

การศึกษานามแม่เหล็กหมุน การออกแบบและทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

THE STUDY OF ROTATING MAGNETIC FIELD, THE DESIGN AND
TESTING FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF
3-PHASE INDUCTION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การศึกษานามแม่เหล็กหมุน การออกแบบและทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

THE STUDY OF ROTATING MAGNETIC FIELD, THE DESIGN AND
TESTING FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF
3-PHASE INDUCTION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF ROTATING MAGNETIC FIELD, THE DESIGN AND TESTING FOR
IMPROVING THE EFFICIENCY OF 3-PHASE INDUCTION



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

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

การศึกษานามแม่เหล็กหมุน การออกแบบและทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

THE STUDY OF ROTATING MAGNETIC FIELD, THE DESIGN AND TESTING FOR
IMPROVING THE EFFICIENCY OF 3-PHASE INDUCTION



อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์

รศ.พิชิต ล้ายอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาสนามแม่เหล็กหมุน การออกแบบและทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

ผู้จัดทำ

1. นัทที น้อยพรหม
2. นายนิธิต อำนาคะ
3. นายพงศ์ปณต ไวบรรเทา
4. นายเพชร ศรีภักดี


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


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ พิชิต ลำยอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสนามแม่เหล็กหมุน การออกแบบและทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

นาย นัทที	น้อยพรหม	
นาย นิธิศ	อำนาจะ	
นาย พงศ์ปณต	ไวบรรเทา	
นาย พชร	ศรีภักดี	
ดร. เปี่ยมภูมิ	สฤกษ์ฤกษ์	อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ. พิชิต	ลำยอง	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาสนามแม่เหล็กหมุนและคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยจะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์ทั้งแบบขดลวดและแบบกรงกระรอกเป็นกรณีศึกษา ในขั้นต้นจำเป็นต้องศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โรเตอร์แบบขดลวดที่ใช้ทำการศึกษา เช่น การหาจำนวนขั้วแม่เหล็ก ลักษณะการพันขดลวด ตำแหน่งแกนของขดลวดในแต่ละเฟส ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด การหาสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นที่ช่องอากาศ เป็นต้น และการศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสชนิดโรเตอร์แบบกรงกระรอก เช่น ลักษณะการพันขดลวด จำนวนรอบของขดลวด ขนาดของขดลวด ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้าและค่าตัวประกอบกำลังที่พิกัด การทดสอบหาวงจรสมมูลโดยประมาณ เป็นต้น สุดท้ายแล้วทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าขาออกเพื่อทำการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ภาระต่าง ๆ หลังจากนั้นทำการออกแบบการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ใหม่ โดยการเพิ่มขนาดและลดจำนวนรอบขดลวด ผลที่ได้จากโครงการนี้จะนำเสนอการแสดงผล กำลังไฟฟ้าประสิทธิภาพในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสทั้งการพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิตและการพันขดลวดตามการออกแบบใหม่ และจะนำไปวิเคราะห์เพื่อประโยชน์ทางการศึกษาและการวิจัยออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าต่อไป

THE STUDY OF ROTATING MAGNETIC FIELD, THE DESIGN AND TESTING FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF 3-PHASE INDUCTION

Mr.Nuttee	Noiprom	
Mr.Nitit	Amnaka	
Mr.Pongpanot	Waibantao	
Mr.Patchara	Sripakdee	
Dr.Piampoom	Sarikprueck	Advisor
Assoc.Prof.Pichit	Lumyoung	Co-Advisor

ABSTRACT

This thesis presents the study of rotating magnetic field and performance and characteristics induction motor tests. This research uses two types of induction motors which are squirrel cage rotor and wound rotor as tested motor. First step of testing the motor is to study the structure and characteristics of the wound rotor such as numbers of poles, position of the core in each phase, maximum flux density, rotating magnetic field at gaps, and so on. Then, the characteristics of the squirrel-cage induction motor such as size of the coil, numbers of revolution, voltage, current and power factor is studied. Lastly, the input and output power using to find the efficiency of induction motor at different loads is obtained. In this project, the winding of armature coil is newly designed by increasing the size of coil and decreasing the number of coil turns. The results of this project present the electric power and the efficiency of the new designed induction motor and compare its performance to the ordinary one. This project may hopefully be useful for further studies and researches for the electrical machine design.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการชิ้นนี้สำเร็จเป็นอย่างดีด้วยการชี้แนะคำปรึกษาและการเอาใจใส่เป็นอย่างดีจาก ดร.เปี่ยมภูมิ สฤทพฤกษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมโครงการ และ รองศาสตราจารย์ พิเชิต ลำยอง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการ กลุ่มของข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับพวกข้าพเจ้า ขอขอบคุณ คุณชาญปกรณ์ ณ นิโรจน์ และ คุณพร กลิ่นวิจิต ที่ได้ให้คำปรึกษาในการทำโครงการ

ขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี ที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวกให้เยี่ยมอุปกรณ์ที่จำเป็นที่ใช้ในการทำงานโครงการ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกๆฝ่ายที่เกี่ยวข้องในการทำโครงการวิจัยนี้

สุดท้ายนี้พวกข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของพวกข้าพเจ้าที่ได้อุปการะเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน ตลอดจนส่งเสริมทางด้านการศึกษา จนสามารถสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากโครงการนี้ กลุ่มของพวกข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VIII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 วงจรแม่เหล็ก	5
2.2 สารแม่เหล็ก	5
2.3 ค่าความต้านทานแม่เหล็ก	7
2.4 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า	8
2.5 ค่าความเหนี่ยวนำร่วม	10
2.6 ความเร็วเชิงโครนัส	13
2.7 ทฤษฎีการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน	14
2.8 การกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสสลับ 3 เฟส	19
2.9 การผันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9.1 ขดลวดอาเมเจอร์ของเครื่องกำเนิดสามเฟสแบบพิกซ์เต็ม	25
2.9.2 ขดลวดอาเมเจอร์ของเครื่องกำเนิดสามเฟสแบบพิกซ์เศษส่วน	26
2.10 สัมประสิทธิ์ของการพันขดลวดอาร์มาเจอร์	26
2.11 การคำนวณหาค่า Distribution factor	28
2.12 การคำนวณค่า Pitch	30
2.13 วงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	33
2.14 การทดสอบหาวงจรมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	35
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	
3.1 การหาตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์ของแต่ละเฟส	41
3.2 การศึกษาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน	43
3.2.1 กรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส	43
3.2.2 กรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส	43
3.2.3 พันขดลวดค้นหา 2 ขด ห่างกัน 360 องศาทางไฟฟ้า	44
3.3 การศึกษาย่านการอิมตัวของแกนเหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า	44
3.4 การหาจำนวนรอบขดลวด	46
3.5 การทดสอบหาวงจรมูลโดยประมาณ	47
3.6 จ่ายแรงดันเพื่อขับมอเตอร์ที่แรงดัน 220 V, 50 Hz	47
3.7 การพันมอเตอร์	48
3.8 จ่ายแรงดันเพื่อขับมอเตอร์ที่แรงดัน 110 V 50 Hz และแรงดัน 220 V 100 Hz	51
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 การศึกษาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน	52
4.1.1 กรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส	52
4.1.2 กรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3 เปรียบเทียบค่าแรงดันเหนี่ยวนำระหว่างมอเตอร์แบบดั้งเดิม และที่ออกแบบใหม่	58
4.2 การศึกษาย่านการอิ่มตัวของแกนเหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า	59
4.3 ผลการทดสอบห้วงจรสมมูลโดยประมาณ (การพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต)	61
4.4 ผลการทดลองจ่ายแรงดันเพื่อขับมอเตอร์ที่แรงดัน 220 V 50 Hz (การพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต)	64
4.5 ผลการทดสอบห้วงจรสมมูลโดยประมาณ (การพันขดลวดตามการออกแบบใหม่)	67
4.6 ผลการทดลองจ่ายแรงดันเพื่อขับมอเตอร์ที่แรงดัน 110 V 50 Hz (การพันขดลวดตามการออกแบบใหม่)	71
4.7 ผลการทดลองจ่ายแรงดันเพื่อขับมอเตอร์ที่แรงดัน 220 V 100 Hz ด้วย Inverter (การพันขดลวดตามการออกแบบใหม่)	74
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ	76
5.1.1 การทดลองการศึกษาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กหมุน (มอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบ Wound rotor)	76
5.1.2 การทดลองย่านการอิ่มตัวของแกนเหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า (มอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบ Wound rotor)	76
5.1.3 การทดลองห้วงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ที่มีการพัน ขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต และการพันขดลวดตามการออกแบบใหม่	76

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.4 การทดลองจ่ายแรงดันเพื่อขับมอเตอร์ที่แรงดัน 220V, 50 Hz (การผันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต), แรงดัน 110V, 50 Hz และแรงดัน 220V, 100 Hz (การผันขดลวดตามการออกแบบใหม่)	77
5.2 ปัญหาของโครงการและแนวทางแก้ไขปัญหา	77
5.2.1 ปัญหาของโครงการ	77
5.2.2 แนวทางแก้ไขปัญหา	78
5.3 ข้อเสนอแนะ	78
เอกสารอ้างอิง	79
ภาคผนวก	80
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	81
ภาคผนวก ข คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	86
ภาคผนวก ค ตารางขนาดลวดทองแดงมาตรฐาน	89
ประวัติผู้เขียน	92

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรแม่เหล็ก	5
2.2 การเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามแม่เหล็กต่อความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก	6
2.3 แกนเหล็กรูปทอรอยด์	7
2.4 วงจรแม่เหล็กเมื่อความต้านทานแม่เหล็กมีค่าน้อยมาก	10
2.5 (a) เส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวด 1 คล้องขดลวด 2	10
2.5 (b) เส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวด 2 คล้องขดลวด 1	11
2.5 (c) เส้นแรงแม่เหล็กจากทั้งสองขดลวดคล้องซึ่งกันและกัน	11
2.6 การกระจายของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ช่องอากาศ	14
2.7 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เป็นtraveling wave	16
2.8 ตำแหน่งการวางขดลวดสามเฟส ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ สองขั้วแม่เหล็ก	17
2.9 สัญญาณกระแสไฟฟ้าสามเฟส	18
2.10 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสสามเฟสในขดลวดที่วางห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า	19
2.11 โรเตอร์แบบขั้วยื่นและโรเตอร์แบบทรงกระบอกของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ	20
2.12 แสดงตำแหน่งว่างขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส	21
2.13 แสดงลักษณะ Lap coil และ Shell coil	24
2.14 ลักษณะการแผ่ขยายของขดลวดในแต่ละเฟสเท่ากับ 60 องศาทางไฟฟ้า	24
2.15 การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ 3 เฟสแบบพิชเต็ม	25
2.16 การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ 3 เฟสแบบพิชเศษส่วน	26
2.17 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดแบบพิชเต็มและแบบพิชเศษส่วน	26
2.18 การกระจายของขดลวดในแต่ละเฟส 3 ร่องสลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส	28
2.19 ความกว้างของขดลวดน้อยกว่าความกว้างของขั้วแม่เหล็ก	30
2.20 วงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	33
2.21 วงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขณะไร้ภาระ	35

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22 วงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขณะยึดตัวโรเตอร์	36
3.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบ Wound rotor	38
3.2 เนมเพลทของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบ Wound rotor	39
3.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	40
3.4 เนมเพลทของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	40
3.5 การหาค่าแห่งขดลวด	42
3.6 การหาทิศทางการไหล	42
3.7 การใส่ search coil ที่สเตเตอร์	43
3.8 การใส่ search coil 2 ขด ที่สเตเตอร์	44
3.9 ภาพจำลองการใส่ Search coil ในร่องสลิตของโรเตอร์	46
3.10 วงจรที่ใช้ในการทดลอง	48
3.11 การพันมอเตอร์แบบ Shell coil	48
3.12 ขนาดของความกว้างร่องสลิตที่ต้องการพันทั้ง 3 ขนาด	49
3.13 การนำขดลวดวางลงในร่องสลิต	49
3.14 การเชื่อมขดลวดในแต่ละเฟส	50
3.15 การเคลือบด้วยน้ำยาวานิช	50
4.1 กราฟแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและมุมทางกลกรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส	53
4.2 สัญญาณแรงดันขาเข้าหนึ่งเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 0°	53
4.3 สัญญาณแรงดันขาเข้าหนึ่งเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 30°	53
4.4 สัญญาณแรงดันขาเข้าหนึ่งเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 45°	54
4.5 สัญญาณแรงดันขาเข้าหนึ่งเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 60°	54
4.6 สัญญาณแรงดันขาเข้าหนึ่งเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 90°	54
4.7 กราฟแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและมุมทางกลกรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 สัญญาณแรงดันขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 0°	56
4.9 สัญญาณแรงดันขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 30°	56
4.10 สัญญาณแรงดันขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 60°	57
4.11 สัญญาณแรงดันขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 90°	57
4.12 สัญญาณแรงดันขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 120°	57
4.13 กราฟแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า	60
4.14 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก No-load test	61
4.15 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก Block-rotor test	62
4.16 กราฟแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะจ่าย DC power supply (การพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต)	63
4.17 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ 0% load	64
4.18 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ 50% load	65
4.19 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ 75% load	65
4.20 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ 100% load	66
4.21 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก No-load test	67
4.22 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก Block-rotor test	68
4.23 กราฟแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะจ่าย DC power supply (การพันขดลวดตามการออกแบบใหม่)	69
4.24 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ 0% load	71
4.25 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ 50% load	72
4.26 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ 75% load	72
4.27 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ 100% load	73

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	3
4.1 ผลการทดลองกรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส	52
4.2 ผลการทดลองกรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส	55
4.3 เปรียบเทียบค่าแรงดันเหนี่ยวนำระหว่างมอเตอร์แบบดั้งเดิมและที่ออกแบบใหม่	58
4.4 ผลการทดลองย่านการอิมตัวของแกนเหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า	59
4.5 ผลการทดลอง No-load test (การพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต)	61
4.6 ผลการทดลอง Block-rotor test (การพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต)	61
4.7 ผลการทดลองจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (การพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต)	63
4.8 ผลการทดลองจ่ายแรงดันมอเตอร์ที่แรงดัน 220 V 50 Hz (การพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต)	64
4.9 ผลการทดลอง No-load test (การพันขดลวดตามการออกแบบใหม่)	67
4.10 ผลการทดลอง Block-rotor test (การพันขดลวดตามการออกแบบใหม่)	67
4.11 ผลการทดลองจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (การพันขดลวดตามการออกแบบใหม่)	69
4.12 ผลการทดลองจ่ายแรงดันมอเตอร์ที่แรงดัน 110 V 50 Hz (การพันขดลวดตามการออกแบบใหม่)	71
4.13 ผลการทดลองจ่ายแรงดันมอเตอร์ที่แรงดัน 220 V 100 Hz ด้วย Inverter (การพันขดลวดตามการออกแบบใหม่)	74

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

เนื่องจากความรู้อย่างเข้าใจทางด้านเครื่องจักรกลไฟฟ้ามีส่วนสำคัญในการพัฒนาวิชาชีพในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและสาขาที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสอดคล้องกับสถานการณ์ในปัจจุบันที่โรงงานในภาคอุตสาหกรรมหรือแม้แต่สิ่งอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวัน ได้นำเอาเครื่องจักรกลไฟฟ้ามาใช้ขับเคลื่อนภาระทางกลแทนแรงงานมนุษย์และสัตว์ ในที่นี้จะกล่าวถึงเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับเนื่องจากการใช้งานเป็นส่วนใหญ่ อีกทั้งยังมีข้อได้เปรียบด้านการใช้งานมากกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงที่มีข้อจำกัดด้านความเร็ว (speed) ของเครื่องจักรกลและประสิทธิภาพ (efficiency) ของเครื่องจักรกล

การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับทั้งเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัส เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ และเครื่องจักรกลไฟฟ้าสมัยใหม่นั้น จำเป็นต้องใช้หลักการของสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetic field) ซึ่งสนามแม่เหล็กหมุนเป็นปัจจัยสำคัญทำให้เกิดแรงบิดในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับและเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

