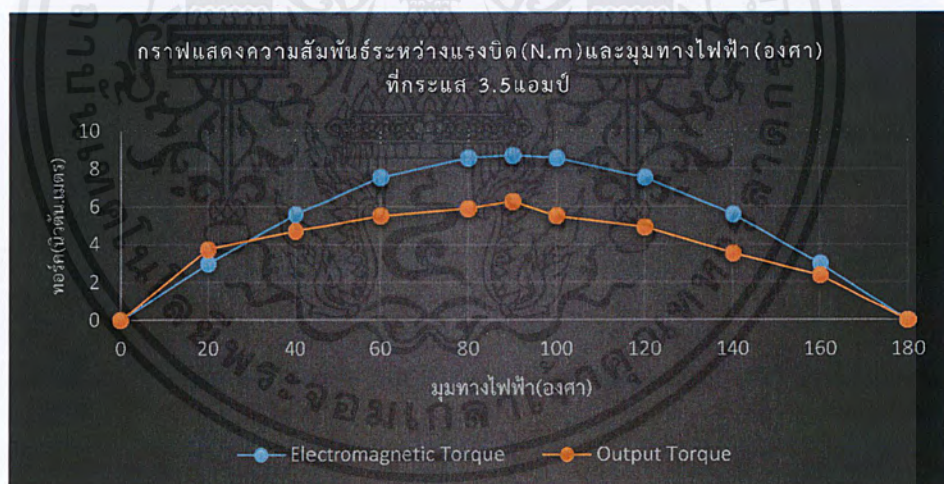


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 3 แอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 3.5แอมป์

องศา	I,stator	I,rotor	น้ำหนัก	Output torque	Electromagnetic torque	Coenergy	%Error
0	3.5	3.5	0	0	0	11.075773	0
10	3.5	3.5	0.95	3.7278	2.9767264	10.813541	25.23153
20	3.5	3.5	1.2	4.7088	5.5944365	10.058473	15.830666
30	3.5	3.5	1.4	5.4936	7.5374145	8.9016355	27.115591
40	3.5	3.5	1.5	5.886	8.5713221	7.4825519	31.329147
45	3.5	3.5	1.6	6.2784	8.7036118	6.7274665	27.86443
50	35.	3.5	1.4	5.4936	8.5714622	5.9723749	35.908251
60	3.5	3.5	1.25	4.905	7.5378177	4.5532435	34.928116
70	3.5	3.5	0.9	3.5316	5.5950543	3.3963159	36.879969
80	3.5	3.5	0.6	2.3544	2.9774841	2.6411264	20.926531
90	3.5	3.5	0	0	0.0008064	2.3787568	0

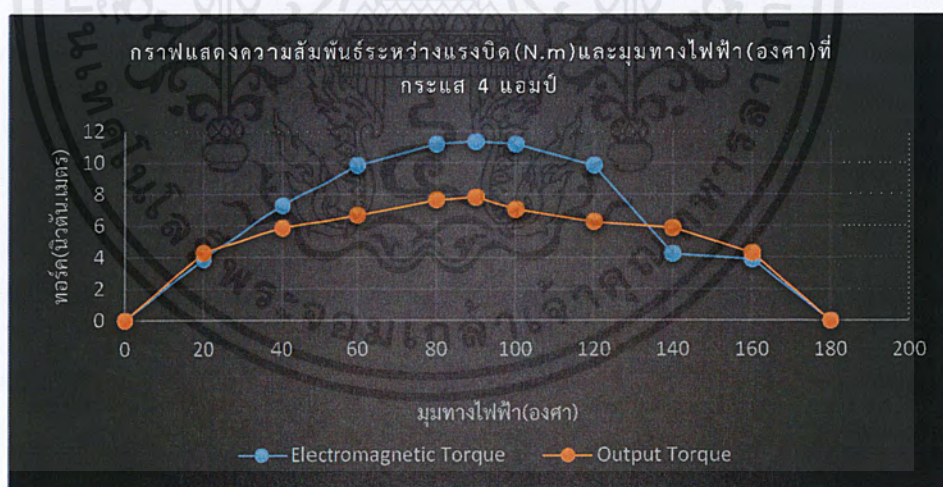


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 3.5แอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(N.m)และมุมองศาทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 4 แอมป์

องศา	I <sub>stator</sub>	I <sub>rotor</sub>	น้ำหนัก	Output torque	Electromagnetic torque	Coenergy	%Error
0	4	4	0	0	0	14.465595	0
10	4	4	1.1	4.3164	3.8879691	14.123099	11.0194
20	4	4	1.5	5.886	7.3070192	13.136921	19.447317
30	4	4	1.7	6.6708	9.8447863	11.626001	32.240276
40	4	4	1.95	7.6518	11.195196	9.7725674	31.651042
45	4	4	2	7.848	11.367983	8.786367	30.964005
50	4	4	1.8	7.0632	11.195379	7.8001585	36.909685
60	4	4	1.6	6.2784	9.8453129	5.9466623	36.229554
70	4	4	1.5	5.886	4.2584019	4.4356247	38.22087
80	4	4	1.1	4.3164	3.8889589	3.4492884	10.99115
90	4	4	0	0	0.0010533	3.1066132	0

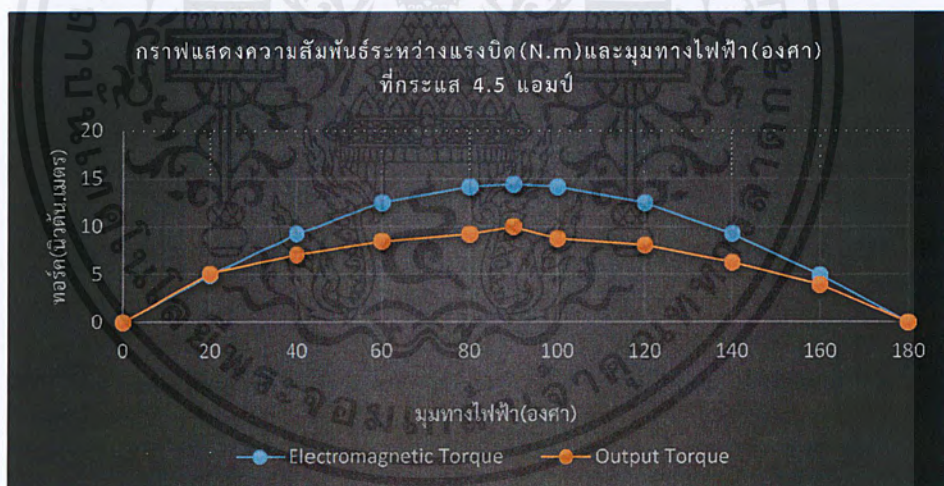


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 4 แอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(N.m)และมุมทางกล(องศา)ที่กระแส 4.5 แอมป์

องศา	I,stator	I,rotor	น้ำหนัก	Output torque	Electromagnetic torque	Coenergy	%Error
0	4.5	4.5	0	0	0	18.308931	0
10	4.5	4.5	1.3	5.1012	4.9207109	17.875446	3.667947
20	4.5	4.5	1.8	7.0632	9.2479461	16.627272	23.624122
30	4.5	4.5	2.15	8.4366	12.459808	14.714948	32.289484
40	4.5	4.5	2.34	9.18216	14.16892	12.369116	35.195062
45	4.5	4.5	2.54	9.96696	14.387603	11.120914	30.725362
50	4.5	4.5	2.23	8.75052	14.169152	9.8727014	38.242457
60	4.5	4.5	2.05	8.0442	12.460474	7.5267903	35.442264
70	4.5	4.5	1.6	6.2784	9.2489673	5.6143181	32.117827
80	4.5	4.5	1	3.924	4.9219636	4.3659436	20.27572
90	4.5	4.5	0	0	0.0013331	3.9322306	0