เพื่อการศึกษาให้เข้าใจอย่างลึกซึ้ง การเข้าใจในหลักการบำรุงรักษาให้เครื่องจักรกลไฟฟ้ามีความทนทานต่อการใช้งาน รวมไปถึงการอนุรักษ์พลังงานนั้น จำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจในหลักการทำงาน ซึ่งจะนำไปสู่การใช้งานเครื่องจักรกลไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ สิ่งที่จะต้องศึกษาตัวอย่างเช่น วงจรแม่เหล็ก, ค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก, แรงเคลื่อนแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหมุนที่คร่อมที่ช่องอากาศ, แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, แรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก, ค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็ก, ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด ทั้งในย่านเชิงเส้นและในช่วงที่เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็ก โดยจะศึกษาในรูปแบบของ พลังงานร่วมและ แรงบิดในช่องอากาศ นำไปสู่การพิสูจน์ว่าแรงบิดในช่องอากาศเกิดจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศจริง และรู้ถึงวิธีการแก้ปัญหาจากการใช้งานจริงของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ฉะนั้น ใครงานนี้จะทำการศึกษาสถาปัตยกรรมในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อเป็นประโยชน์ในการศึกษาเชิงวิชาการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีของสนามแม่เหล็กหมุน

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้มีความรู้และความเข้าใจในหลักการทำงานของสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับและสามารถอธิบายคุณลักษณะของสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้น
2. เพื่อให้มีความรู้และความเข้าใจในการออกแบบโครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อตอบสนองการใช้งานในรูปแบบที่แตกต่างกัน
3. เพื่อให้มีความรู้และความเข้าใจในการบำรุงรักษาและแก้ไขปัญหาอันเนื่องมาจากการใช้งานเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ
4. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและสมรรถนะของมอเตอร์จากการพันขดลวดที่ต่างกัน

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการงาน

1. ศึกษาทฤษฎีเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่เกี่ยวข้องได้แก่ วงจรแม่เหล็ก, แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นต้น
2. หาโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อความเข้าใจในเครื่องจักรกลต้นแบบที่จะทำการศึกษาได้แก่ ทฤษฎีการพันขดลวดอาร์มาเจอร์, วิธีการหาจำนวนขั้วแม่เหล็ก และวัดขนาด(dimension) ที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลอง
3. การหาสนามแม่เหล็กหมุน ที่เกิดขึ้นที่ช่องอากาศ (air gap) โดยการใช้ search coil
4. ศึกษาพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากขนาดขดลวดที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อที่จะดูการเปรียบเทียบผลคุณลักษณะสมรรถนะ และประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (Three-Phase Induction Motor)

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวข้องกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
2. ทดสอบสนามแม่เหล็กหมุน
3. ทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
4. ออกแบบขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ใหม่และทำการพัน
5. ทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส(ตัวที่ทำการออกแบบใหม่)
6. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบดั้งเดิมและมอเตอร์ที่ทำการออกแบบใหม่

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินการ	ปีการศึกษา 2559									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กหมุนและเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ	↔									
ทดสอบเพื่อหาจำนวนขั้วแม่เหล็ก, วัด dimension รวมถึงศึกษาโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำต้นแบบ		↔								
หาค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น เพื่อทำการหาค่า ฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็กและค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็กที่ทำให้แกนเหล็กอิ่มตัว โดยใช้ search coil			↔							
หาวงจรมุมลโดยประมาณของมอเตอร์ที่เป็นต้นแบบ และทำการทดลองคุณลักษณะต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ					↔					
พินขดลวดอามาเจอร์ที่สเตเตอร์โดยลดจำนวนรอบและขนาดขดลวดลงครึ่งหนึ่ง และศึกษาพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง						↔				
หาวงจรมุมลโดยประมาณของมอเตอร์ที่พินใหม่ และทำการทดลองคุณลักษณะต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ							↔			
สรุปและเปรียบเทียบผลการทดลองคุณลักษณะต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ									↔	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถเข้าใจหลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กหมุน
2. สามารถเข้าใจโครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ
3. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ในการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ
4. สามารถนำความรู้ที่ได้รับไปใช้ในการพัฒนาวิชาชีพสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า



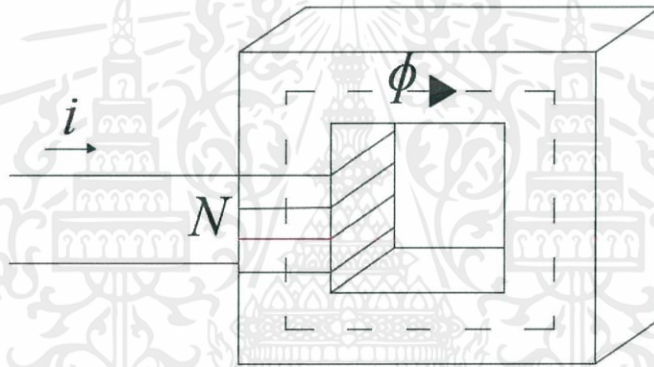
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วงจรแม่เหล็ก

วงจรแม่เหล็กเป็นส่วนประกอบสำคัญอย่างหนึ่งของเครื่องจักรกลไฟฟ้า เนื่องจากเป็นตัวกลางในการผ่านของสนามแม่เหล็กไปสู่จุดใช้งาน ซึ่งจุดประสงค์ของวงจรแม่เหล็กคือจะต้องทำให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็กในวงจรต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับอากาศเท่าที่จะทำได้ ซึ่งในวงจรแม่เหล็กนั้นมีความต้านทานทางแม่เหล็กเช่นเดียวกับความต้านทานทางไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า ซึ่งค่าเหล่านี้จะทำให้เกิดความสูญเสียทางด้านพลังงานในแกนเหล็ก อีกทั้งในวงจรแม่เหล็กยังประกอบไปด้วยช่องอากาศ ซึ่งเป็นที่สะสมพลังงานที่อยู่ในรูปสนามแม่เหล็กซึ่งมีค่าความต้านทานทางแม่เหล็กเช่นกัน



รูปที่ 2.1 วงจรแม่เหล็ก

2.2 สารแม่เหล็ก (Magnetic Material)

สารแม่เหล็กเป็นสารที่ใช้ในการนำมาสร้างวงจรแม่เหล็กจะเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้ค่าความต้านทานของวงจรแม่เหล็กต่ำ โดยแต่ละชนิดจะมีค่าความซึมซาบทางแม่เหล็ก (Permeability) ต่างกัน โดยสารแม่เหล็กจะมีค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กสูงเมื่อเทียบกับอากาศ ซึ่งสารแต่ละชนิดสามารถ หาได้จากสมการ ดังนี้

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

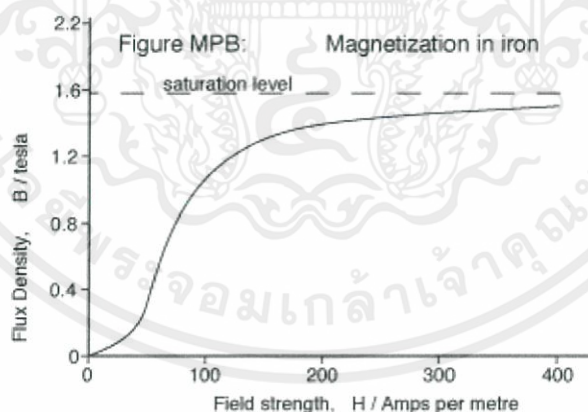
เมื่อ	μ คือ Permeability	หน่วย Wb/At.m
	μ_0 คือ ความซึมซาบทางแม่เหล็กของอากาศมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$	หน่วย Wb/At.m
	μ_r คือ ความซึมซาบทางสัมพัทธ์	หน่วย Wb/At.m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์สามารถแบ่งสารแม่เหล็กออกได้เป็น 4 ประเภทดังนี้

1. สาร Diamagnetic เป็นสารที่มีค่า μ น้อยกว่า 1 เช่น น้ำ บิสมัท ทองแดง เงิน เป็นต้น สารประเภทนี้จะเกิดค่าสนามแม่เหล็กได้น้อย
2. สาร Nonmagnetic เป็นสารที่มีค่า μ เท่ากับ 1 ได้แก่ Vacuum สารประเภทนี้จะกำหนดให้ มีค่า μ ประมาณเท่ากับ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$
3. สาร Paramagnetic เป็นสารที่มีค่า μ มากกว่า 1 เล็กน้อย เช่น อากาศ อะลูมิเนียม แมงกานีส เป็นต้น สารประเภทนี้จะกำหนดให้มีค่า μ ประมาณเท่ากับ μ_0
4. สาร Ferromagnetic เป็นสารที่มีค่า μ ประมาณมากกว่า 1 (10^2 - 10^6) เช่น เหล็ก นิกเกิล ซิลิกอน เป็นต้น สารประเภทนี้จะเกิดค่าสนามแม่เหล็กได้มาก แต่อย่างไรก็ตามพฤติกรรมค่า μ จะไม่คงที่

การอิมตัวของวัสดุตัวนำแม่เหล็กคือสภาพที่วัสดุตัวนำแม่เหล็กยอมรับสภาพการเปลี่ยนแปลงเป็นแม่เหล็กเต็มที่แล้ว โดยพฤติกรรมของการเกิดสนามแม่เหล็กของสารแม่เหล็กดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากกราฟแสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity : H) และค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (Magnetic flux density : B) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามแม่เหล็กต่อความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

จากรูป 2.2 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มค่ากระแสมากขึ้นจะทำให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจึงทำให้ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นจนถึงจุดๆหนึ่งที่เมื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กแล้วแต่ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับเพิ่มขึ้นน้อยมากหรือไม่เพิ่มขึ้น เรียกว่าย่านที่อิ่มตัว (Saturated region)

โดยถ้าสารแม่เหล็กมีความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นไปอย่างเชิงเส้นจะสามารถเขียนความสัมพันธ์เป็นไปอย่างเชิงเส้นได้เป็น

$$B = \mu_0 \mu H \quad (2.2)$$

เมื่อ B คือความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

หน่วย Tesla

H คือความเข้มสนามแม่เหล็ก

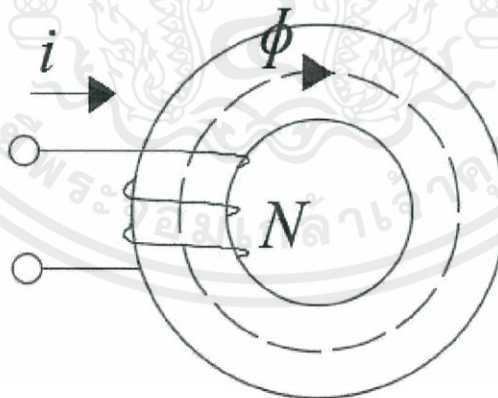
หน่วย At/Wb

2.3 ค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance)

เมื่อป้อนแรงเคลื่อนทางแม่เหล็ก (Magneto-motive force : mmf หรือ Ni) ให้กับวงจรแม่เหล็กจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux : ϕ) ในแกนเหล็กที่ใช้เป็นวงจรแม่เหล็ก ดังรูป 2.3 เป็นแกนทอรอยด์ (Toroid) มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A ซึ่งเมื่อพันขดลวดกระตุ้นสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กกระจายเป็นไปตามวงตามแนวแกน ซึ่งความต่อเนื่องของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กจะทำให้สนามแม่เหล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอโดยสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง Ni กับ ϕ

จาก Ampere's law ;
$$Ni = \oint_c H d\vec{l} \quad (2.3)$$

ในกรณีที่มีการกระจายสนามแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กอย่างสม่ำเสมอจะทำให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแกนเหล็กคงที่ตลอดวงจรสามารถคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ที่ระยะทางเฉลี่ยตามแนวของวงจรแม่เหล็ก (l)



รูปที่ 2.3 แกนเหล็กรูปทอรอยด์

$$Ni = HI \quad (2.4)$$

ในกรณีความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H เป็นเชิงเส้น ($B = \mu H$)

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

จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง Ni กับ ϕ เป็นเชิงเส้น

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

ซึ่งค่าความต้านทานแม่เหล็กของวงจรแม่เหล็ก (Reluctance of magnetic circuit : \mathfrak{R})

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

เมื่อ	Ni : Magneto-motive force (mmf)	หน่วย At (Ampere-turn)
	ϕ : Magnetic flux	หน่วย Wb
	\mathfrak{R} : Reluctance of magnetic circuit	หน่วย A/Wb
	l : Average length	หน่วย m
	A : Average area	หน่วย m^2

2.4 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance)

เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดที่มีจำนวนรอบ N รอบ จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก $\phi(t)$ ดังนั้นจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดของขดลวดจำนวนรอบ $N\phi(t)$ รอบจากกฎของ Faraday's law สามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้น (Induced voltage) ในแต่ละรอบของขดลวดซึ่งขดลวดจำนวนรอบ N รอบก็คือ

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

เมื่อ λ คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้อง (Flux Linkage) หน่วย (Wb -T)

ซึ่งจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่จำนวนรอบ N รอบ $N\phi(t)$ นั้นขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดนั้นคือ

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

ดังนั้น

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\phi}{i} \quad (2.9)$$

เมื่อ L คือ Inductance

หน่วย H

λ คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้อง (Flux Linkage)

หน่วย Wb

ดังนั้น “ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขดลวดจะเป็นค่าของจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องต่อหนึ่งหน่วยกระแส”

จาก

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

จะได้

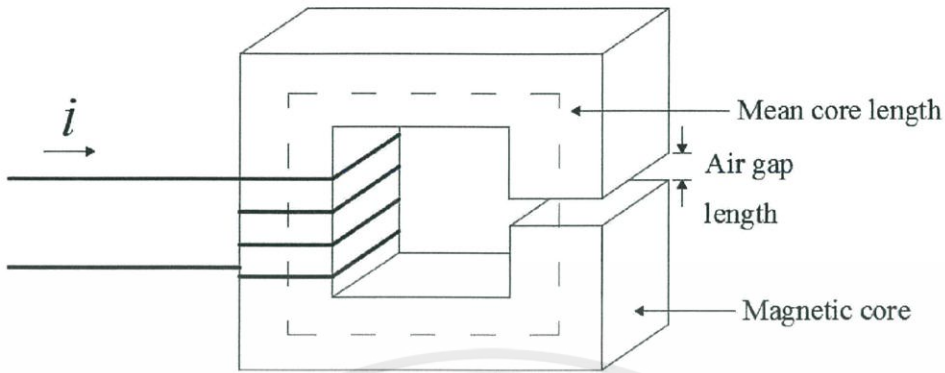
$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\phi}{i} = \frac{NBA}{i} = \frac{NA\mu H}{i} = NA\mu \left(\frac{H}{i}\right) = NA\mu \left(\frac{N}{l}\right) = \frac{N^2 \mu A}{l}$$

เพราะฉะนั้น ถ้าเลือกแกนเหล็กที่ใช้สาร Ferromagnetic ที่มีค่า μ_r สูงมากๆ จะทำให้ค่า

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

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}_g} = \frac{N^2 \mu_0 A_g}{l_g} \quad (2.10)$$

ค่าความเหนี่ยวนำจากสมการ (2.10) จะมีค่าคงที่ โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่ากระแสแต่ค่า L จะมีค่าแปรผันตรงกับค่า N^2 และแปรผกผันกับค่า l_g ดังนั้นเราจึงสามารถปรับค่า L ได้ตามความต้องการเช่น ถ้าต้องการค่า L ที่เปลี่ยนแปลงอย่างมากที่สุดก็สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่าจำนวนรอบของขดลวด N แต่ถ้าต้องการค่า L ที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนระยะช่องว่างอากาศ l_g ดังรูป



รูปที่ 2.4 วงจรแม่เหล็กเมื่อความต้านทานแม่เหล็กมีค่าน้อยมาก

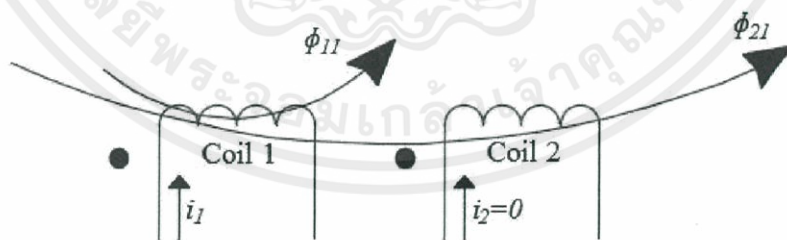
2.5 ค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance)

ในวงจรแม่เหล็กมีขดลวดมากกว่าหนึ่งขด ค่าของจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่มาเกี่ยวค้ำขดลวดทั้งหมด (Total flux linkage) จึงต้องประกอบด้วยเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำตัวเอง (Self-flux linkage) กับเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำรอบข้าง (Mutual flux linkage)

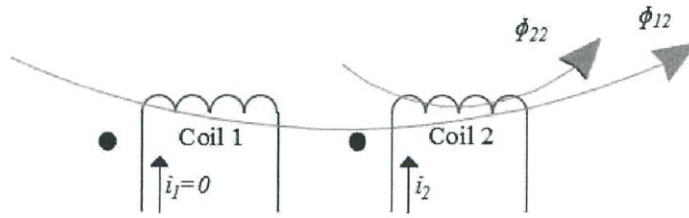
ดังนั้นจึงแบ่งค่าความเหนี่ยวนำในขดลวดเพื่อจุดประสงค์ในการหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำออกเป็น 2 แบบ คือ

- ค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self-inductance)
- ค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual-inductance)

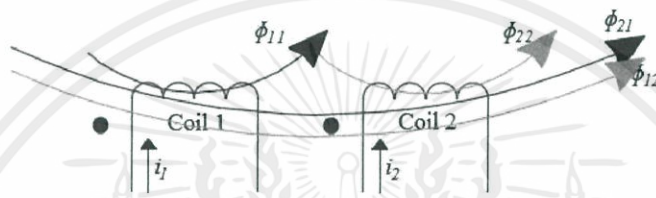
ซึ่งสามารถแสดงแนวทางของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำขดลวด 2 ขด ดังรูปที่ 2.5



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 2.5 การเกี่ยวค้องของเส้นแรงแม่เหล็ก

- (a) เส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวด 1 คล้องขดลวด 2
 (b) เส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวด 2 คล้องขดลวด 1
 (c) เส้นแรงแม่เหล็กจากทั้งสองขดลวดคล้องซึ่งกันและกัน

ซึ่งสามารถหาค่า λ_1 และ λ_2 ได้ดังนี้

$$\lambda_1 = \lambda_{11} + \lambda_{12} \quad (2.11)$$

และ

$$\lambda_2 = \lambda_{21} + \lambda_{22} \quad (2.12)$$

เมื่อ

- λ_1 : Total flux linkage of coil 1
 λ_2 : Total flux linkage of coil 2
 λ_{11} : Flux linkage ที่ขดลวด 1 ถูกกระทำโดยกระแสที่ไหลในขดลวด 1
 λ_{12} : Flux linkage ที่ขดลวด 1 ถูกกระทำโดยกระแสที่ไหลในขดลวด 2
 λ_{21} : Flux linkage ที่ขดลวด 2 ถูกกระทำโดยกระแสที่ไหลในขดลวด 1
 λ_{22} : Flux linkage ที่ขดลวด 2 ถูกกระทำโดยกระแสที่ไหลในขดลวด 2

ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ λ_{12} ที่ขดลวด 1 ถูกกระทำจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสที่ไหลในขดลวด 2 เส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_{22} ไม่จำเป็นต้องค้ำขดลวด 1 ทั้งหมด จึงกำหนดสัมประสิทธิ์ของการเกี่ยวค้ำ K เพื่อกำหนดเป็นอัตราส่วนออกมาเป็นการเกี่ยวค้ำระหว่างขดลวด 1 และ 2

$$\lambda_1 = N_1\phi_{11} + N_1K_{12}\phi_{22} \quad (2.13)$$

$$\lambda_2 = N_2K_{21}\phi_{11} + N_2\phi_{22} \quad (2.14)$$

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

แทนค่าในสมการ

$$\lambda_1 = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_1} i_1 + K_{12} \frac{N_1 N_2}{\mathcal{R}_2} i_2 \quad (2.15)$$

$$\lambda_2 = K_{21} \frac{N_1 N_2}{\mathcal{R}_1} i_1 + \frac{N_2^2}{\mathcal{R}_2} i_2 \quad (2.16)$$

ถ้ากำหนดให้ $L_{11} = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_1}$; $L_{22} = \frac{N_2^2}{\mathcal{R}_2}$; $L_{12} = K_{12} \frac{N_1 N_2}{\mathcal{R}_2}$; $L_{21} = K_{21} \frac{N_1 N_2}{\mathcal{R}_1}$

$$\lambda_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2$$

$$\lambda_2 = L_{21} i_1 + L_{22} i_2$$

เมื่อ L_{11} : Self-inductance ของขดลวด 1 หน่วย H

L_{22} : Self-inductance ของขดลวด 2 หน่วย H

L_{12} : Mutual inductance ของขดลวด 1 ถูกกระทำโดยขดลวดที่ 2 หน่วย H

L_{21} : Mutual inductance ของขดลวด 2 ถูกกระทำโดยขดลวดที่ 1 หน่วย H

K_{12} : Coupling coefficient ของขดลวด 1 ถูกกระทำโดยขดลวดที่ 2 หน่วย H

K_{21} : Coupling coefficient ของขดลวด 2 ถูกกระทำโดยขดลวดที่ 1 หน่วย H

$$0 \leq K \leq 1.0$$

โดยที่ K อยู่ในย่าน 0 ถึง 1.0 $K = 0$ เมื่อสนามแม่เหล็กจากขดลวดทั้งสองไม่เกี่ยวค้ำซึ่งกันและกัน และถ้า $K = 1.0$ เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดหนึ่งเกี่ยวค้ำอีกขดลวดหนึ่งทั้งหมดและเท่ากันทุกวงรอบ

ในกรณีที่ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์ที่มีค่าสูงมากเข้าใกล้อนันต์ ($\mu_r \Rightarrow \infty$) ค่าความต้านทานแม่เหล็กทางแม่เหล็กของแกนเหล็กจะน้อยมาก สันแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแส i_1 และ i_2 จะอยู่ภายในแกนเหล็กที่เป็นวงจรแม่เหล็กซึ่งจะไม่มีสนามแม่เหล็กรั่ว

2.6 ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed)

เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับจะทำงานโดยอาศัยสนามแม่เหล็กหมุนเกิดจากการหมุนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์หรือเกิดจากการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าที่ขดอาร์มาเจอร์สามเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับจะเรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed: n_s)

ในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ มี P ขั้วแม่เหล็ก จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างมุมทางกล (θ_m) กับมุมทางไฟฟ้า (θ_e) หน่วย rad

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad (2.17)$$

ถ้ากำหนดให้ค่า θ_e และ θ_m ในสมการ 2.17 เป็นค่าของมุมที่เกิดจากการหมุนตัวโรเตอร์ในเวลา 1 วินาที และสามารถเขียนเป็นความเร็วเชิงมุมซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมทางกลและความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า หน่วย rad/s ได้

$$\omega_e = \frac{P}{2} \omega_m \quad (2.18)$$

และถ้านำสมการที่ 2.18 มาหารด้วย 2π จะสามารถเขียนเป็นความถี่ของไฟฟ้า (f) และความถี่เชิงกล (f_m) หน่วย Hz หรือ รอบ/วินาที

$$f = \frac{P}{2} f_m \quad (2.19)$$

และถ้านำสมการที่ 2.19 มาทำการแปลงหน่วยความถี่ทางให้เป็นหน่วย รอบ/นาที ได้สมการ

$$f = \frac{P}{2} \left(\frac{n_m}{60} \right) \quad (2.20)$$

จะได้สมการของความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (2.21)$$

เมื่อ n_s คือ ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน (Synchronous Speed)

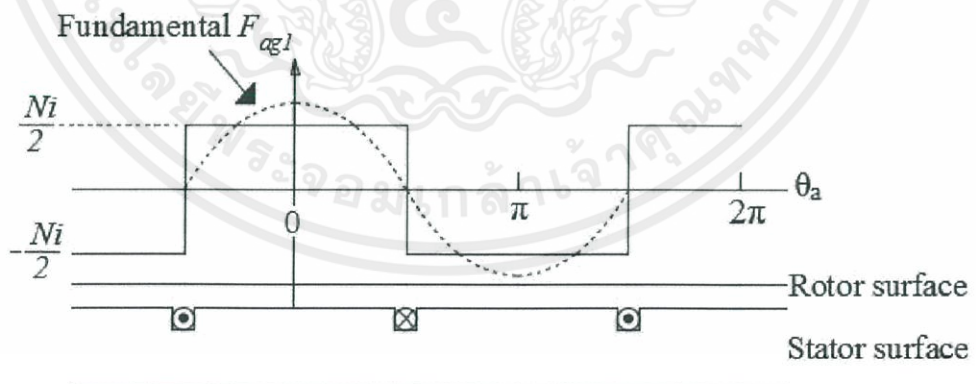
f คือ ความถี่ของไฟฟ้าที่ป้อนขดอาร์มาเจอร์

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

2.7 ทฤษฎีการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน

ในการศึกษาทฤษฎีการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน จำเป็นที่จะต้องศึกษาแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ตกคร่อมที่ช่องอากาศ เมื่อทำการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีตัวโรเตอร์เป็นลักษณะทรงกระบอก ซึ่งทำให้ความกว้างของช่องอากาศคงที่ เมื่อเรารู้ค่า Relative permeability ของแกนเหล็กที่ใช้ทำแกนสเตเตอร์และโรเตอร์มีค่าสูงมาก ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ตกคร่อมแม่เหล็กถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอากาศโดยแรงเคลื่อนทั้งหมดที่เกิดจะถือว่าตกคร่อมที่ช่องอากาศทั้งหมด

ในการพันขดลวดแบบเป็นก้อน (Concentric coil) ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่กระจายโดยรอบของช่องอากาศจะมีขนาดคงที่ตลอดช่วงของขั้วแม่เหล็กค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จึงเป็นในรูปแบบ Square wave



รูปที่ 2.6 การกระจายของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ช่องอากาศ

จากการกระจายของแรงเคลื่อนแม่เหล็กโดยใช้ Fourier series ของสัญญาณแบบ Square wave ที่มีขนาดเท่ากับ K จะสามารถแยกสัญญาณออกเป็นสัญญาณมูลฐาน (Fundamental) กับ ฮาร์โมนิก (Harmonic) ได้ดังนี้

$$F(\theta) = \frac{4}{\pi} K \left[\cos \theta - \frac{1}{3} \cos 3\theta + \frac{1}{5} \cos 5\theta - \frac{1}{7} \cos 7\theta + \frac{1}{9} \cos 9\theta - \dots \right] \quad (2.22)$$

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

$$K = \frac{N_{ph} i(t) K_w}{P} \quad (2.23)$$

เมื่อกำหนดให้แกนของขดลวดสเตเตอร์อยู่ที่ 0° และป้อนกระแส $i(t)$ ที่ขดลวดสเตเตอร์โดยที่มีสมการของกระแสดังนี้

$$i(t) = I_m \cos(\omega t) \quad (2.24)$$

โดยจะพิจารณาเฉพาะแรงเคลื่อนทางแม่เหล็กมูลฐานซึ่งจะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กมูลฐาน $F_a(\theta, t)$ ที่มุม θ และเวลา t ใดๆ

จะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กมูลฐาน

$$F(\theta, t) = F_{\max} \cos(\theta) \cos(\omega t) \quad (2.25)$$

$$F(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t) \quad (2.26)$$

โดยที่ค่า

$$F_{\max} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_{ph} I_m}{P} \quad (2.27)$$

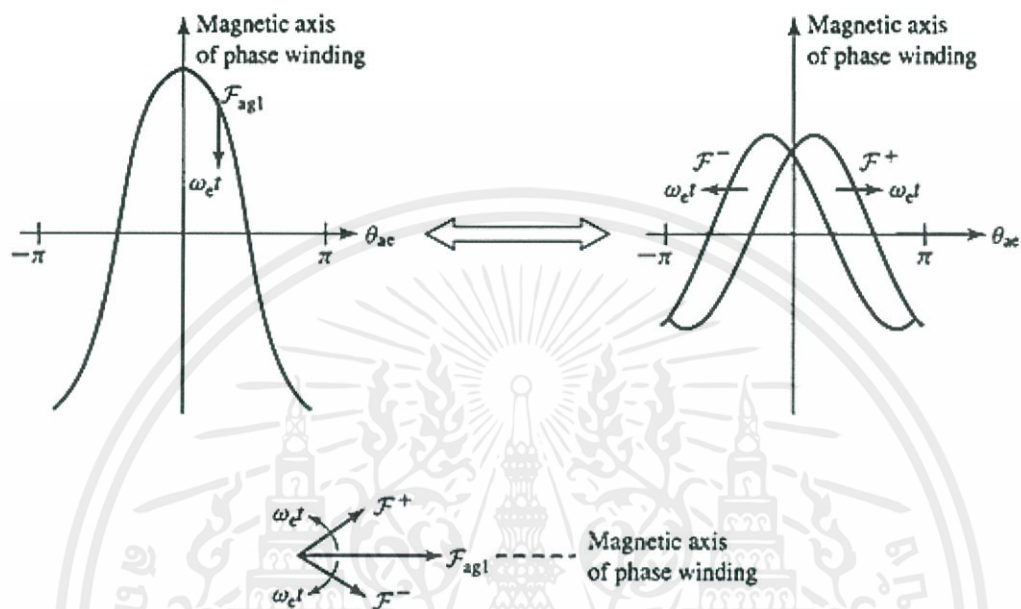
เมื่อ $\frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t)$ เทอมแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เคลื่อนตัวทศบวก

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

$F(\theta, t)$ คือ ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์ที่มุม θ และเวลา t ใดๆ

I_m คือ ค่าสูงสุดของกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก

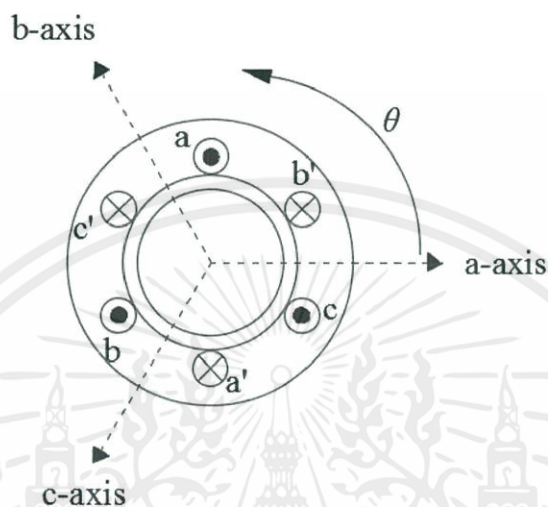
θ คือ ตำแหน่งมุมใดๆในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับโดยมีแกนของเฟส a เป็นแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.7 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เป็น traveling wave

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนไฟฟ้า กระแสสลับเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์จะมีทิศทางอยู่ในแนวแกนของขดลวด โดยจะมีขนาดและทิศทางจะสลับตามค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ป้อนเข้า ซึ่งจะ ทำให้เกิดทิศทางของแรงเคลื่อนแม่เหล็กเป็น 2 เทอม จากสมการ คือ เทอมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เคลื่อนเคลื่อนตัวในทิศทางด้านบวก (Traveling of mmf wave in positive direction) และเทอมแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เคลื่อนเคลื่อนตัวในทิศทางด้านลบ (Traveling of mmf wave in negative direction) การที่สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ในทิศทางดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดการหักล้างกันของแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็ก เนื่องจากเทอมสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนตัวทิศบวก จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กดึงไปในทิศบวก ในขณะที่เทอมสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนตัวทิศลบ จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กดึงไปในทิศลบ แต่เมื่อสนามแม่เหล็กมีทั้งทิศทางบวกและลบก็จะเกิดการหักล้างกันของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก จากการรวมตัวกันทางเวกเตอร์ ดังนั้นถ้าต้องการสนามแม่เหล็กที่หมุนในทิศทางเดียวจะต้องมีขดลวดที่จ่ายกระแสสลับมากกว่า 1 เฟส เพื่อจะมาทำหน้าที่หักล้างสนามแม่เหล็กในทิศที่ไม่ต้องการออก โดยปกติจะเป็นการสร้างขดลวดที่มี 3 ขด ที่วางทำมุมระหว่างกันให้เท่ากันและต้องป้อนป้อนด้วยกระแสสลับ 3 เฟส

จากโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขดลวดอาร์มาเจอร์ 3 เฟส อยู่ที่สเตเตอร์ โดยที่ขดลวดจะวางห่างกัน 120° ไฟฟ้าดังรูป ($\theta_c = \frac{P}{2} \theta_m$)