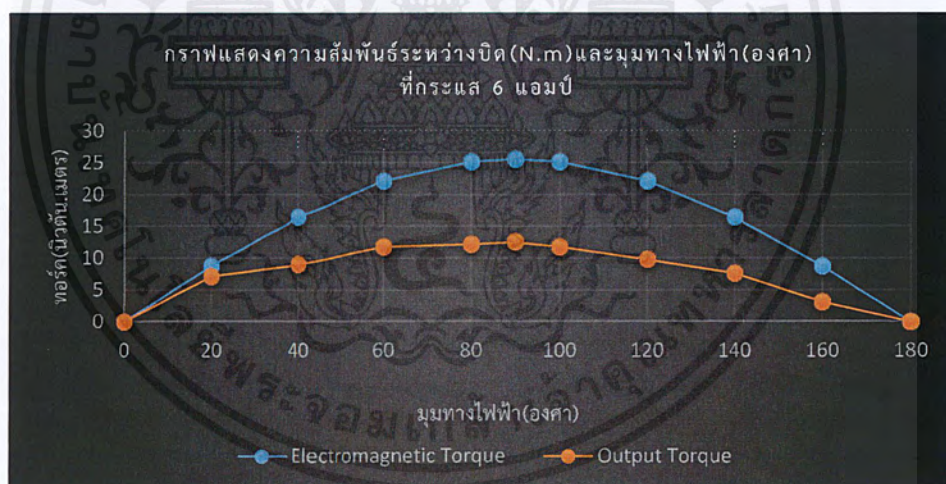


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 4.5 แอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(N.m)และมุมทางกล(องศา)ที่กระแส 6 แอมป์

องศา	I,stator	I,rotor	น้ำหนัก	Output torque	Electromagnetic torque	Coenergy	%Error
0	6	6	0	0	0	32.549211	0
10	6	6	1.825	7.1613	8.7479305	31.778571	18.13721
20	6	6	2.3	9.0252	16.440793	29.559595	45.104838
30	6	6	3	11.772	22.150769	26.159908	46.855119
40	6	6	3.1	12.1644	25.189192	21.98954	51.707859
45	6	6	3.2	12.5568	25.577961	19.770514	50.907737
50	6	6	3	11.772	25.189603	17.551469	53.266433
60	6	6	2.5	9.81	22.151954	13.380961	55.714968
70	6	6	1.95	7.6518	16.442609	9.9810099	53.463588
80	6	6	0.8	3.1392	8.7501574	7.7616776	64.124074
90	6	6	0	0	0.0023699	6.9906322	0

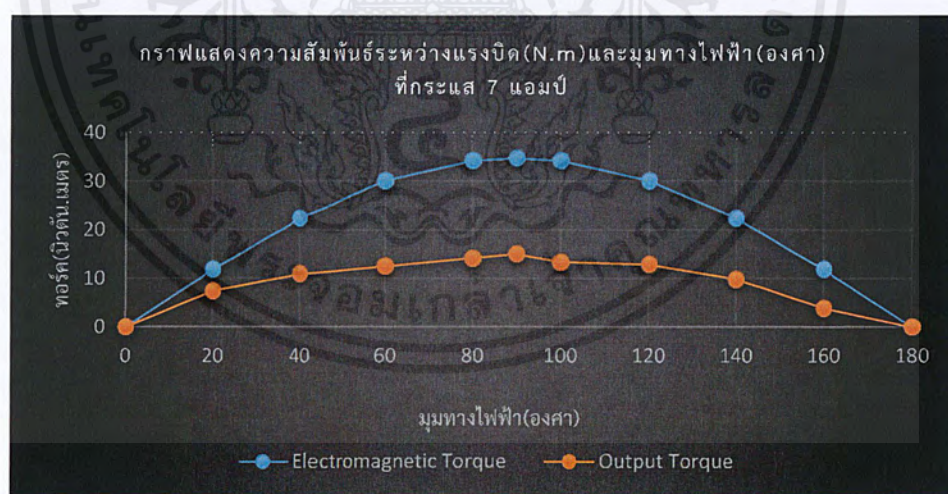


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 6 แอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(N.m)และมุมทางกล(องศา)ที่กระแส 7 แอมป์

องศา	I,stator	I,rotor	น้ำหนัก	Output torque	Electromagnetic torque	Coenergy	%Error
0	7	7	0	0	0	44.303093	0
10	7	7	1.9	7.4556	11.906905	43.254166	37.384234
20	7	7	2.8	10.9872	22.377746	40.233893	50.901222
30	7	7	3.2	12.5568	30.149658	35.606542	58.351766
40	7	7	3.6	14.1264	34.285289	29.930208	58.797488
45	7	7	3.83	15.02892	34.814447	26.909866	56.83137
50	7	7	3.4	13.3416	34.285849	23.8895	61.087152
60	7	7	3.3	12.9492	30.151271	18.212974	57.052557
70	7	7	2.5	9.81	22.380217	13.585263	56.166645
80	7	7	1	3.924	11.909937	10.564506	67.052721
90	7	7	0	0	0.0032257	9.5150271	0

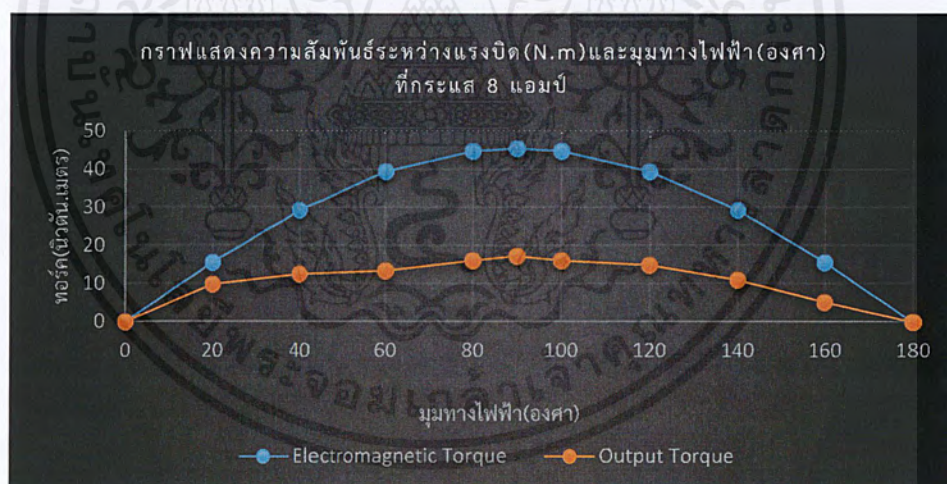


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 7 แอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(N.m)และมุมทางกล(องศา)ที่กระแส 8 แอมป์

องศา	I,sator	I,rotor	น้ำหนัก	Output torque	Electromagnetic torque	Coenergy	%Error
0	8	8	0	0	0	57.865265	0
10	8	8	2.5	9.81	15.551876	56.495237	36.920795
20	8	8	3.2	12.5568	29.228077	52.550391	57.038569
30	8	8	3.4	13.3416	39.379145	46.506504	66.120138
40	8	8	4.1	16.0884	44.780785	39.092516	64.072984
45	8	8	4.4	17.2656	45.471931	35.14758	62.030203
50	8	8	4.1	16.0884	44.781517	31.202612	64.07357
60	8	8	3.8	14.9112	39.381252	23.788374	62.136297
70	8	8	2.8	10.9872	29.231304	17.744018	62.412898
80	8	8	1.3	5.1012	15.555835	13.798538	67.207162
90	8	8	0	0	0.0042131	12.42779	0