รูปที่ 2.8 ตำแหน่งการวางขดลวดสามเฟส ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ สองขั้วแม่เหล็ก

โดยกำหนดให้

แกนของขดลวดเฟส a อยู่ที่ตำแหน่ง 0°

แกนของขดลวดเฟส b อยู่ที่ตำแหน่ง 120°

แกนของขดลวดเฟส c อยู่ที่ตำแหน่ง 240°

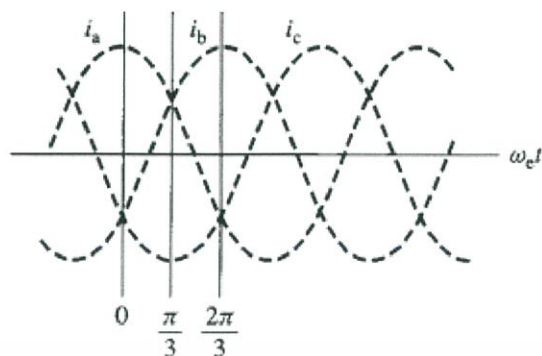
เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเข้าที่ขดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่ตำแหน่งวางขดลวดแต่ละเฟส แกนของขดลวดจะห่างกันเท่ากับ 120° องศาทางไฟฟ้าโดยมีค่าของกระแสสามเฟสดังนี้

$$i_a = I_m \cos(\omega t) \quad (2.28)$$

$$i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2.29)$$

$$i_c = I_m \cos(\omega t - 240^\circ) \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 สัญญาณกระแสไฟฟ้าสามเฟส

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแส $i_a(t)$ เข้าที่ขดลวดเฟส a และแกนของขดลวดเฟส a อยู่ที่ 0° ทางไฟฟ้า

$$F_a(\theta, t) = F_{\max} \cos(\theta) \cos(\omega t) \quad (2.31)$$

$$F_a(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t) \quad (2.32)$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแส $i_b(t)$ เข้าที่ขดลวดเฟส b และแกนของขดลวดเฟส b อยู่ที่ 120° ทางไฟฟ้า

$$F_b(\theta, t) = F_{\max} \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2.33)$$

$$F_b(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t - 240^\circ) \quad (2.34)$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแส $i_c(t)$ เข้าที่ขดลวดเฟส c และแกนของขดลวดเฟส c อยู่ที่ 240° ทางไฟฟ้า

$$F_c(\theta, t) = F_{\max} \cos(\theta - 240^\circ) \cos(\omega t - 240^\circ) \quad (2.35)$$

$$F_c(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t - 120^\circ) \quad (2.36)$$

เมื่อรวมทั้งสามเทอมเข้าด้วยกัน จะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ (Rotating mmf wave) ที่เกิดจากการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ทั้ง 3 เฟส ดังสมการ

$$F_{\text{total}}(\theta, t) = F_a(\theta, t) + F_b(\theta, t) + F_c(\theta, t) \quad (2.37)$$

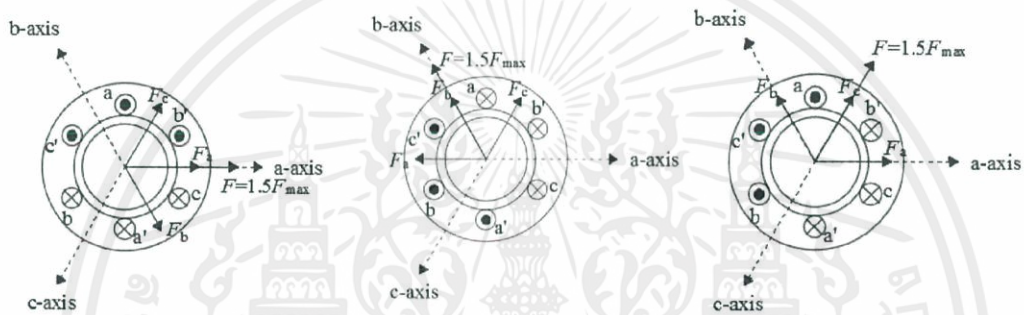
โดยที่เทอม

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

ทำให้

$$F_{\text{total}}(\theta, t) = \frac{3}{2}F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (2.38)$$

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



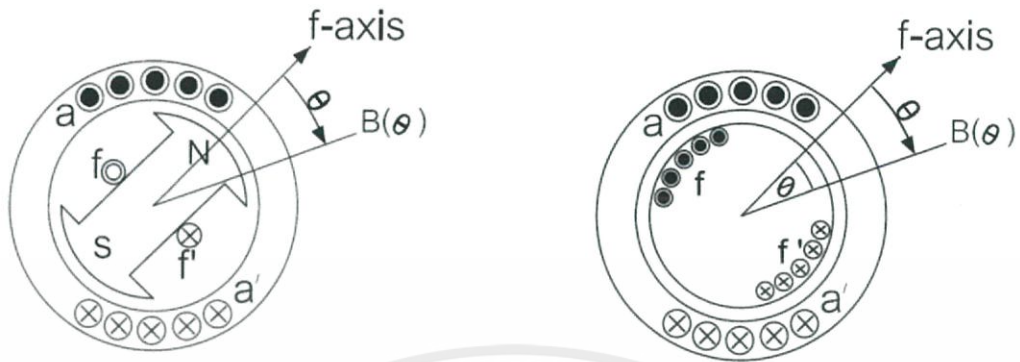
รูปที่ 2.10 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสสามเฟสในขดลวดที่วางห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า

2.8 การกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสสลับ 3 เฟส

การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับนั้นเพื่อต้องการสร้างไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส โดยที่ลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าเป็นแบบรูปคลื่นไซน์ (sine wave) แต่ละเฟสห่างกันเท่ากับ 120 องศา

โดยที่การกระจายของค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับจะมีการเปลี่ยนแปลงตามแบบ sine function

ขั้วแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการกระจายความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเป็นแบบไซน์ฟังก์ชัน สามารถสร้างได้ทั้งโครงสร้างโรเตอร์แบบขั้วยื่น (Salient pole) หรือตัวโรเตอร์แบบทรงกระบอก (Cylindrical rotor) โดยแบบขั้วยื่นจะใช้ความกว้างของช่องอากาศเป็นตัวกำหนดค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่มีมุมต่างๆของขั้วแม่เหล็ก ส่วนที่โรเตอร์แบบทรงกระบอกจะอาศัยการกระจายแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กที่มีมุมต่างๆจากการพันกระจาย (Distribution winding)



รูปที่ 2.11 โรเตอร์แบบขั้วยื่นและโรเตอร์แบบทรงกระบอกของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ

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

$$B(\theta) = B_m \cos\theta \quad (2.39)$$

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

$$\phi_p = \int B(\theta) dA \quad (2.40)$$

$$\phi_p = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} B_m \cos(\theta) l r d\theta = 2B_m l r \quad (2.41)$$

เมื่อ l เป็นความยาวตามแนวแกนและ r เป็นรัศมีของช่องอากาศ และในกรณีที่มี P ขั้วแม่เหล็ก ถ้าโครงสร้างของเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวตามแนวแกนเท่ากันจะพบว่าพื้นที่ของขั้วแม่เหล็กจะลดลงทำให้ค่าเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วลดลงตามจำนวนขั้ว

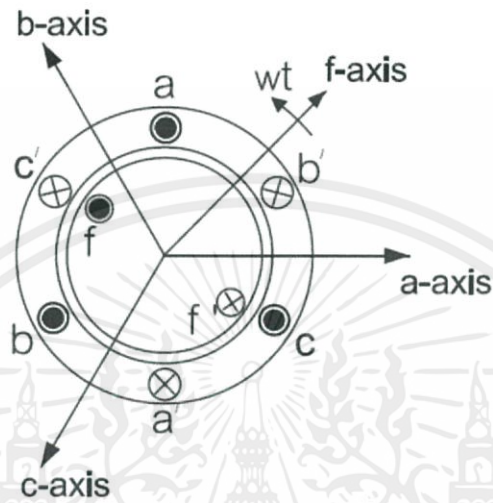
$$\phi_p = \frac{2}{P} 2B_m l r \quad (2.42)$$

เมื่อมีการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ 3 เฟสที่ตัวสเตเตอร์ (Stator) โดยขดลวดแต่ละเฟสวางห่างกันเท่ากับ 120 องศาไฟฟ้า ดังแสดงตามรูปที่ 2.12 จะได้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องของขดลวดแต่ละเฟสที่พันแบบอัดเป็นก้อน ที่มีจำนวนรอบของขดลวดเท่ากับ N และความกว้างของขดลวดเท่ากับ 180 องศาไฟฟ้า

$$\lambda_a = N\phi_p \cos(\omega t) \quad (2.43)$$

$$\lambda_b = N\phi_p \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2.44)$$

$$\lambda_c = N\phi_p \cos(\omega t - 240^\circ) \quad (2.45)$$



รูปที่ 2.12 แสดงตำแหน่งว่างขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดในกรณีที่มีเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องในขดลวด (Flux linkage:

λ) โดยที่ $\lambda = N\phi_p \cos \omega t$

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = N \frac{d(\phi_p \cos \omega t)}{dt} \quad (2.46)$$

$$e = N \left(\frac{d\phi_p}{dt} \right) \cos \omega t - \omega N \phi_p \sin \omega t \quad (2.47)$$

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

เทอมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดสนามแม่เหล็ก $N \left(\frac{d\phi_p}{dt} \right) \cos \omega t$ เรียกเทอมนี้ว่า

Transformer voltage ถึงแม้ว่าขดลวดหรือขั้วแม่เหล็กจะไม่เคลื่อนที่แต่ถ้าขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว (ϕ_p) มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาจะเกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า

และเทอมที่เกิดจากการเคลื่อนที่ตัดของสนามแม่เหล็ก $\omega N \phi_p \sin \omega t$ เรียกเทอมนี้ว่า Speed voltage ไม่ว่าจะ เป็นขดลวดอาร์มาเจอร์เคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็กที่ตัดสนามแม่เหล็กหรือ ขั้วแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดจะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจาก $\frac{d(\cos \omega t)}{dt}$

การกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับโดยเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับอาศัยหลักการของ สนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตัดกับขดลวด ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า โดย ให้ค่าเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว (ϕ_p) มีค่าคงที่ ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับจึงใช้เทอมที่เป็น Speed voltage เป็นตัวทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$$e = -\omega N \phi_p \sin \omega t \quad (2.48)$$

จากการพันขดลวดอาร์มาเจอร์แบบกระจายและมีความกว้างของขดลวดน้อยกว่า 180 องศาทางไฟฟ้า โดยมีจำนวนรอบของขดลวดในแต่ละเฟสเท่ากับ N_{ph} มีค่า Winding factor เท่ากับ K_w ซึ่งสามารถ เขียนสมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดของเฟส a ดังนี้

$$e_a = \omega N_{ph} \phi_p K_w \sin \omega t = E_{a,\max} \sin \omega t \quad (2.49)$$

ซึ่งสามารถหาค่า rms (root mean square) ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดเฟส a ที่เกิด จากกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (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

$$E_{af} = 4.44 f N_{ph} \phi_p K_w \quad (2.50)$$

จากสมการสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ของ E_{af} กับ ϕ_p และ f โดยที่ความถี่ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (f) สามารถหาค่าได้ทั้งสมการต่อไปนี้

$$E_{af} = K f \phi_p \quad (2.51)$$

เมื่อ K : เป็นค่าคงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_{af} กับ ϕ_p และ f

ในทำเดียวกันสามารถหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด b และ c

$$e_b = \omega N_{ph} \phi_p K_w \sin(\omega t - 120^\circ) = E_{a,\max} \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (2.52)$$

$$e_c = \omega N_{ph} \phi_p K_w \sin(\omega t - 240^\circ) = E_{a,\max} \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (2.53)$$

2.9 การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ

การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งในหัวข้อนี้จะเป็นการพันขดลวด อาร์มาเจอร์แบบ 3 เฟส ส่วนที่เป็นแบบ 2 เฟสนั้น หรือการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์เฟสเดียว สามารถประยุกต์จากการพันแบบ 3 เฟส โดยการพันขดลวดอาร์มาเจอร์แบบ 2 เฟสนั้น ขดลวดจะวางห่างกันเท่ากับ 90 องศาทางไฟฟ้า และการกระจายของด้านของขดลวดแต่ละด้านเท่ากับ 90 องศาไฟฟ้า

การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส จะต้องมีข้อมูลต่างๆเพื่อใช้ในการพันขดลวดดังนี้ จำนวนช่องสำหรับพันขดลวดหรือเรียกว่าจำนวนร่องสลิต (Slot number : S) จำนวนขั้วแม่เหล็ก (P) จำนวนของเฟส (phase number : m) จำนวนรอบของขดลวดในแต่ละก้อน (N_c) และ มุมการแผ่ขยายของเฟส (Spread of phase group : σ)

ในการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส จะต้องคำนวณหาค่าความกว้างของร่องสลิต (Slot width : γ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\gamma = \frac{180^\circ \times P}{S} \quad (2.54)$$

ซึ่งสมมติให้เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับมีจำนวนร่องสลิตต่อจำนวนเท่ากับ 48 และมีจำนวนขั้วเท่ากับ 4 Pole จะทำให้ค่าความกว้างของร่องสลิต (γ) มีค่าเท่ากับ (หน่วยเป็นองศาไฟฟ้า)

$$\gamma = \frac{180^\circ \times P}{S} = \frac{180^\circ \times 4}{48} = 15^\circ \quad (2.55)$$

จำนวนร่องสลิตต่อจำนวนขั้วแม่เหล็ก (Slot/pole : g) สามารถหาได้จาก

$$g = \frac{S}{P} \quad (2.56)$$

จำนวนร่องสลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส (Slot/pole/phase : g') สามารถหาได้จาก

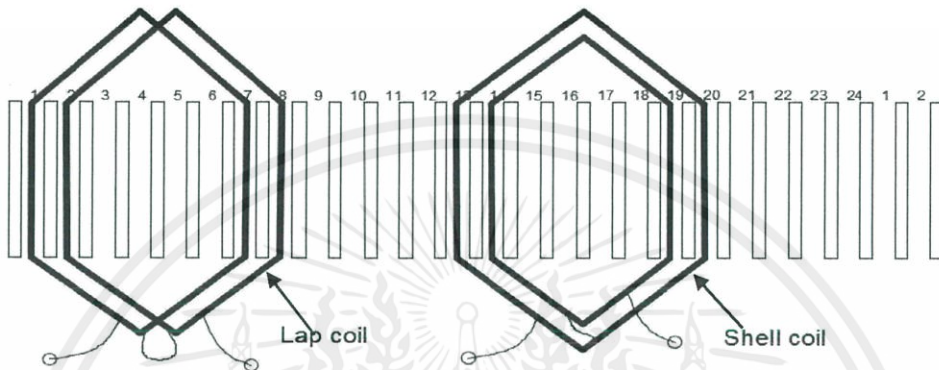
$$g' = \frac{S}{P \times m} \quad (2.57)$$

ซึ่งความกว้างของขั้วแม่เหล็ก (Pole pitch: Y_p) ถ้าแสดงเป็นจำนวนร่องสลิตจะเท่ากับจำนวนร่องสลิตต่อจำนวนขั้วแม่เหล็ก (g) ถ้าคิดเป็นมุมทางไฟฟ้าจะเท่ากับ 180 องศาไฟฟ้า และถ้าเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่มีจำนวนร่องสลิตเท่ากับ 48 และมีจำนวนขั้วแม่เหล็กเท่ากับ 4 จะมี