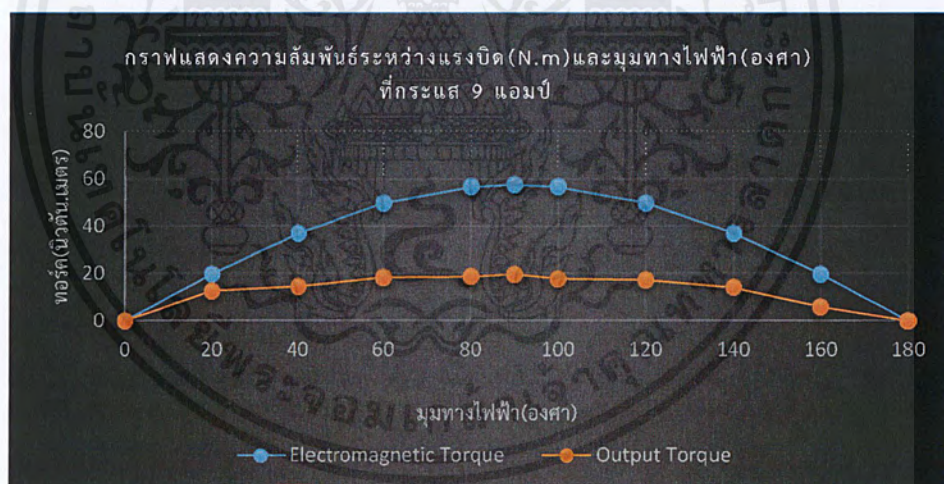


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 8 แอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(N.m)และมุมทางกล(องศา)ที่กระแส 9 แอมป์

องศา	I,stator	I,rotor	น้ำหนัก	Output torque	Electromagnetic torque	Coenergy	%Error
0	9	9	0	0	0	73.29744	0
10	9	9	3.2	12.5568	19.68284365	71.560505	36.20434
20	9	9	3.7	14.5188	36.99178447	66.559185	60.751285
30	9	9	4.68	18.36432	49.83923065	58.896681	63.152882
40	9	9	4.78	18.75672	56.67568102	49.497147	66.905171
45	9	9	5	19.62	57.55041262	44.495715	65.908151
50	9	9	4.52	17.73648	56.67660693	39.494241	68.705819
60	9	9	4.4	17.2656	49.8418967	30.094391	65.359264
70	9	9	3.6	14.1264	36.99586913	22.43129	61.816278
80	9	9	1.5	5.886	19.68785426	17.429169	70.103395
90	9	9	0	0	0.005332252	15.69132	0

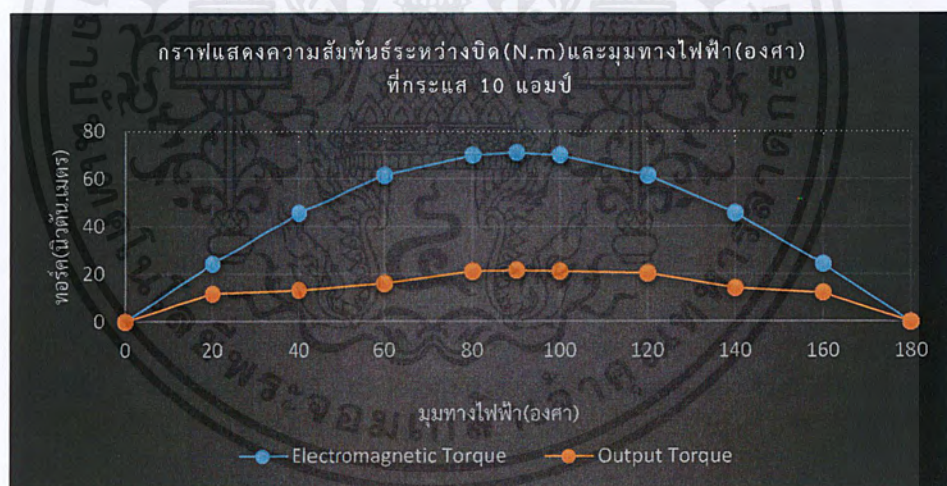


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 9 แอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(N.m)และมุมทางกล(องศา)ที่กระแส 10 แอมป์

องศา	I,stator	I,rotor	น้ำหนัก	Output torque	Electromagnetic torque	Coenergy	%Error
0	10	10	0	0	0	90.414476	0
10	10	10	3	11.772	24.299807	88.273808	51.555171
20	10	10	3.4	13.3416	45.66887	82.109985	70.786227
30	10	10	4.1	16.0884	61.529914	72.666412	73.852718
40	10	10	5.4	21.1896	69.969977	61.082057	69.716154
45	10	10	5.5	21.582	71.049892	54.918094	69.624162
50	10	10	5.4	21.1896	69.971112	48.754081	69.716649
60	10	10	5.2	20.4048	61.533206	37.169335	66.839368
70	10	10	3.6	14.1264	45.673913	27.725028	69.071185
80	10	10	3.1	12.1644	24.305993	21.560215	49.953083
90	10	10	0	0	0.006583	19.418423	0



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(N.m)และมุมทางไฟฟ้า(องศา)ที่กระแส 10 แอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลอง ที่การจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 3 แอมแปร์เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของสเตเตอร์และโรเตอร์และทำการบิดเพลาดังแต่ 0 -180 องศาทางไฟฟ้าดังตารางที่ 4.14 พบว่าค่าแรงบิดในช่องอากาศ(Electromagnetic Torque)ที่ได้จากการคำนวณดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.8 กับค่าแรงบิดที่เพลลา(Output Torque) โดยค่าแรงบิดที่ช่องอากาศจากการคำนวณขึ้นอยู่กับค่าไซน์ของมุมระหว่าง mmf ลัพธ์ของสนามแม่เหล็กจากขดลวดสเตเตอร์และสนามแม่เหล็กจากขดลวดโรเตอร์ซึ่งเป็นมุมทางไฟฟ้าหรือเทียบเท่ากับมุมที่ทำการบิดเพลลาซึ่งเป็นมุมทางกล ค่าที่คำนวณได้จากสมการจึงเป็นลักษณะรูปคลื่นไซน์ และพบว่าค่าแรงบิดที่เพลลา(Output Torque) ที่ได้จากการทดลองก็มีแนวโน้มเป็นรูปไซน์เดียวกัน โดยมีสัดส่วนความแตกต่างกันประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4.20 โดยจะสังเกตเห็นว่าที่ 10 องศาทงกลมีเปอร์เซ็นต์ที่น้อยกว่า 30 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากค่าแรงบิดเริ่มต้นที่มากกว่า

โดยเมื่อทำการทดลองจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ขนาด 3.5 , 4 , 4.5 แอมแปร์ดังตารางที่ 4.15 – 4.17 พบว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือมีสัดส่วนความแตกต่างของค่าแรงบิดที่ช่องอากาศที่ได้จากการคำนวณกับแรงบิดที่เพลลาอยู่ที่ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4.21 – 4.23