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

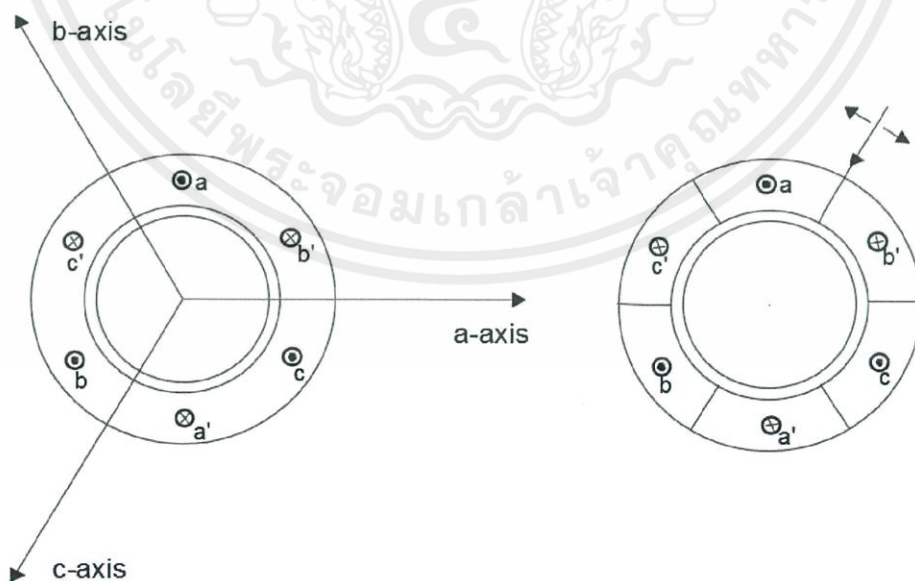
$$g' = \frac{S}{P \times m} = \frac{48}{4 \times 3} = 4 \quad \text{slots/pole/phase}$$

ขดลวดที่ใช้ในการพันอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับแบ่งเป็นแล็ปคอยล์ (Lap coil) และ (Shell coil) ดังแสดงตามรูปที่ 2.13 ในการนำเสนอจะแสดงเฉพาะที่เป็นแบบแล็ปคอยล์เป็นหลัก



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะ Lap coil และ Shell coil

การแผ่ขยายของขดลวดในแต่ละเฟส (Spread of phase group : σ) ของการพันอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส จะสามารถพันได้ทั้งแบบที่เป็น 60 และ 120 องศาทางไฟฟ้า ในการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ส่วนใหญ่จะมีการแผ่ขยายของขดลวดแต่ละเฟสเท่ากับ 60 องศาทางไฟฟ้า ดังนั้นจะนำเสนอเฉพาะที่มี $\sigma = 60^\circ$



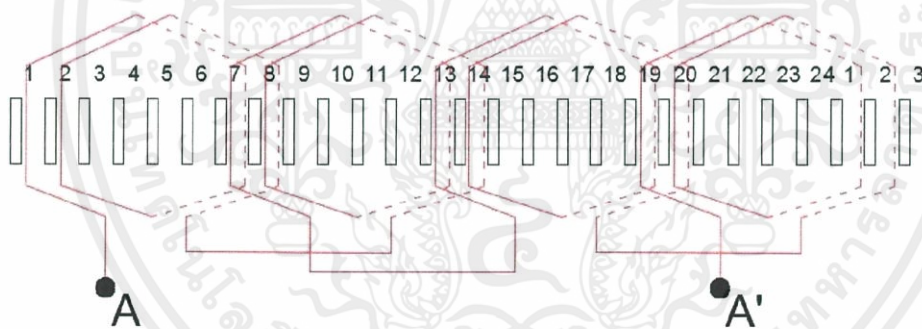
รูปที่ 2.14 ลักษณะการแผ่ขยายของขดลวดในแต่ละเฟสเท่ากับ 60 องศาทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ยังมีลักษณะที่ใน 1 ร่องสลิต จะมีด้านของขดลวดอยู่ 2 แบบ คือ แบบที่ใน 1 ร่องสลิตมี 1 ด้านขดลวด (Coil side) ซึ่งจะเรียกการพันที่มี 1 ด้านขดลวดใน 1 ร่องสลิตว่าเป็นแบบชั้นเดียว (Single layer) และแบบที่ใน 1 ร่องสลิตมี 2 ด้านขดลวดซึ่งจะเรียกการพันที่มี 2 ด้านขดลวดใน 1 ร่องสลิตว่าเป็นแบบสองชั้น (Double layer)

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

2.9.1 ขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดสามเฟสแบบพิชเต็ม (Full Pitch)

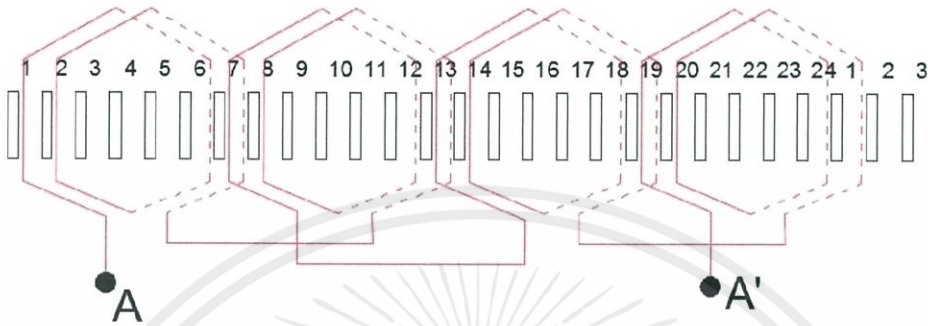


รูปที่ 2.15 การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ 3 เฟสแบบพิชเต็ม

จากรูปที่ 2.15 ขดลวดแต่ละชุดจะพันลงในสลิตห่างกัน 120 องศาไฟฟ้าจำนวนสลิตต่อหนึ่งขั้วแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 12 สลิตดังนั้นจำนวนสลิตต่อหนึ่งขั้วแม่เหล็กต่อหนึ่งเฟสมีค่าเท่ากับ 4 สลิตและขั้วแม่เหล็ก 1 ขั้วกว้าง 180 องศาไฟฟ้าหรือต้นและปลายของขดลวดเดียวกันพันห่างกัน 180 องศาไฟฟ้างั้นสลิตแต่สลิตห่างเท่ากับ $180/12 = 15$ องศาไฟฟ้าการพันขดลวดในเฟส a จะเริ่มที่สลิตที่ 1 ส่วนปลายของคอยล์ที่ 1 จะพันลงในด้านล่างของสลิตที่ 13 ในทำนองเดียวกันต้นของคอยล์ที่ 2 จะเริ่มที่สลิตที่ 2 และปลายคอยล์จะลงสลิตที่ 14 เป็นอย่างนี้เรื่อยๆไปพันจนหมดทุกเฟสขดลวดที่พันจะเป็นเฟสเดียวกันทั้งชุดที่อยู่ด้านบนและชุดที่อยู่ด้านล่าง

2.9.2 ขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดสามเฟสแบบพิชเศษส่วน (Short Pitch)

คือระยะห่างระหว่างต้นและปลายของคอยล์เดียวกันที่พันลงในสล๊อตของขดลวดอาร์มาเจอร์ มีค่าน้อยกว่า 180 องศาไฟฟ้าหรือระยะห่างน้อยกว่า 6 สล๊อตมีระยะห่างเพียง 5 สล๊อตนั้นคือระยะห่างหรือพิชเป็น $5/6$ ของขดลวดดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การพันขดลวดอาร์มาเจอร์ 3 เฟสแบบพิชเศษส่วน

จากรูปการพันขดลวดของแต่ละเฟสต้นของเฟส a มีปลายของเฟส a มาลงเพียง 2 คอยล์เท่านั้น ส่วนอีกสองสล๊อตต้นของเฟส a ที่เหลือไปทางขวามือจะมีปลายของเฟส c มาลงอีกสองคอยล์เมื่อนำการพันขดลวดทั้ง 2 แบบไปใช้งานแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตออกมาโดยขดลวดแต่ละชุดจะมีความแตกต่างกันดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดแบบพิชเต็มและแบบพิชเศษส่วน

2.10 สัมประสิทธิ์ของการพันขดลวดอาร์มาเจอร์

ในการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ที่มีจำนวนร่องสล๊อตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส (g') มากกว่า 1 ร่องสล๊อต แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำในก้อนขดลวดของเฟสเดียวกันแต่อยู่ต่างร่องสล๊อตจะมีขนาดเท่ากันแต่จะมีการเลื่อนเฟสระหว่างขดลวด

จากสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในก้อนขดลวด ในกรณีที่ความกว้างของขดลวดเท่ากับ ความกว้างของขั้วแม่เหล็ก ($Y_s = Y_p$) โดยขดลวดจะมีความกว้างเท่ากับ 180 องศาไฟฟ้า

$$E = 4.44 f N_c \phi_p \quad (2.58)$$

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

$$E_{ph} = 4.44 f N_{ph} \phi_p K_w \quad (2.59)$$

ซึ่งค่าของสัมประสิทธิ์ของการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ (Winding factor : K_w) เป็นตัวคูณที่จะมาปรับตัวเลขให้ถูกต้องเนื่องมาจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าของขดลวดในแต่ละเฟสจะต้องรวมแบบเวกเตอร์และความกว้างของขดลวดแต่ละขดอาจน้อยกว่า 180 องศาไฟฟ้า

โดยกำหนดให้

$$K_w = K_d K_p \quad (2.60)$$

ซึ่งจะสามารถหาค่า Distribution factor (K_d) ได้จาก

$$K_d = (\text{Phasor sum of each phase}) / (\text{Arithmetic sum of each phase}) \quad (2.61)$$

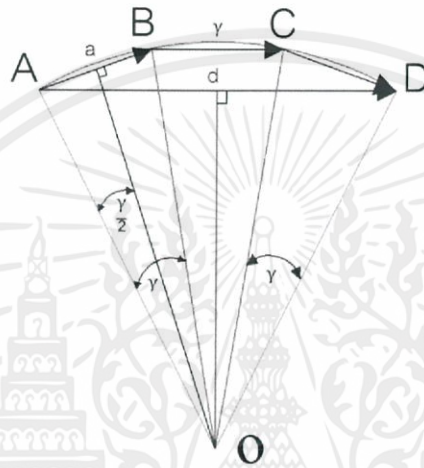
และค่า Pitch factor (K_p)

$$K_p = (\text{Induced emf of fractional pitch coil}) / (\text{Induced emf of full pitch coil}) \quad (2.62)$$

ในการพันขดลวดที่มีความกว้างของขดลวดที่มีความกว้างของขดลวดเท่ากับ ความกว้างของขั้วแม่เหล็ก และมี 1 ร่องสลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส ค่าของสัมประสิทธิ์ของการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ (K_w) จะเท่ากับ 1 แต่ถ้าความกว้างของขดลวดน้อยกว่าความกว้างของขั้วแม่เหล็ก ค่าของ Pitch factor จะมีค่าน้อยกว่า 1 ($K_p < 1$) และถ้ามีจำนวนร่องสลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส (g) มากกว่า 1 ร่องสลิต จะทำให้ค่าของ Distribution factor มีค่าน้อยกว่า 1 ($K_d < 1$)

2.11 การคำนวณหาค่า Distribution factor (K_d)

จากการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่มี 3 เฟส โดยมีจำนวนร่องสลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส (g') มากกว่า 1 ร่องสลิต ในรูปที่ 2.18 จะมีค่าจำนวนร่องสลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส เท่ากับ 3 ร่องสลิต ซึ่งจะแสดงถึงเวกเตอร์ 3 ตัวรวมกันโดยแต่ละเวกเตอร์ แต่ละตัวจะทำมุมกับค่าความกว้างของร่องสลิต (γ) และหาเวกเตอร์ลัพธ์



รูปที่ 2.18 การกระจายของขดลวดในแต่ละเฟส 3 ร่องสลิตต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส

จาก $\triangle OAa$;

$$OA = \frac{Aa}{\sin \frac{\gamma}{2}} = \frac{AB}{2 \sin \frac{\gamma}{2}} \quad (2.63)$$

จาก $\triangle OAd$;

$$OA = \frac{Ad}{\sin \frac{3\gamma}{2}} = \frac{AD}{2 \sin \frac{3\gamma}{2}} \quad (2.64)$$

โดยสมการที่ 2.59 เท่ากับ 2.60 จะได้

$$\frac{AB}{2 \sin \frac{\gamma}{2}} = \frac{AD}{2 \sin \left(\frac{3\gamma}{2} \right)} \quad (2.65)$$

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

จากสมการข้างต้น สามารถคำนวณหาค่า Distribution Factor (K_d)

$$K_d = (\text{Phasor sum of each phase}) / (\text{Arithmetic sum of each phase}) \quad (2.67)$$

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

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

$$K_{d,1} = \frac{\sin \left(\frac{\sigma}{2} \right)}{\left(\frac{\sigma}{2} \right) \sin \left(\frac{\gamma}{2} \right)} \quad (2.69)$$

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

$$K_{d,h} = \frac{\sin \left(\frac{h\sigma}{2} \right)}{\left(\frac{\sigma}{2} \right) \sin \left(\frac{h\gamma}{2} \right)} \quad (2.70)$$

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 n ที่ต้องการไม่ให้มีเพื่อค่าสัญญาณขาออกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำรวมที่ได้จากการพันขดลวดอาร์มาเจอร์จะออกมาเป็นคลื่นไซน์

Total flux linkage (λ)

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

$$\lambda = NB_m lr \frac{2}{P} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \rho)] \quad (2.73)$$

แทนค่า α ด้วย ωt เมื่อเครื่องจักรหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω

$$\lambda = NB_m lr \frac{2}{P} [\cos \omega t - \cos(\omega t + \rho)] \quad (2.74)$$

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

$$\lambda = NB_m lr \frac{4}{P} \cos\left(\frac{\pi - \rho}{2}\right) \cos\left(\omega t - \frac{\pi - \rho}{2}\right) \quad (2.75)$$

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.76)$$

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

เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว

$$\phi_p = \int_0^{\pi} (B_m \sin \theta) r \frac{2}{P} d\theta = B_m lr \frac{4}{P} \quad (2.78)$$

สามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้เป็น

$$e = -\omega N \phi_p \cos\left(\frac{\pi - \rho}{2}\right) \sin\left(\omega t - \frac{\pi - \rho}{2}\right) \quad (2.79)$$

หาค่า rms ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้จาก

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

$$= 4.44 f N \phi K_p \quad (2.80)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ($K_{p,n}$)

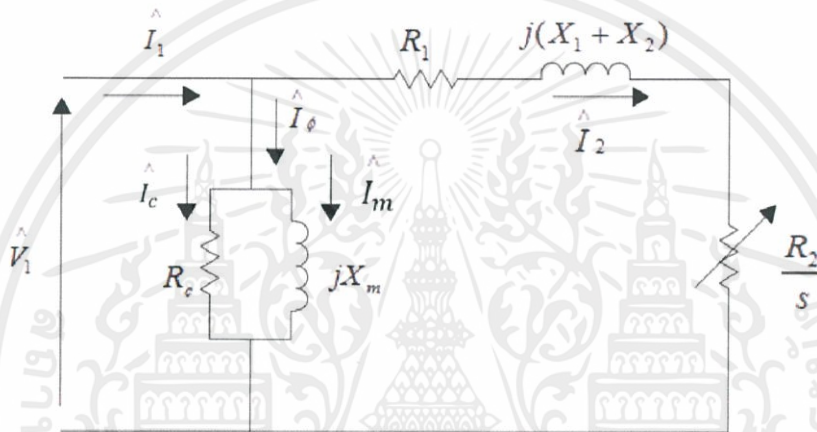
$$K_{p,n} = \sin \frac{n\rho}{2} \quad (2.81)$$

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 วงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

(Approximated Equivalent Circuit of Three-Phase Induction Motor)

ในกรณีที่ต้องการหาค่าโดยประมาณอาจใช้วงจรสมมูลโดยประมาณ (Approximated Equivalent Circuit) ซึ่งเป็นการย้ายส่วนที่เป็นกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กและส่วนของความสูญเสียในแกนเหล็กให้อยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าป้อนเข้าแสดงตามรูปที่ 2.21 ซึ่งในการทดสอบเพื่อหา วงจรสมมูลค่าความสูญเสียทางกลเนื่องจากการหมุนจะรวมกับค่าความสูญเสียจากแกนเหล็กแสดง ออกมาเป็นค่ากำลังสูญเสียคงที่ (Constant power loss : $P_{c, loss}$) เมื่อป้อนเข้าด้วยพิกัดแรงดันไฟฟ้าที่ ทดสอบ



รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

ค่ากระแสไฟฟ้าป้อนเข้า (I_1)

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_2 + \hat{I}_\phi \quad (2.82)$$

ค่ากระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (I_ϕ) ในกรณีวงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

$$\hat{I}_\phi = \frac{\hat{V}_1}{R_c} + \frac{\hat{V}_1}{jX_m} \quad (2.83)$$

และค่ากระแสทางด้านตัวโรเตอร์ที่โอนย้ายมาอยู่ทางด้านตัวสเตเตอร์ (I_2)

$$\hat{I}_2 = \frac{\hat{V}_1}{(R_1 + \frac{R_2}{s}) + j(X_1 + X_2)} \quad (2.84)$$