และเมื่อทำการทดลองจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ขนาด 6 แอมแปร์ดังตารางที่ 4.18 พบว่ามีมีสัดส่วนความแตกต่างของค่าแรงบิดที่ช่องอากาศที่ได้จากการคำนวณกับแรงบิดที่เพลลาประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ดังรูปที่ 4.24 เนื่องจากการอิมตัวของแกนเหล็กดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.8 และรูปที่ 3.36 เนื่องจากสัดส่วนของกระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนแม่เหล็กไม่ได้เป็นสัดส่วนกันแล้ว ส่งผลให้การคำนวณแรงบิดที่ช่องอากาศไม่เป็นความจริงทำให้ค่าแรงบิดที่ช่องอากาศที่ได้จากการคำนวณกับแรงบิดที่เพลลาที่ได้จากการวัดมีสัดส่วนความห่างมากขึ้น

ทำการทดลองแบบเดียวกันกับกระแสไฟฟ้าขนาด 7 แอมแปร์ดังตารางที่ พบว่ามีมีสัดส่วนความแตกต่างของค่าแรงบิดที่ช่องอากาศที่ได้จากการคำนวณกับแรงบิดที่เพลลาประมาณ 58 เปอร์เซ็นต์ดังรูปที่ 4.25 เนื่องจากการอิมตัวของแกนเหล็กดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.8 และรูปที่ 3.36 แสดงถึงการที่กระแสเพิ่มขึ้นแต่ไม่ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กไม่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การคำนวณแรงบิดที่ช่องอากาศไม่เป็นความจริง ทำให้ค่าแรงบิดที่ช่องอากาศที่ได้จากการคำนวณกับแรงบิดที่เพลลาที่ได้จากการวัดมีสัดส่วนความห่างมากขึ้นกว่ากรณี 6 แอมแปร์

ทำการทดลองแบบเดียวกันกับกระแสไฟฟ้าขนาด 8 , 9 , 10 แอมแปร์พบว่า สัดส่วนความแตกต่างมีค่าอยู่ที่ 62 , 66 ,70 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.20 - 4.22 ซึ่งเป็นจริงตามทฤษฎีการอิมตัวของแกนเหล็ก

ผลสรุปที่ได้สามารถสรุปเรื่องแรงบิดจากสนามแม่เหล็กเกิดจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กจริงเห็นได้จากในย่านอิมตัวของแกนเหล็กแรงบิดจะเพิ่มขึ้นน้อยและสามารถพิสูจน์เรื่องพลังงานร่วมในช่องอากาศ (Co-energy) ได้เนื่องจากสมการสมการที่ใช้ในการคำนวณแรงบิดในช่องอากาศ (Electromagnetic Torque) เป็นผลของการหาอนุพันธ์ของสมการของพลังงานร่วมในช่องอากาศ (Co-energy) จะเห็นว่าสมการแรงบิดในช่องอากาศสามารถอธิบายแรงบิดได้จริงแต่ต้องอยู่ในย่านแกนเหล็กไม่อิมตัว ดังนั้นสมการหาพลังงานร่วมในช่องอากาศด้วยสมการจึงเป็นจริงในย่านแกนเหล็กไม่อิมตัว

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

##### 5.1.1 การทดลองการหาโครงสร้างหลักและจำนวนขั้วแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าทดสอบ

มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบเป็นอินดักชันมอเตอร์สามเฟสชนิด wound rotor จำนวนขั้วแม่เหล็ก 4 ขั้ว และมีความยาวของแกนเหล็ก 8.05 เซนติเมตร ระยะความกว้างของช่องอากาศ 0.12 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ 14.97 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของสเตเตอร์ 15.15 เซนติเมตร ที่สเตเตอร์มี 36 สล็อต ที่โรเตอร์ มี 24 สล็อต โดยวิธีการทดลองเพื่อหาจำนวนขั้วแม่เหล็กสามารถนำไปใช้ได้จริงและผลการทดลองเป็นจริงตามทฤษฎี ซึ่งจำนวนขั้วแม่เหล็กเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลองอื่นๆต่อไป

##### 5.1.2 การหาตำแหน่งของขดลวดอาร์มาเจอร์และรูปแบบของการพันขดลวดอาร์มาเจอร์

การทำกรทดลองเกี่ยวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าสิ่งที่จะต้องทำอย่างหนึ่งที่ควรทราบคือ ลักษณะการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ทั้งบนสเตเตอร์หรือบนโรเตอร์ในกรณีเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบ wound rotor ซึ่งการทดลองนี้จะสามารถวิเคราะห์โครงสร้างเหล่านี้ได้ จากการศึกษาขั้นพื้นฐานพบว่าขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสของสเตเตอร์เป็นการพันกระจาย 3 สล็อต/ขั้ว/เฟส และผลจากการทดลองนี้เป็นไปตามทฤษฎีเกี่ยวกับปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กทำให้สามารถบอกตำแหน่งของขดลวดอาร์มาเจอร์ของสเตเตอร์ในแต่ละเฟสได้ ซึ่งผลที่ได้พบว่าเป็นการพันแบบ full pitch winding ตัวประกอบการกระจายเท่ากับ 0.96 ตัวประกอบระยะขดลวดเท่ากับ 1 สัมประสิทธิ์การพันขดลวดอาร์มาเจอร์เท่ากับ 0.96 ซึ่งผลที่ได้ต่อมาคือสามารถบอกตำแหน่งของแกนแม่เหล็กของแต่ละเฟสได้อย่างแม่นยำและเป็นข้อมูลที่จำเป็นต้องทราบเพื่อการทดลองอื่นๆ

##### 5.1.3 การทดลองการศึกษาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน

การทดลองเรื่องแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยวิธีขดลวดค้นหา(search coil) สามารถบอกคุณลักษณะของสนามแม่เหล็กทั้งในกรณีที่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสและ กรณีไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส โดยที่เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสจะเกิดสนามแม่เหล็กหมุน (rotating magnetic field) โดยแสดงออกมาในลักษณะของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่มีขนาดคงที่เท่ากันในทุกๆมุมมองศาทางกล แต่มีมุมต่างเฟสที่สัมพันธ์กับตำแหน่งขดลวดค้นหา เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์เฟสใดเฟสหนึ่งผลที่ได้คือจะเกิดสนามแม่เหล็กที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาในแนวแกนแม่เหล็กของเฟสนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.1.4 การทดลองย่านการอิมิตัวของแกนเหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

การทดลองนี้เป็นการทดลองพื้นฐานเพื่อหาจุดอิมิตัวของแกนเหล็ก เพื่อเป็นพื้นฐานในการทดลองอื่นๆเพื่อไม่ให้ทำการทดลองในย่านที่แกนเหล็กไม่อิมิตัว ซึ่งจะส่งผลให้ผลการทดลองไม่สอดคล้องกับทฤษฎีซึ่งจะกล่าวต่อไปในการทดลองอื่นๆ ซึ่งการทดลองจะแสดงกราฟในลักษณะของ V-I curve และผลที่ได้คือ แกนเหล็กจะอิมิตัวที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 220 V

#### 5.1.5 การทดลองหาจำนวนรอบของขดลวด

การทดลองเพื่อหาจำนวนรอบของขดลวดอาร์มาเจอร์ของสเตเตอร์และของโรเตอร์ ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์พื้นฐานที่ควรทราบ จึงได้ออกแบบการทดลองและได้ผลการทดลองเป็นค่าเฉลี่ยของค่าจำนวนรอบของขดลวดอาร์มาเจอร์ของสเตเตอร์ต่อเฟสเท่ากับ 456 รอบต่อเฟส จำนวนรอบต่อขดเท่ากับ 38 รอบต่อขด และจำนวนรอบต่อเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ 176 รอบต่อเฟส จำนวนรอบต่อขดเท่ากับ 22 รอบต่อขด โดยผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจริงพบว่ามีความใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าจำนวนรอบจริงของโรเตอร์ทราบได้จากการพบปัญหาเกี่ยวกับการไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าสามเฟสที่โรเตอร์ซึ่งจะกล่าวต่อไปในเรื่องการพบปัญหาของโครงการ

#### 5.1.6 การทดลองแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กและพลังงานร่วม

แรงบิดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสนั้นเกิดจากผลของสนามแม่เหล็กหมุนสองชุดคือสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากกระแสของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์และสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากกระแสเหนี่ยวนำบนตัวนำของโรเตอร์ ซึ่งค่าแรงบิดจะขึ้นอยู่กับขนาดของสนามแม่เหล็กหมุนทั้งสองชุด โดยที่ขนาดของแรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันไซน์กับมุมระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนทั้งสอง จากฟังก์ชันไซน์เมื่อมีขนาดมุมเท่ากับ 90 องศาจะทำให้ได้แรงบิดสูงสุด ซึ่งทางผู้ทดลองได้ทำการทดลองหาแรงบิดที่เพลลาเพื่อเปรียบเทียบกับแรงบิดในช่องอากาศที่คำนวณได้ ผลที่ได้คือมีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกัน โดยมีค่าความต่างกันเนื่องจากความสูญเสียต่างๆประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อทดลองจ่ายกระแสในย่านแกนเหล็กอิมิตัวผลที่ได้คือมีความต่างกันมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อเพิ่มปริมาณกระแส จากทฤษฎีเกี่ยวกับสมการการคำนวณแรงบิดในช่องอากาศ(Electromagnetic Torque) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของสมการพลังงานร่วม(Co-energy) จึงสามารถสรุปยืนยันค่าพลังงานร่วมได้ว่าเป็นจริงในย่านแกนเหล็กไม่อิมิตัว จากผลการทดลองที่กล่าวมาจึงสรุปได้ว่าการใช้งานเครื่องจักรกลไฟฟ้าในลักษณะมอเตอร์ไม่ควรจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าจนถึงในย่านแกนเหล็กอิมิตัว ซึ่งจะไม่ทำให้แรงบิดเพิ่มขึ้นเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน

## 5.2 ปัญหาของโครงการและแนวทางแก้ไขปัญหา

### 5.2.1 ปัญหาของโครงการ

ในการทดลองพบความผิดปกติของกระแสไฟฟ้าสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ที่มีค่าขนาดกระแสไฟฟ้าไม่เท่ากันทั้งสามเฟสและทำให้เกิดขนาดของสนามแม่เหล็กหมุนที่มาจากโรเตอร์ไม่เป็นไปตามทฤษฎีสถนามแม่เหล็กหมุนซึ่งเกิดจากการที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์เกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำสามเฟสที่ไม่เท่ากันทั้งสามเฟสทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นไม่เท่ากันทั้งสามเฟส

### 5.2.2 แนวทางแก้ไขปัญหา

ดำเนินการพันขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสของโรเตอร์ใหม่ โดยจะพันจำนวนรอบของขดลวด 22 รอบต่อขดลวดพันกระจาย 2 สล็อต/ขั้ว/เฟส แล้วทดลองวัดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนขดลวดของโรเตอร์ที่พันใหม่ สามารถแก้ไขปัญหาค่าขนาดของกระแสไฟฟ้าสามเฟสเท่ากันและมุมต่างเฟสเท่ากับ 120 องศาทางไฟฟ้าตามรูปแบบกระแสสามเฟสสมดุล

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการคำนวณค่าแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กจะต้องคำนวณจากค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าของขดลวดอาร์มาเจอร์ของสเตเตอร์และกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ซึ่งแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะถือว่าไม่ใช่แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่คร่อมช่องอากาศทั้งหมดแต่จะมีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำบางส่วนที่คร่อมในส่วนของแกนเหล็กอยู่ ดังนั้นค่าแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กจะต้องมีค่าต่ำกว่าค่าแรงบิดที่คำนวณได้อยู่เล็กน้อย และในการคำนวณจะละเลยแรงเคลื่อนแม่เหล็กในส่วนที่คร่อมแกนเหล็กโดยจะถือว่าค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ของแกนเหล็กนั้นมีค่าสูงกว่าความซึมซาบของอากาศสูงมาก

## เอกสารอ้างอิง

- [1] พิชิต ล้ายอง, เครื่องจักรกลไฟฟ้า, ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, สนพ. มิน เซอร์วิส ซัพพลาย, 2553
- [2] มนตรี เงามเดช, “Electromagnetic Induction” [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://montri.rmutl.ac.th/old/ee/04210210machine/1\\_Magnetic%20Circuit.pdf](http://montri.rmutl.ac.th/old/ee/04210210machine/1_Magnetic%20Circuit.pdf)
- [3] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, **Electric Machinery**, 6<sup>st</sup> Ed., New Delhi, Tata McGraw-Hill, 2002





ภาคผนวก ก

ตารางขนาดลวดทองแดงมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางขนาดลวดทองแดงมาตรฐาน

เบอร์ลวดทองแดง มาตรฐาน S.W.G	เส้นผ่านศูนย์กลาง	พื้นที่หน้าตัด	ทนกระแสได้ ( A )
	(Diameter) mm	(Area) mm <sup>2</sup>	
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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
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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

## สัญลักษณ์

B	คือ	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Weber / m <sup>2</sup> , Tesla)
H	คือ	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (A-Turn / m)
N	คือ	จำนวนรอบ (Turns)
$\mu_0$	คือ	ความซึมซาบของ
$\mu_r$	คือ	ความซึมซาบสัมพัทธ์ (Weber / A-Turn.m <sup>2</sup> )
$\varphi_p$	คือ	ฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็ก (Weber / m <sup>2</sup> )
l	คือ	ความยาวเฉลี่ย (m)
A	คือ	พื้นที่เฉลี่ย (m <sup>2</sup> )
$\mathcal{R}$	คือ	ความต้านทานแม่เหล็ก (A-Turn / Weber)
$\lambda$	คือ	เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (Weber.A)
L	คือ	ความเหนี่ยวนำ (Henry)
I	คือ	กระแสไฟฟ้า (Ampere)
V	คือ	แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย (Volt)
R	คือ	ความต้านทานไฟฟ้า (ohm)
e	คือ	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Volt)
$\theta$	คือ	ตำแหน่งเชิงมุม (radian)
$\omega$	คือ	ความเร็วเชิงมุม (radian / sec )
t	คือ	เวลา ( sec )
f	คือ	ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Hz)
T	คือ	แรงบิด ( N.m )
$W_{fld}$	คือ	พลังงาน (Joule)

$W_{fld}$	คือ	พลังงาน (Joule)
$P$	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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

## ROTATING MAGNETIC FIELD OF THREE-PHASE INDUCTION MOTOR

เรื่องกิตติ ปัญญาพงศธร<sup>1</sup> วัชรภูมิ ทรัพย์ประเสริฐ<sup>2</sup> และ วิทยา พ่วงเจริญ<sup>3</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925