เมื่อนำมาคำนวณหาค่ากำลังส่งผ่านช่องอากาศ(P_g)

$$P_g = 3I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

ซึ่งสามารถหาค่า Electromagnetic torque(T_e)

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

$$T_e = \frac{1}{\omega_s} \times \frac{3V_1^2}{(R_1 + \frac{R_2}{s}) + (X_1 + X_2)^2} \times \frac{R_2}{s} \quad (2.85)$$

กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า ($P_{i/p}$)

$$P_{i/p} = 3V_1 I_1 \cos \phi_1$$

กำลังทางกลขาออก ($P_{o/p}$)

$$P_{o/p} = T_e \omega_r$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพ (Efficiency) = $\frac{P_{o/p}}{P_{i/p}} \times 100\%$

สรุปจากการคำนวณจากวงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ค่าของแรงบิดขาออก($T_{o/p}$)จะเท่ากับแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก(T_e) สามารถคำนวณหาค่าสลิปที่ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุด($S_{max,T}$)ได้จาก

$$S_{max,T} = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (2.86)$$

แรงบิดสูงสุดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก($T_{e,max}$)จากสมการ

$$T_{e,max} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{3|V_1|^2 (R_1^2 + (X_1 + X_2)^2)^{\frac{1}{2}}}{(R_1 + (X_1 + X_2)^2)^{\frac{1}{2}} + (X_1 + X_2)^2} \quad (2.87)$$

ในการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าป้อนเข้าและแรงบิดที่ความเร็วต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยทราบค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งต้องระบุให้ชัดเจนว่าค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลเป็นแบบใด เป็นวงจรสมมูลแบบมาตรฐานหรือวงจรสมมูลแบบประมาณ

2.14 การทดสอบหาพารามิเตอร์โดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

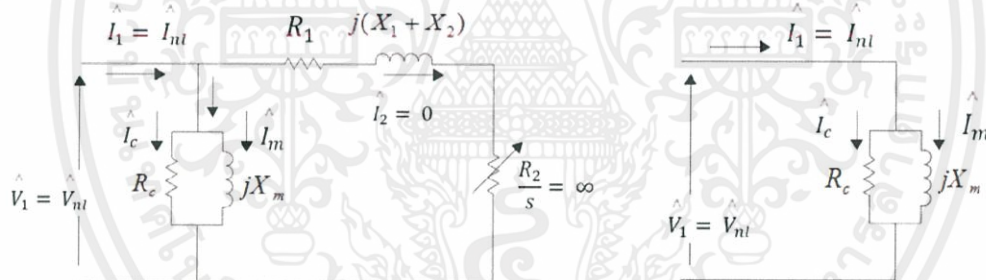
(Testing for Evaluation Approximated Equivalent Circuit of Three-phase Induction Motor)

No-load test จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่อยู่ในภาวะไร้ภาระที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ จะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำความเร็วรอบในการหมุนใกล้เคียงกับ Synchronous speed (n_s) กำลังที่ป้อนเข้ามอเตอร์จะสูญเสียเนื่องจาก

- Core loss (P_c)
- Stator copper loss เนื่องจากกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก
- Mechanical loss

ซึ่งเรียกรวมว่าเป็น Fix loss ข้อมูลที่ได้จากการทำ No-load test คือ P_{nl} , V_{nl} , I_{nl} เป็นค่าต่อเฟส และต่อความเร็วโรเตอร์ (n_r) เข้าใกล้ n_s

เมื่อ $s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \Rightarrow 0$ ดังนั้น $\frac{R_2}{s} \Rightarrow \infty$ ทำให้เปรียบเสมือนปดวงจรทางด้านโรเตอร์ซึ่งกระแส $I_2 \Rightarrow 0$



รูปที่ 2.21 วงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขณะไร้ภาระ

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

$$I_\phi = I_{nl}$$

$$I_m = I_{nl} \sin \phi_{nl}$$

$$I_c = I_{nl} \cos \phi_{nl}$$

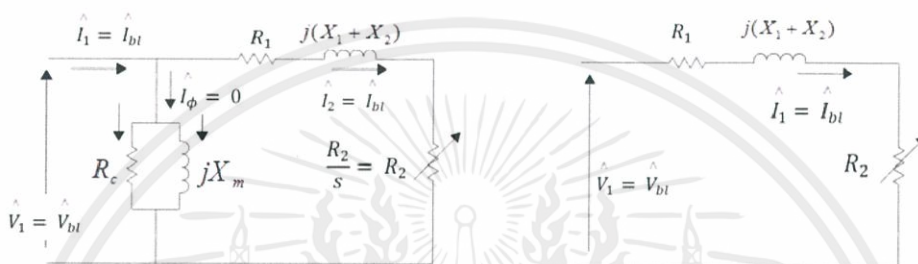
$$R_c = \frac{V_{nl}}{I_c} ; X_m = \frac{V_{nl}}{I_m}$$

Block-rotor test ทำได้โดยการยึดตัวโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้หยุดอยู่กับที่ ($n_r = 0$) แล้วค่อยๆปรับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าจนกระแสไฟฟ้าที่ไหลในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นค่าที่พิกัด (Rated current)

ข้อมูลที่ได้จาก Block-rotor test คือ P_{bl} , V_{bl} , I_{bl} เป็นค่าต่อเฟส

เมื่อ $n_r = 0$; $s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = 1$; และเนื่องจาก V_{bl} มีค่าต่ำกว่าพิกัด ส่งผลให้กระแสกระตุ้น

สนามแม่เหล็กมีค่าน้อย จึงคิดว่า $I_\phi \Rightarrow 0$



รูปที่ 2.22 วงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขณะยึดตัวโรเตอร์

กำหนดให้ $R_{bl} = R_1 + R_2$

$$X_{bl} = X_1 + X_2$$

$$R_{bl} = \frac{P_b}{I_b^2} ; Z_{bl} = \frac{V_{bl}}{I_{bl}} ; X_{bl} = \sqrt{Z_b^2 - R_b^2}$$

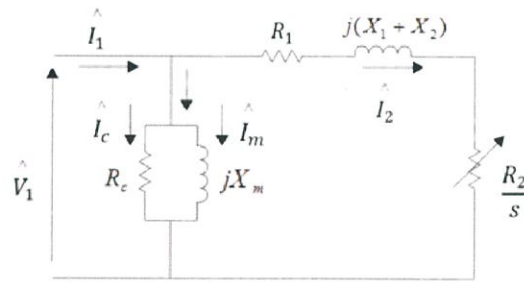
จากการทำ Block-rotor test ได้ค่าความต้านทานออกมาเป็นค่ารวมคือ $R_1 + R_2$ จึงมีความจำเป็นต้องแยก หาค่า R_2 เพื่อใช้ในการคำนวณหา Output Power และ Electromagnetic torque

ดังนั้นในกรณีที่มีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีตัวโรเตอร์แบบกรงกระรอก ไม่สามารถวัดค่า R_2 โดยตรงดังนั้นจึงใช้ V-I method วัดค่า R_1 ที่ตัวสเตเตอร์ หาค่า R_2 โดยการนำค่า R_1 หักลบกับ R_{bl}

ซึ่งจะได้ว่า

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

ในกรณีที่มีแหล่งจ่ายความถี่ไฟฟ้าที่ปรับความถี่ได้ จำทำให้สามารถหาค่า R_2 ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น โดยการลดความถี่ที่ใช้ในการทำการทดสอบ ซึ่งจะได้ Approximated equivalent ออกมาเป็น



เนื่องจากวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำใช้เพื่อคำนวณหาค่าสมรรถนะของมอเตอร์ใช้งานที่ความเร็วใกล้ความเร็วซิงโครนัส ซึ่งจะทำให้ความถี่ไฟฟ้าที่ตัวนำบนโรเตอร์ต่ำ ดังนั้นเพื่อความแม่นยำในการคำนวณ ทำให้มีการปรับความถี่ไฟฟ้าป้อนเข้าขณะทำการทดสอบแบบยึดตัวโรเตอร์ โดยลดความถี่ลงเหลือเพียงหนึ่งในสี่ของพิกัดความถี่ เพื่อลดผลของ skin-effect ที่ทำให้ค่าความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

บทนำ

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่สำคัญของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำสามเฟส ในบทนี้จะนำทฤษฎีพื้นฐานเหล่านั้น มาประยุกต์ใช้ในการทดลองในบทนี้ เช่น การหาวงจรมมูล โดยประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำ, การศึกษาคุณลักษณะของมอเตอร์ และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์ระหว่างขดลวดมอเตอร์แบบเดิมกับขดลวดมอเตอร์แบบใหม่ ซึ่งในการทดสอบค่าต่างๆ ควรจะทราบ ค่าองค์ประกอบพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับนั้นๆ ดังนี้

เครื่องจักรกลที่ใช้นั้นเป็นชนิดเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำแบบสามเฟส โดย Rotor เป็นแบบ wound rotor และ squirrel cage rotor

เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำแบบสามเฟสแบบ wound rotor

จำนวนขั้วแม่เหล็ก	4 pole	l (length)	= 8.05 cm
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 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบ Wound rotor



รูปที่ 3.2 นามเพลทของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบ Wound rotor

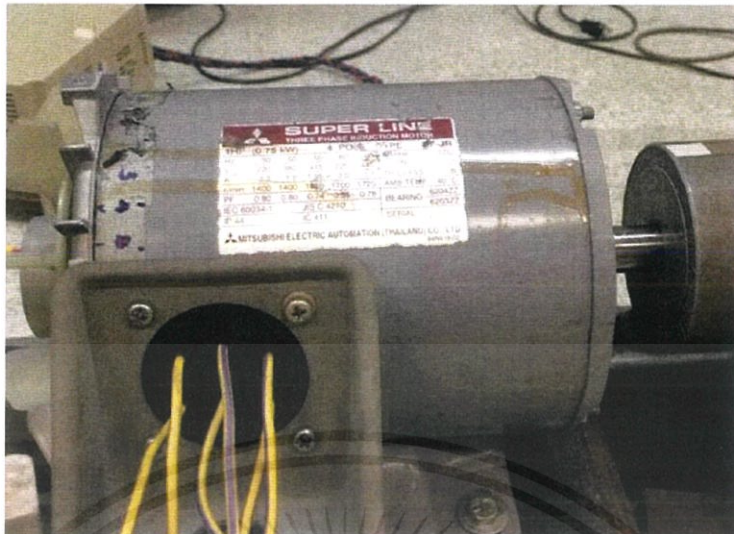
เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำแบบสามเฟสแบบ squirrel cage rotor แบ่งเป็นการพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต และการพันขดลวดตามการออกแบบใหม่

ขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิตเบอร์ SWG 22 (พื้นที่หน้าตัด 0.3973 mm^2) พัน 72 รอบ

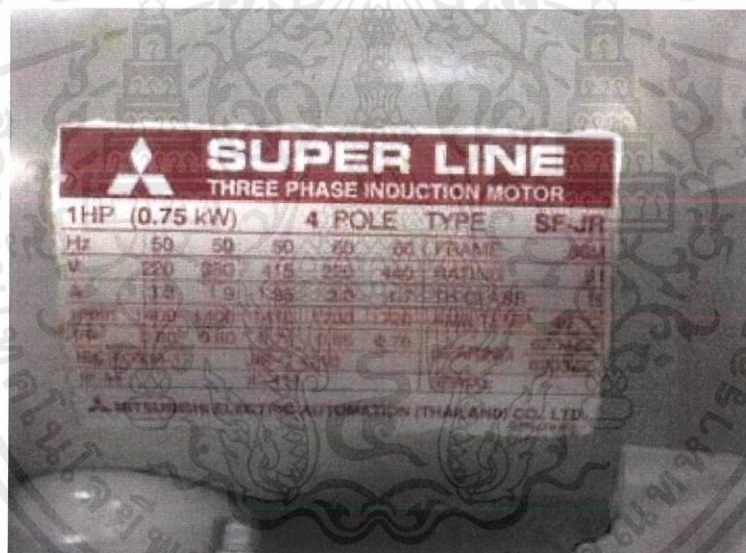
จำนวนขั้วแม่เหล็ก	4 pole	ความถี่	50	Hz
แรงดัน	220 V	กระแส	1.9	A
ความเร็ว	1400 rpm	ขนาดกำลัง	750	W

ขดลวดตามการออกแบบใหม่เบอร์ SWG 20 (พื้นที่หน้าตัด 0.6576 mm^2) พัน 36 รอบ

จำนวนขั้วแม่เหล็ก	4 pole	ความถี่	50	Hz
แรงดัน	110 V	กระแส	3.14	A
ความเร็ว	1400 rpm	ขนาดกำลัง	1241	W



รูปที่ 3.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส



รูปที่ 3.4 เนมเพลทของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์การทดลอง

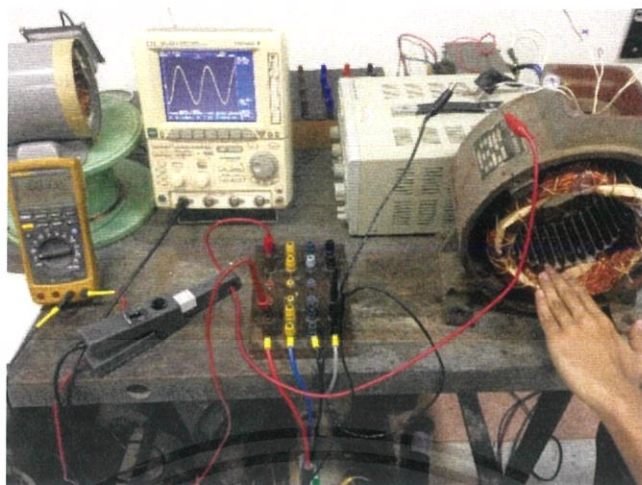
1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสแบบ wound rotor และ squirrel cage rotor
2. DC Generator
3. Scope
4. Tachometer
5. Digital clamp-on tester
6. Voltage probe
7. DC power supply
8. Torque detector
9. Inverter
10. Torque meter
11. Junction box
12. โหลดหลอดไฟฟ้า
13. Current probe
14. Bridge rectifier
15. Multi-meter
16. Variable voltage transformer

3.1 การหาตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์ของแต่ละเฟส (wound rotor)

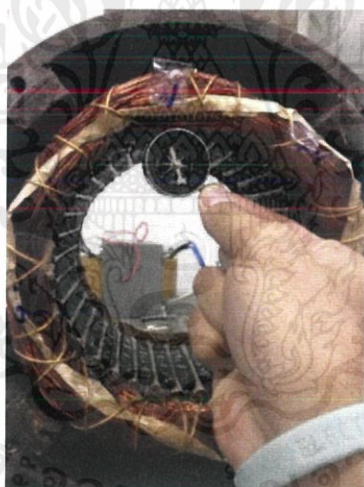
ในที่นี้มีมอเตอร์ที่ได้ใช้ในการทำการทดสอบมีการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ไว้แล้ว โดยที่ไม่ทราบว่าปลายสายใดเป็นสายไลน์หรือนิวทรัลของเฟสใด ซึ่งสามารถทำการทดสอบได้โดยการใช้มัลติมิเตอร์วัดค่าความต้านทานของขดลวดนั้นๆ โดยจะทราบได้จากถ้าเป็นคู่สายไลน์-นิวทรัลของเฟสเดียวกันจะมีค่าความต้านทาน แต่ถ้าไม่เป็นคู่สายไลน์-นิวทรัลของเฟสเดียวกันจะมีค่าความต้านทานมากจนเป็นอนันต์

จากนั้นทำการหาตำแหน่งของขดลวดอาร์มาเจอร์สเตเตอร์ในแต่ละเฟสโดยการจ่ายไฟฟ้ากระแส สลับขนาด 60 โวลต์ เข้าที่ปลายคู่สายไลน์-นิวทรัลของแต่ละเฟส ดังรูป 3.5 จะสังเกตได้ว่าขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ของเฟสที่จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 60 โวลต์ นั้นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากเดิม ทำให้ทราบตำแหน่งของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ของแต่ละเฟสได้

เมื่อทราบตำแหน่งของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ของแต่ละเฟสแล้วจะทำการหาทิศทางการไหลของกระแสในขดลวดโดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 แอมแปร์ เข้าที่ปลายสายของขดลวด อาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ที่ละเฟส และใช้เข็มทิศในการตรวจสอบทิศทางสนามแม่เหล็ก ถ้าป้อนไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 แอมแปร์ เข้าถูกทิศทางเข็มทิศจะชี้ออกตัวมอเตอร์ดังรูป 3.6



รูปที่ 3.5 การหาค่าตำแหน่งขดลวด



รูปที่ 3.6 การหาทิศทางการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดสอบหาคณลัษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน (wound rotor)

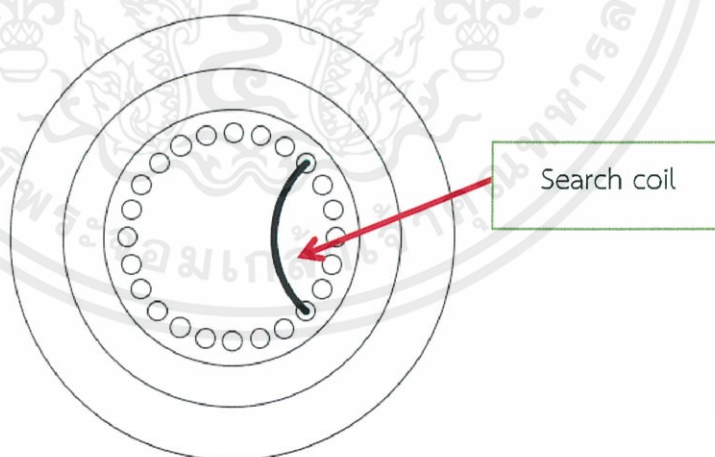
3.2.1 กรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส

การทดสอบนี้จะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวเข้าสู่สเตเตอร์ โดยกระแสไฟฟ้าเฟสเดียวจะสร้างฟลักซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำการใส่ขดลวดค้นหาเข้าที่โรเตอร์ดังรูปที่ 3.7 และทำการหมุนโรเตอร์ไป 0-360 องศาทางกลหรือ 0-720 องศาทางไฟฟ้าเนื่องจากมีขั้วแม่เหล็กทั้งหมด 4 ขั้วพร้อมทั้งจ่ายแรงดัน 10 V และ 20 V และพันขดลวดค้นหาจำนวน 2 และ 3 รอบเพื่อวิเคราะห์แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะสามารถบอกขนาดของสนามแม่เหล็กได้จากสมการที่ 3.1 ($e = -\omega N \phi_p \sin \omega t$) จะเห็นว่ามีพจน์ของฟลักซ์ต่อขั้ว (ϕ_p) เมื่อ ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งที่หมุนโรเตอร์ และจะทราบค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจากขดลวดค้นหาที่อ่านได้จาก oscilloscope

3.2.2 กรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส

ทำการทดลองเหมือนกับหัวข้อ 3.2.1 แต่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าสู่สเตเตอร์ แทนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส และทำการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จาก search coil

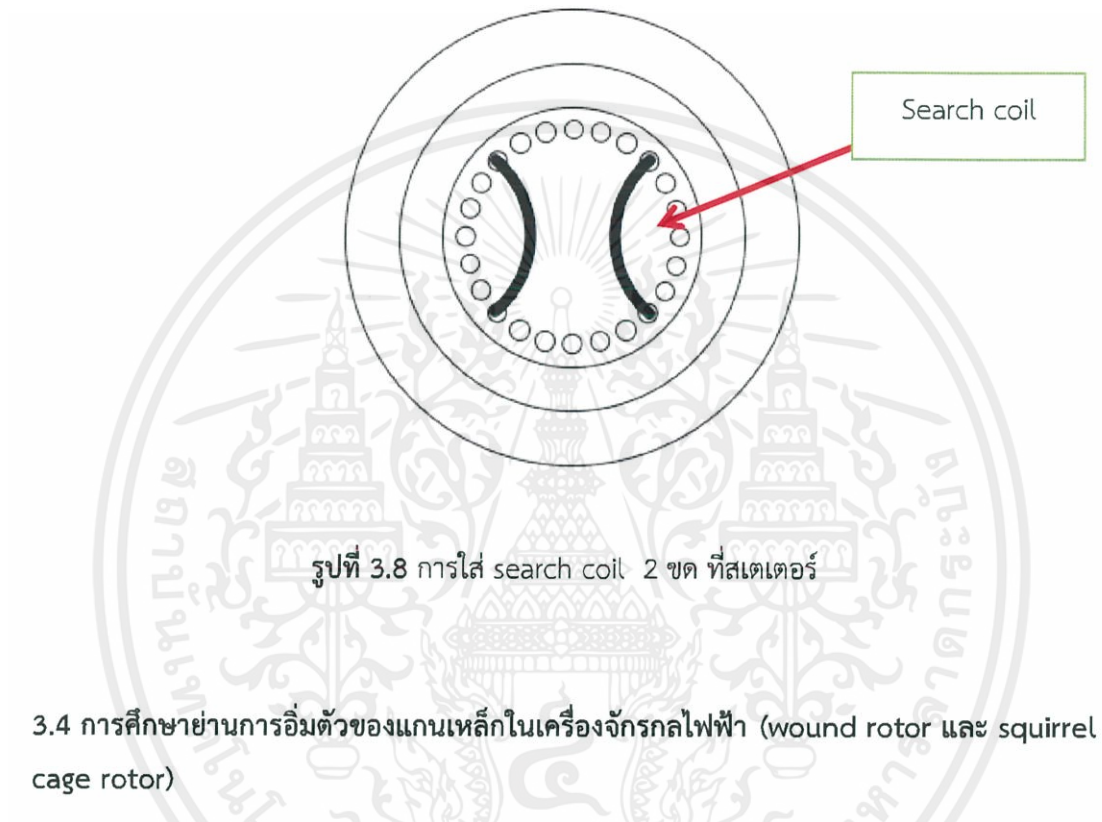
$$e = -\omega N \phi_p \sin \omega t \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.7 การใส่ search coil ที่สเตเตอร์

3.2.3 พันขดลวดค้นหา (Search coil) 2 ขด ห่างกัน 360 องศาทางไฟฟ้า

จากการทดลองในหัวข้อ 3.2.2 จะเห็นได้ว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำควรมีค่าคงที่ในทุกองศาที่ทำการหมุนโรเตอร์ไป แต่จากผลการทดลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้มีค่าไม่คงที่เมื่อหมุนโรเตอร์ ดังนั้นจึงทำการพันขดลวดค้นหาเพิ่มจากเดิมอีก 1 ขด ห่างจากขดเดิม 360 องศาทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.8 การใส่ search coil 2 ขด ที่สเตเตอร์

3.4 การศึกษาขบวนการอิมตัวของแกนเหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า (wound rotor และ squirrel cage rotor)

การทดสอบนี้มีความสำคัญต่อการทดสอบอื่นๆซึ่งจะสามารถทราบค่าแรงดันที่มากที่สุดที่จะไม่ทำให้แกนเหล็กที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของเครื่องจักรกลไฟฟ้าอิมตัวได้ โดยจะอ้างอิงจากความสัมพันธ์ระหว่าง Magnetic flux density (B) กับ Magnetic field intensity (H) จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมของสารที่นำมาใช้เป็นวงจรมแม่เหล็กและรวมถึงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ของสารกลุ่มเดียวกันยังไม่เป็นเชิงเส้นตลอดช่วงการใช้งาน

ดังนั้นจึงนิยมใช้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ของแกนเหล็กเมื่อกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับจะได้ความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุด (B_m) กับค่า rms exiting current per meter (H_{rms}) แต่ในการทดสอบนี้จะใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย (V) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I) เป็นตัวแทนของ B-H curve เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าแหล่งจ่าย (I) แปรผันโดยตรงกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H)

$$Ni = HI \quad (3.2)$$

โดย H = ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity)

l = Average length

Ni = Magneto-motive force (mmf)

จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.2 ส่งผลให้สามารถแทนค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ด้วยกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย (I) ได้

จากความสัมพันธ์ดังสมการ $\phi = \frac{2}{P} 2B_m l r$ จะเห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้า (V) จะมีความสัมพันธ์กับค่าฟลักซ์ต่อขั้ว โดยที่ค่าฟลักซ์ต่อขั้วก็มีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด (B_m) ดังสมการ $\phi = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} B_m \cos \theta r d\theta = 2B_m l r$

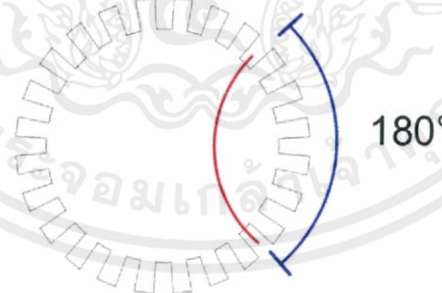
เพราะฉะนั้นจึงแทน B-H curve ด้วย V-I curve ซึ่งทำการทดสอบได้โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์และใช้ voltage probe, current probe อ่านค่าจาก oscilloscope โดยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าทีละขั้นๆ ละ 20 V เพื่อวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่เกิดขึ้น และพล็อตกราฟ V-I curve เพื่อวิเคราะห์จุดอิ่มตัวของแกนเหล็กซึ่งเป็นตัวบ่งบอกแรงดันพิกัดที่เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่กำลังทดสอบได้

3.4 การหาจำนวนรอบขดลวด (wound rotor)

เนื่องจากจำนวนรอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของส่วนประกอบที่ต้องทราบ โดยเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่เป็นตัวต้นแบบนั้นไม่มีแบบการพันของเครื่อง จึงมีความจำเป็นต้องหาวิธีวิเคราะห์และหาจำนวนรอบที่แท้จริงของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้ขดลวดค้นหา ซึ่งเป็นวิธีการที่สะดวก เนื่องจากไม่ทราบทั้งจำนวนขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์และจำนวนขดลวดอาร์มาเจอร์ที่โรเตอร์ จึงใช้ขดลวดค้นหาที่ทราบจำนวนรอบเป็นตัวกลางในการหาจำนวนรอบของขดลวดอาร์มาเจอร์ทั้งสองขด เนื่องจากจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเข้าที่ขดลวดฝั่งสเตเตอร์ ตามทฤษฎีของสนามแม่เหล็กหมุนจะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่มีขนาด 1.5 เท่ากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กของแต่ละเฟส เมื่อแรงเคลื่อนแม่เหล็กดังกล่าวเคลื่อนที่ผ่านช่องอากาศและผ่านขดลวดค้นหาดังกล่าวแล้ว จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ขดลวดค้นหาโดยค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วที่อยู่ในช่องอากาศมีค่าเท่ากันจึงสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3.3 แต่ต้องคูณด้วย 1.5 เนื่องจากค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กของฝั่งแหล่งจ่ายในสูตรเป็นค่าที่คิดจากกรณี 1 เฟสแต่ในความเป็นจริงค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กเป็น 1.5 เท่าของแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อเฟสดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

$$\frac{E_{af1}}{4.44 f N_{ph1} K_w1} = \frac{\frac{3}{2} E_{af2}}{4.44 f N_{ph2} K_w2} \quad (3.3)$$

โดยพันจำนวนรอบของขดลวดค้นหา 2 รอบ หรือ $N_{ph,searchcoil} = 2$ ดังรูปที่ 3.9 โดยจะวางระยะขดลวด 180 องศาทางไฟฟ้าเพื่อให้อยู่ในลักษณะหนึ่งขั้วแม่เหล็ก



รูปที่ 3.9 ภาพจำลองการใส่ Search coil ในร่องสลอตของโรเตอร์

โดยจะเก็บค่าจาก oscilloscope และใช้ voltage probe และ current probe เพื่อป้องกันกระแสที่อาจจะเกินกระแสพิคกิ้งของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่จะรับได้ ซึ่งจะวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สเตเตอร์, โรเตอร์, ขดลวดค้นหา และคำนวณค่าที่ได้ดังสมการที่ 3.3

3.5 การทดสอบหาวจรสมมูลโดยประมาณ (squirrel cage rotor)

No-load test

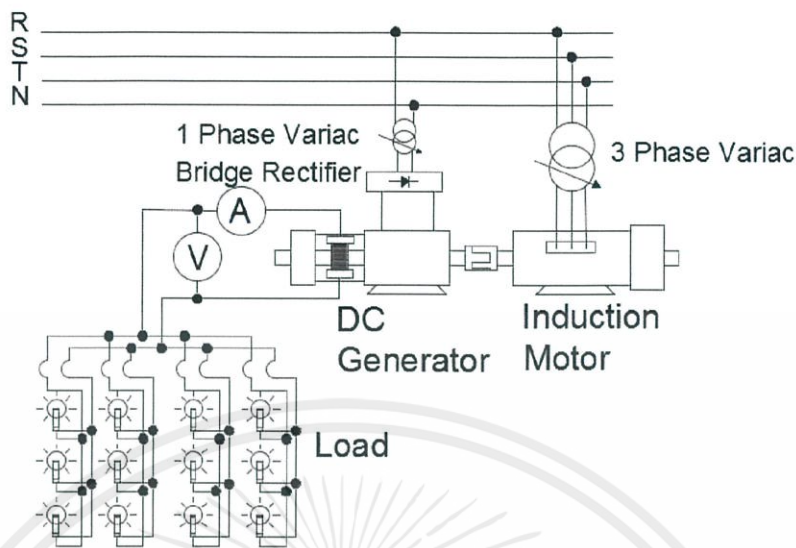
จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่อยู่ใกล้สภาวะไร้อภาระที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ จะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีความเร็วรอบในการหมุนใกล้เคียงกับ Synchronous speed (n_s) โดยทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ตัวประกอบกำลัง และความเร็ว เพื่อนำมาคำนวณหาค่า Impedance ของแกนเหล็ก

Block-rotor test

ทำโดยการยึดโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้หยุดอยู่กับที่ ($n_r = 0$) แล้วค่อยๆปรับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าจนกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นค่าที่พิกัด (Rated current) แล้ววัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ตัวประกอบกำลัง เพื่อนำมาคำนวณหาค่า R_{br} แต่ความต้านทานที่ได้มานั้นจะได้เป็น $R_1 + R_2$ ดังนั้นจึงต้องหาค่า R_1 ที่ตัวสเตเตอร์ จาก V-I method, หาค่า R_2 จากสมการ $R_2 = R_{br} - R_1$

3.6 จ่ายแรงดันเพื่อขับมอเตอร์ที่แรงดัน 220 V, 50 Hz (squirrel cage rotor)

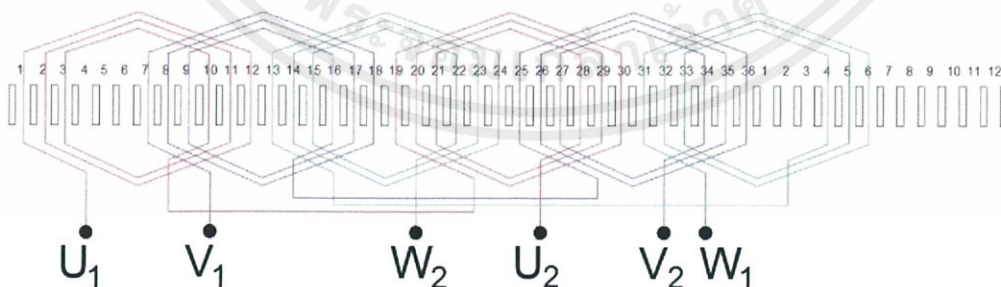
หัวข้อนี้เป็นการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสที่แรงดัน 220 V 50 Hz เข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เพื่อขับ DC Generator ที่ต่อแบบ Compound และมีชุดหลอดไฟฟ้าต่ออยู่ โดยทางด้านขาเข้าวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และตัวประกอบกำลัง ส่วนทางด้านขาออกที่ออกจาก DC Generator วัดค่า แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า แรงบิด และความเร็ว จากนั้นทำการทดลองที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ คือ 0%, 50%, 75% และ 100% ของโหลด แล้วนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าขาออกเพื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพ โดยจะนำค่าประสิทธิภาพไปเปรียบเทียบกับค่าของมอเตอร์หลังการพันขดลวดตามการออกแบบใหม่



รูปที่ 3.10 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

3.7 การพันมอเตอร์ (squirrel cage rotor)