### บทคัดย่อ

ปัญญานិพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยจะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดดาวค์โรเตอร์เป็นกรณีศึกษา เนื่องจากสามารถศึกษาลักษณะสนามแม่เหล็กหมุนต่าง ๆ ได้ทั้งที่สเตเตอร์และโรเตอร์ ในขั้นต้นจำเป็นต้องศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบดาวค์โรเตอร์ที่ใช้ทำการศึกษา เช่น ลักษณะการพันขดลวด ตำแหน่งแกนของขดลวดในแต่ละเฟส ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด เป็นต้น หลังจากนั้นจะทำการวิเคราะห์การเกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุนในสเตเตอร์ โรเตอร์และช่องว่างอากาศ โดยการใส่ขดลวดค้นหา (search coil) มาวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ สดท้ายแล้วทำการศึกษาค่าพลังงานร่วมในช่องว่างอากาศและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงภาระทางกล เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็ก แรงเคลื่อนแม่เหล็ก พลังงานร่วมและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ผลที่ได้จากโครงการนี้จะนำเสนอการแสดงผลของสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสอย่างง่ายและชัดเจน เพื่อประโยชน์ทางการศึกษาและการวิจัยออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าต่อไป

**คำสำคัญ:** สนามแม่เหล็กหมุน, เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, แรงบิดทางแม่เหล็ก, แรงเคลื่อนแม่เหล็ก, พลังงานร่วมในช่องอากาศ

### Abstract

This thesis presents a study of rotating magnetic field in three-phase induction motor. Wound rotor induction motor is selected in this case since rotating magnetic field at stator and rotor can easily be studied. First of all, it is necessary to obtain the structure and characteristics of this selected induction motor such as armature winding, stator winding axis in each phase, maximum magnetic field density, etc. After that, magneto-motive force and rotating magnetic field at stator, rotor, and air gap are analyzed using search coil for measuring induced electromotive force at each tested position. Lastly, co-energy in air-gap and electromagnetic torque in the induction motor are studied by varying the mechanical load for finding the relationship

between its magnetic field, magneto-motive force, co-energy and electromagnetic torque. The final results of this project propose the simple and explicit demonstration of rotating magnetic field in the three-phase induction motor for educational benefit and further electrical machine research.

**Keywords:** Rotating Magnetic Field, Induction Machine, Electromagnetic torque, Magneto-motive force, Air-gap Co-energy

### 1. บทนำ

เนื่องจากการศึกษาเพื่อการเรียนรู้ในทางปฏิบัติยังไม่เคยเกิดขึ้นเกี่ยวกับการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กหมุนหรือวัดค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) ของสนามแม่เหล็กหมุน ที่คร่อมที่ช่องอากาศ, ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นแกนเหล็กในวงจรแม่เหล็ก, ค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็ก ( $\Phi_p$ ), ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด ( $B_m$ ) ทั้งในย่านเชิงเส้นและในช่วงที่ทำให้เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็ก โดยจะศึกษาในรูปแบบของ พลังงานร่วมและแรงบิดในช่องอากาศ เพื่อพิสูจน์ว่าแรงบิดในช่องอากาศเกิดจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศจริง โดยสามารถเปรียบเทียบแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กกับแรงบิดที่เพลาทังขั้วแกนเหล็กไม่มีอิมตัวและในขั้วแกนเหล็กอิมตัว โครงการงานจึงนี้มีความคิดที่จะศึกษาสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อเป็นประโยชน์ในการศึกษาเชิงวิชาการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีของสนามแม่เหล็กหมุน

### 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วงจรแม่เหล็ก

วงจรแม่เหล็กเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเป็นตัวกลางในการผ่านของสนามแม่เหล็ก ในวงจรแม่เหล็กนั้นมีความต้านทางทางแม่เหล็กเช่นเดียวกับความต้านทานทางไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า จึงทำให้เกิดความสูญเสียที่แกนเหล็ก นอกจากนี้วงจรแม่เหล็กยังประกอบไปด้วยช่องอากาศ ซึ่งเป็นที่สะสมพลังงานที่อยู่ในรูปสนามแม่เหล็กซึ่งมีความต้านทานทางแม่เหล็กเช่นกัน

#### 2.2 สารแม่เหล็ก (Magnetic Material)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารแม่เหล็กเป็นสารที่ใช้ในการนำมาสร้างวงจรแม่เหล็ก โดยแต่ละชนิดจะมีค่าความซึมซาบทางแม่เหล็ก (Permeability) สารที่ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กสูงเมื่อเทียบกับอากาศจะมีค่าความต้านทานทางแม่เหล็กต่ำเหมาะแก่การนำมาสร้างเป็นวงจรแม่เหล็ก โดยค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กจะแปรผันอยู่กับค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ (Relative permeability)

$$\mu = \mu_0 \mu_r \tag{2.1}$$

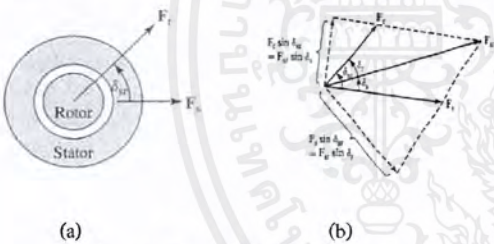
เมื่อ  $\lambda$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้อง (Flux Linkage)

### 2.3 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance)

เมื่อมีการกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวด ที่มีจำนวนรอบ  $N$  รอบ ซึ่งจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi(t)$  ดังนั้น จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด ของขดลวดจำนวนรอบ  $N\phi(t)$  รอบ จากกฎของ Faraday's law สรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้น (Induced voltage) ในแต่ละรอบของขดลวด ซึ่งขดลวดจำนวนรอบ  $N$  รอบ ก็คือ

$$e(t) = v(t) = N \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \tag{2.2}$$

### 2.3 แรงบิด(Torque)และพลังงานที่ส่งผ่าน(Co-energy)



(a) เครื่องจักรกลไฟฟ้าสองขั้วอย่างง่าย  
(b) เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

(a) องค์ประกอบของแบบจำลอง

(b) เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

$W'_{fld}$  = (average co-energy density) (volume of air gap)

$$T = \frac{\partial W'_{fld}}{\partial \delta_{sr}} = -\left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{\mu_0 \pi D l}{2g}\right) F_s F_r \sin \delta_{sr} \tag{2.3}$$

## 3. การออกแบบการทดลอง

### 3.1 การหาโครงสร้างและข้อมูลพื้นฐานของเครื่องจักรกล

#### ไฟฟ้า

การหาโครงสร้างโดยทั่วไปเช่น ขนาดของช่องว่างอากาศ , ขนาดของชิ้นส่วนต่างๆที่ต้องใช้ในการคำนวณ สามารถหาได้โดยเครื่องมือพื้นฐานทั่วไป แต่จำนวนหรือตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กจำเป็นต้องใช้หลักการทางทฤษฎีและนำมาทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้

### 3.2 การตำแหน่งของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์

รูปแบบการพันขดลวดอาร์มาเจอร์เป็นสิ่งที่จะต้องทราบเพื่อใช้ในการทดลองที่เกี่ยวข้องอื่นๆ เช่นการหาสัมประสิทธิ์การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ ตำแหน่งแกนแม่เหล็กที่แท้จริง ซึ่งการหารูปแบบการพันขดลวดอาร์มาเจอร่นั้นสามารถใช้ทฤษฎีในการวิเคราะห์ได้โดยการใช้ขดลวดค้นหาช่วยในการวิเคราะห์ซึ่งเป็นวิธีที่มีประโยชน์และสะดวก

### 3.3 การศึกษาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและ

#### สนามแม่เหล็กหมุน

การจะทำการทดลองเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กหมุน ในเครื่องจักรกลจำเป็นต้องทราบคุณลักษณะและพิสูจน์ได้ว่าสนามแม่เหล็กหมุนมีลักษณะที่เป็นไปตามทฤษฎี โดยการใช้วิธีการใส่ขดลวดค้นหาเพื่อวิเคราะห์แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในช่องอากาศ โดยทดลองทั้งการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส และไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส

### 3.4 การศึกษาย่านการอิมตัวของแกนเหล็กในเครื่องจักรกล

#### ไฟฟ้า

การทดลองนี้จะสามารถระบุย่านการอิมตัวของแกนเหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับได้ โดยศึกษาในรูปของกราฟคุณลักษณะความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กและความเข้มสนามแม่เหล็ก หรือกราฟแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ซึ่งผลที่ตามมาสามารถระบุแรงดันไฟฟ้าพิกัดของเครื่องจักรกลนี้ได้

### 3.5 การหาแรงบิดสนามแม่เหล็กและพลังงานร่วมในช่อง

#### อากาศ

การทดลองนี้เพื่อพิสูจน์ว่าแรงบิดในช่องอากาศเกิดจากสนามแม่เหล็กในช่องอากาศจริง โดยจะเปรียบเทียบกับแรงบิดที่เพลาคือดูผลต่างที่เกิดขึ้นจากการสูญเสียต่างๆ และทดลองจ่ายกระแสไฟฟ้าในย่านแกนเหล็กอิมตัวและแกนเหล็กไม่อิมตัวเพื่อดูผลของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ไม่เพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ในย่านแกนเหล็กอิมตัวเพื่อวิเคราะห์ผลและเปรียบเทียบแรงบิดทั้งสองค่าว่าเป็นไปตามทฤษฎี เมื่อสามารถพิสูจน์ได้แล้วว่าแรงบิดในช่องอากาศเกิดจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กจริง ผลที่ตามมาคือสามารถสรุปเรื่องพลังงานร่วมในช่องอากาศได้เนื่องจากสมการการคำนวณแรงบิดสนามแม่เหล็กและพลังงานร่วมในช่องอากาศสัมพันธ์กันทางคณิตศาสตร์

## 4. ผลการทดลอง

### 4.1 การเลือกอุปกรณ์ในระบบ

จำนวนขั้วแม่เหล็ก	4 pole	l (length) = 8.05cm
ความถี่	50 Hz	inner diameter stator = 15.15 cm
แรงดัน	220 V	diameter rotor = 14.97 cm
กระแส	3 A	radius of gap = 7.495 cm
ความเร็ว	1450 rpm	

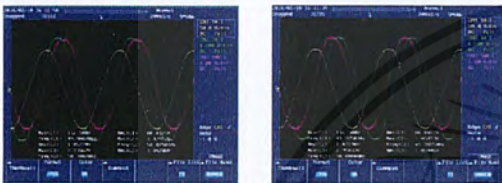
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2 การตำแหน่งของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์



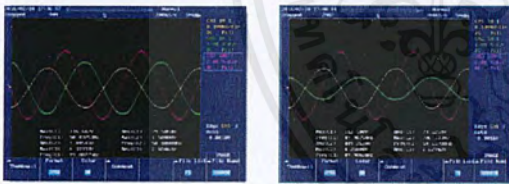
รูปที่ 2 เครื่องจักรกลไฟฟ้าสองขั้วอย่างง่าย

### 4.3 การศึกษาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน



(a) (b)

รูปที่ 3 (a) แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของขดลวดค้นหาเมื่อจ่ายแรงดันสามเฟส 80 v เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ เมื่อขดลวดค้นหาอยู่ที่ 30 องศาทางกล  
 (b) แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของขดลวดค้นหาเมื่อจ่ายแรงดันสามเฟส 80 v เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ เมื่อขดลวดค้นหาอยู่ที่ 60 องศาทางกล



(a) (b)

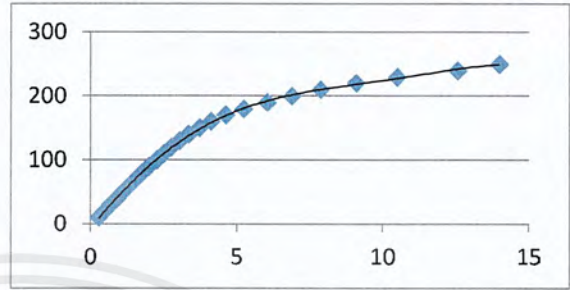
รูปที่ 4 (a) แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของขดลวดค้นหาเมื่อจ่ายแรงดันหนึ่งเฟส 80 v เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ เมื่อขดลวดค้นหาอยู่ที่ 0 องศาทางกล  
 (b) แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของขดลวดค้นหาเมื่อจ่ายแรงดันหนึ่งเฟส 80 v เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ เมื่อขดลวดค้นหาอยู่ที่ 60 องศาทางกล

ผลการทดลองจากรูปที่ 4 (a) และรูปที่ 4 (b) แสดงแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของขดลวดค้นหาที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนจากกระแสไฟฟ้าสามเฟสของขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสจะสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่มีขนาดคงที่ทุกตำแหน่งและหมุนด้วยความเร็วเชิงโคจร

ผลการทดลองจากรูปที่ 5 (a) และรูปที่ 5 (d) แสดงแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามเวลาอยู่ในแนวแกน

แม่เหล็กของขดลวดหนึ่งในสามเฟสเกิดที่จากกระแสไฟฟ้าหนึ่งเฟส ป้อนเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์หนึ่งในสามเฟส

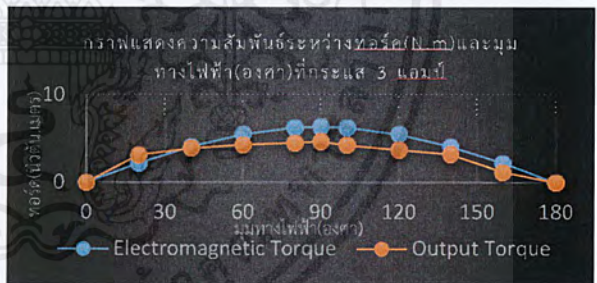
### 4.4 การศึกษาย่านการอิ่มตัวของแกนเหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า



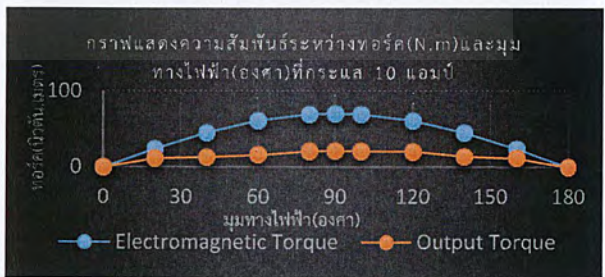
รูปที่ 5 V-I curve แสดงย่านการอิ่มตัวของแกนเหล็ก

จากรูปที่ 6 พบว่าช่วงกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 0-5 A มีลักษณะเป็นเชิงเส้นซึ่งอยู่ในช่วงแกนเหล็กไม่อิ่มตัวและกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 6 A ขึ้นไปเส้นกราฟมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งอยู่ในช่วงแกนเหล็กอิ่มตัว จากเส้นกราฟสามารถบ่งบอกถึงแรงดันพิกัดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเครื่องนี้ได้คือ 220 V(L-N)

### 4.5 การหาแรงบิดสนามแม่เหล็กและพลังงานร่วมในช่องอากาศ



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ก(N.m)และมุมทางไฟฟ้า (องศา)ที่กระแส 3 แอมแปร์



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ก(N.m)และมุมทางไฟฟ้า (องศา)ที่กระแส 10 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าในย่านแกนเหล็ก ไม่อ้อมตัวแรงบิดทางแม่เหล็กและแรงบิดที่เพลามีสัดส่วนความต่างเท่ากับ อยู่ที่ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทดลองจ่ายกระแสไฟฟ้าในย่าน แกนเหล็กอ้อมตัว แรงบิดทางแม่เหล็กและแรงบิดที่เพลามีสัดส่วนที่ มากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ สามารถบ่งบอกได้ว่าแรงบิดทางแม่เหล็กเกิดจาก แรงเคลื่อนแม่เหล็กจริง เพราะว่าเมื่อแกนเหล็กอยู่ในย่านอ้อมตัวแล้ว ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นน้อยมากและไม่เป็นสัดส่วนเช่นเดียวกับ ในย่านแกนเหล็กไม่อ้อมตัวสัดส่วนความแตกต่างระหว่างแรงบิดทั้งสอง จึงมีค่าเพิ่มขึ้น และผลการทดลองยังสามารถสรุปค่าพลังงานในช่อง อากาศได้เนื่องจากสมการที่สัมพันธ์กันระหว่างแรงบิดทางแม่เหล็กและ พลังงานในช่องอากาศ จึงสรุปได้ว่าพลังงานร่วมในช่องอากาศที่คำนวณ ได้เป็นจริงในย่านแกนเหล็กไม่อ้อมตัว

**5. สรุป**

- ได้โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ได้แก่โครงสร้างสเคตเตอร์และโรเตอร์ ได้แก่ จำนวนสล๊อต, วิธีการพันขดลวดอาร์มาเจอร์, จำนวนสล๊อต/ ขั้ว/เฟส,จำนวนรอบของขดลวด รวมไปถึงจำนวนขั้วของเครื่องจักรกล ไฟฟ้า
- ลักษณะของสนามแม่เหล็กหมุนในรูปของแรงเคลื่อนแม่เหล็กพร้อม ช่องอากาศซึ่งสามารถวิเคราะห์โดยใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำบน ขดลวดทดสอบซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกและมีประสิทธิภาพสามารถอธิบายถึง ทฤษฎีสานแม่เหล็กหมุนได้
- รู้ถึงการอ้อมตัวของแกนเหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งสามารถ วิเคราะห์ได้จาก เส้นกราฟ V-I นอกจากนี้สามารถรู้ถึงขนาดแรงดันที่กด อย่างคร่าวๆของเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้
- ความแตกต่างระหว่างแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กและแรงบิดที่ เพลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะคงที่ในช่วงแกนเหล็ก ไม่อ้อมตัวและ ในทางกลับกัน ความแตกต่างระหว่างแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก และแรงบิดที่เพลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะเพิ่มขึ้นในช่วงแกนเหล็ก อ้อมตัว เนื่องจากในช่วงแกนเหล็กอ้อมตัวแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะไม่ได้เพิ่ม ตามกระแสไฟฟ้า ดังนั้นการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำในช่วงแกนเหล็ก อ้อมตัวจะทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำลดลง
- ค่าแรงบิดจากสนามแม่เหล็กจะสัมพันธ์กับค่าอนุพันธ์ของพลังงานร่วม เฉพาะในช่วงไม่อ้อมตัวเท่านั้น
- eworkงานเล่มนี้ออกแบบการทดลองที่ไม่ซับซ้อนเพื่อความเข้าใจ สนามแม่เหล็กหมุน, แรงเคลื่อนแม่เหล็กและแรงบิดจากสนามแม่เหล็ก ได้ง่ายมากขึ้น

**6. กิตติกรรมประกาศ**

eworkงานชิ้นนี้สำเร็จเป็นอย่างดีด้วยการชี้แนะคำปรึกษาและการ เอาจใจใส่เป็นอย่างดีจาก รองศาสตราจารย์ พิชิต ล้ำของ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ ควบคุมโครงการ และ ดร.เปี่ยมภูมิ สฤตฤกษ์ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ร่วมโครงการ กลุ่มของข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และความ อนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ ประสาทวิชาให้กับพวกข้าพเจ้า ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกๆฝ่ายที่เกี่ยวข้องใน การทำโครงการวิจัยนี้ สุดท้ายนี้พวกข้าพเจ้าขอกราบขอพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของพวกข้าพเจ้าที่ได้อุปการะเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน ตลอดจนส่งเสริมทางการศึกษา จนสามารถสำเร็จการศึกษาระดับ ปริญญาตรี ในครั้งนี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากโครงการนี้ กลุ่ม ของพวกข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

**เอกสารอ้างอิง**

[1] พิชิต ล้ำของ, เครื่องจักรกลไฟฟ้า, ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, สนพ. มิน เซอร์วิส ซัพพลาย, 2553

[2] มนตรี เงามเดช, "Electromagnetic Induction" [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://montri.rmutl.ac.th/old/ee/04210210machine/1\\_Magnetic%20Circuit.pdf](http://montri.rmutl.ac.th/old/ee/04210210machine/1_Magnetic%20Circuit.pdf)

[3] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, **Electric Machinery**, 6<sup>th</sup> Ed., New Delhi, Tata McGraw-Hill,2002



นายเรืองกิตต์ บุญญาพงษ์ธร เกิดวันที่ 19 สิงหาคม 2536  
Tel. 086-109-2591  
E-mail : reangkit.th@hotmail.com



นายวัชรภูมิ ทรัพย์ประเสริฐ เกิดวันที่ 15 มกราคม 2537  
Tel. 081-266-5853  
E-mail : wacharapoom@gmail.com



นายวิทยา พ่วงเจริญ เกิดวันที่ 17 มิถุนายน 2535  
Tel. 061-886-6856  
E-mail : aodaod.wit@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นายเรืองกิตต์ ปัญญาพงศธร  
เกิดวันที่ 19 สิงหาคม 2536  
ที่อยู่ 13 หมู่ 7 ต.เขาบายศรี อ.ท่าใหม่  
จ.จันทบุรี 12120

ปีการศึกษา 2554 จบการศึกษาจากโรงเรียนเบญจมราชูทิศ จ.จันทบุรี  
ปีการศึกษา 2558 จบการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา  
วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
Tel. 086-1092591 E-mail: reungkit.th@hotmail.com



นายวัชรภูมิ ทรัพย์ประเสริฐ  
เกิดวันที่ 15 มกราคม 2537  
ที่อยู่ 289 ม.5 ต.ด่านขุนทด อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา  
30210

ปีการศึกษา 2554 จบการศึกษาจากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2558 จบการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา  
วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
Tel. 081-2665853 E-mail: wacharapoom@gmail.com



นายวิทยา พ่วงเจริญ  
เกิดวันที่ 17 มิถุนายน 2535  
ที่อยู่ 24/11 หมู่ 1 ต.ศิระชะระเข้ชั้น้อย อ.บางเสาธง  
จ.สมุทรปราการ 10540

ปีการศึกษา 2553 จบการศึกษาจากโรงเรียนพรตพิทยพยัต  
ปีการศึกษา 2558 จบการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา  
วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
Tel. 061-8866856 E-mail: aodaod.wit@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้