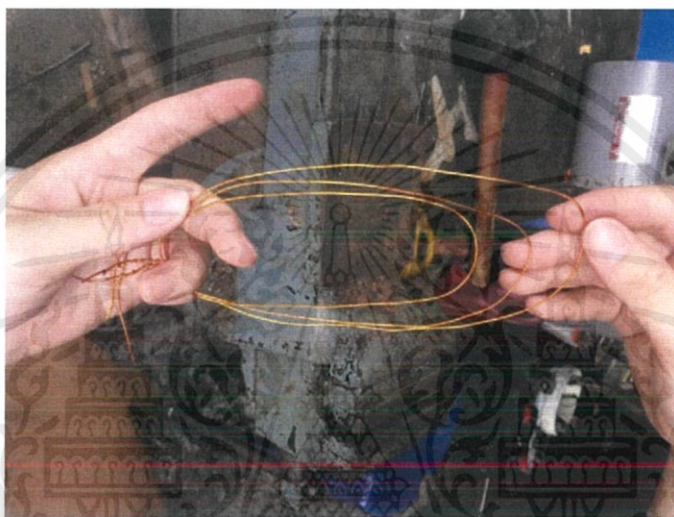
ในหัวข้อการพันมอเตอร์นี้เป็นการถอดขดลวดที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าออกเพื่อศึกษาวิธีการพันขดลวดว่าเป็นแบบใดและวัดขนาดของขดลวดเดิมที่พัน จากนั้นทำการเลือกขดลวดใหม่ให้มีขนาดประมาณ 2 เท่าจากเดิมแล้วทำการพันขดลวดเข้าที่สเตเตอร์แบบเดิม โดยจากการถอดนั้นทำให้ทราบว่าเป็นการพันมอเตอร์แบบ Shell coil ดังรูป



รูปที่ 3.11 การพันมอเตอร์แบบ Shell coil

ขั้นตอนการพัน

- วัดความยาวของขดลวดให้ได้ขนาดของความกว้างร่องสลิตที่ต้องการพันทั้ง 3 ขนาด
- ทำการพันขดลวดโดยพันจำนวนรอบ 36 รอบ แบบ shell coil
- ทำการพันขดลวดแบบเดิมซ้ำจนครบ 6 ชุด
- นำขดลวดทั้ง 6 ชุดไปวางที่ตำแหน่งและเชื่อมแต่ละเฟสดังรูปที่ 3.11
- ทาน้ำยวานิชเพื่อเคลือบขดลวดที่พันทั้งหมด

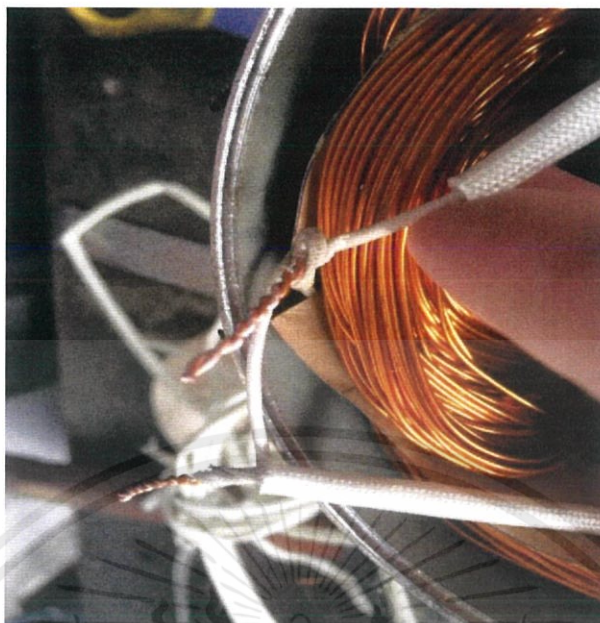


รูปที่ 3.12 ขนาดของความกว้างร่องสลิตที่ต้องการพันทั้ง 3 ขนาด

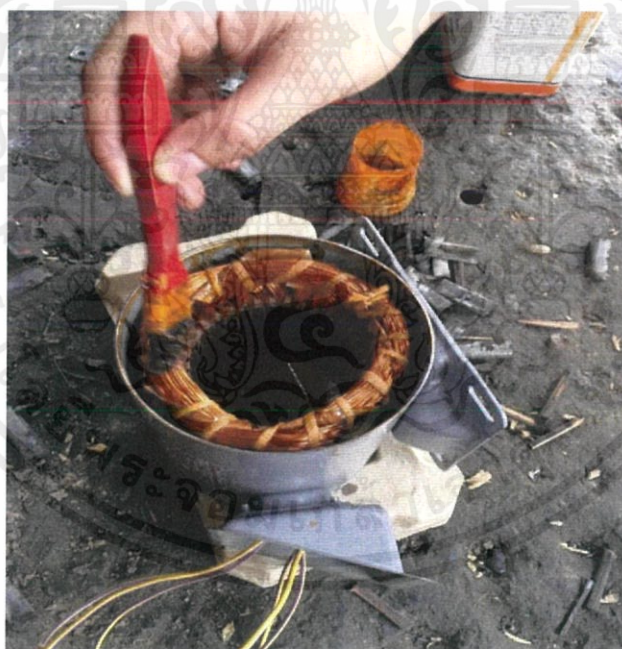


รูปที่ 3.13 การนำขดลวดวางลงในร่องสลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 การเชื่อมขดลวดไนแต่ละเฟส



รูปที่ 3.15 การเคลือบด้วยน้ำยาวานิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 จ่ายแรงดันเพื่อขับมอเตอร์ที่แรงดัน 110 V 50 Hz และแรงดัน 220 V 100 Hz (squirrel cage rotor)

หลังจากพันมอเตอร์ใหม่โดยลดจำนวนรอบลงครึ่งหนึ่งและเพิ่มขนาดลวดขด ทำให้มอเตอร์สามารถรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้แค่ 110 V ที่ความถี่ 50 Hz แต่ถ้าต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ 220 V ค่าความถี่จะต้องเป็นสองเท่าคือ 100 Hz เพื่อจะทำให้ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กคงที่ จากนั้นทำการวัดค่าต่างๆตามหัวข้อ 3.6 แล้วนำค่าต่างๆที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพเพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพก่อนการพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิตเพื่อศึกษาผลการทดลองที่ได้



บทที่ 4

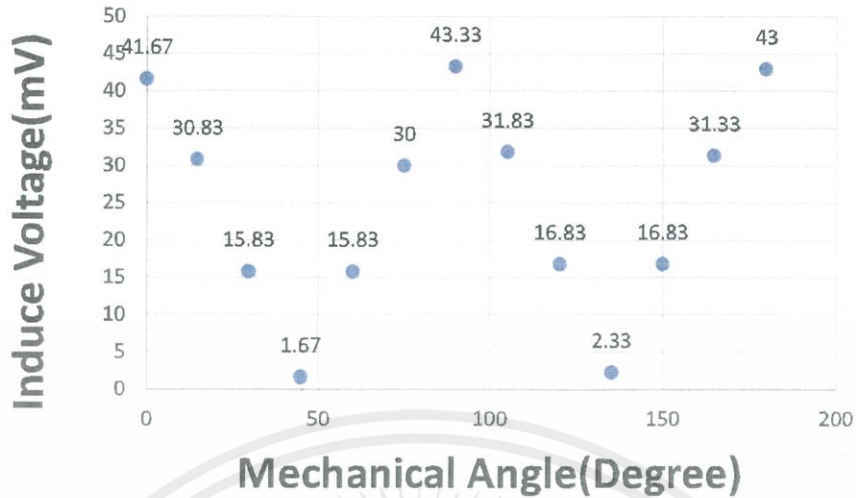
ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน

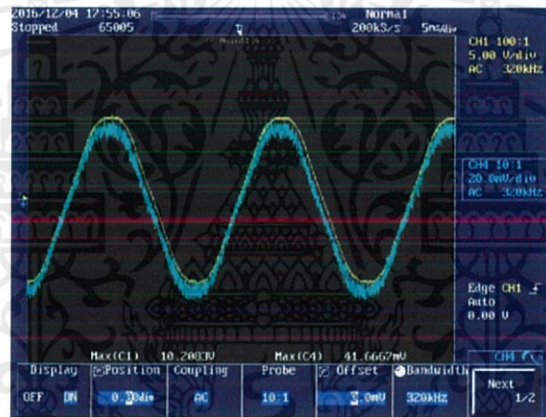
4.1.1 กรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองกรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส

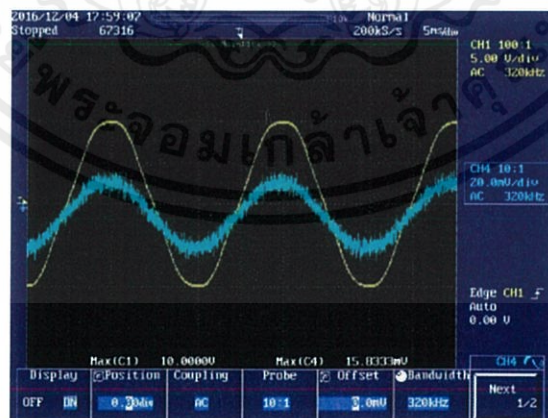
Mechanical Angle (degree)	Induce Voltage (mV)
0	41.67
15	30.83
30	15.83
45	1.67
60	15.83
75	30
90	43.33
105	31.83
120	16.83
135	2.33
150	16.83
165	31.33
180	43



รูปที่ 4.1 กราฟแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและมุมทางกลกรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส

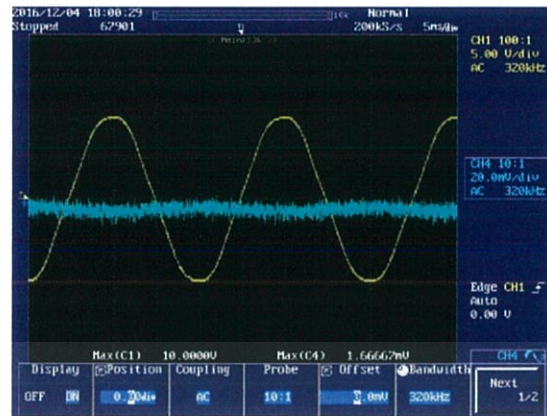


รูปที่ 4.2 สัญญาณแรงดันขาเข้าหนึ่งเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 0°



รูปที่ 4.3 สัญญาณแรงดันขาเข้าหนึ่งเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 30°

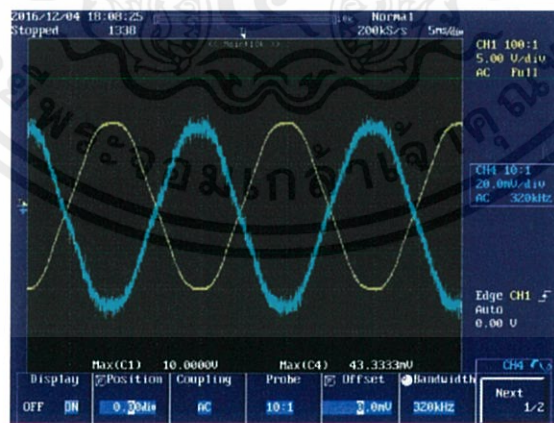
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 สัญญาณแรงดันขาเข้าหนึ่งเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 45°



รูปที่ 4.5 สัญญาณแรงดันขาเข้าหนึ่งเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 60°



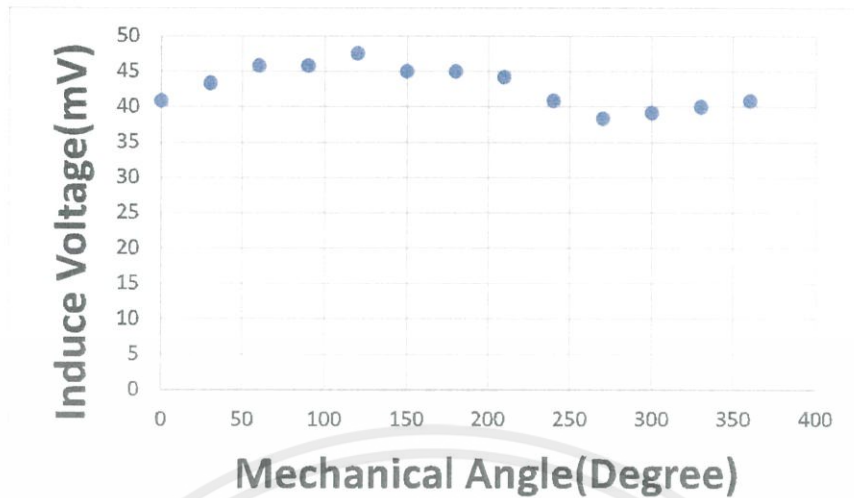
รูปที่ 4.6 สัญญาณแรงดันขาเข้าหนึ่งเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 90°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

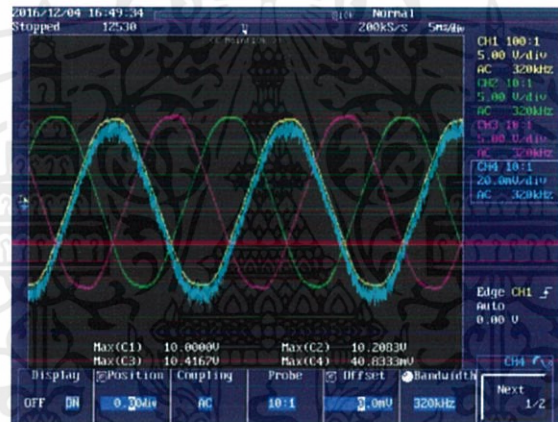
4.1.2 กรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองกรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส

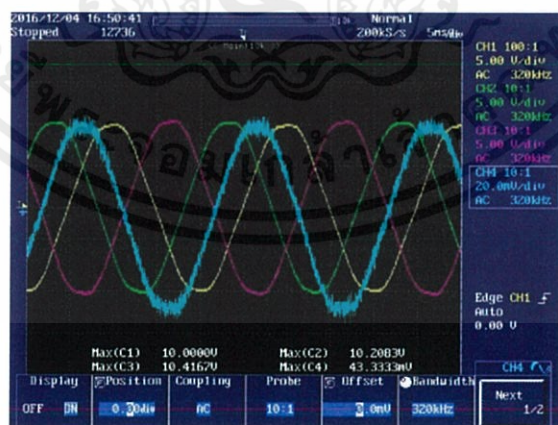
Mechanical Angle (degree)	Induce Voltage (mV)
0	40.833
30	43.3333
60	45.8333
90	45.8333
120	47.5000
150	45.0000
180	45.0000
210	44.1667
240	40.8333
270	38.3333
300	39.1667
330	40.0000
360	40.8333



รูปที่ 4.7 กราฟแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและมุมทางกลกรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส

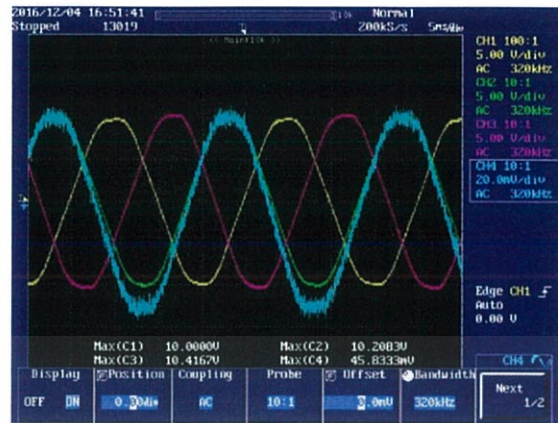


รูปที่ 4.8 สัญญาณแรงดันขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 0°

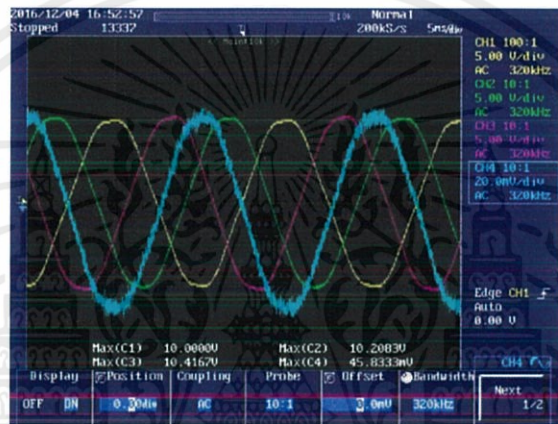


รูปที่ 4.9 สัญญาณแรงดันขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 30°

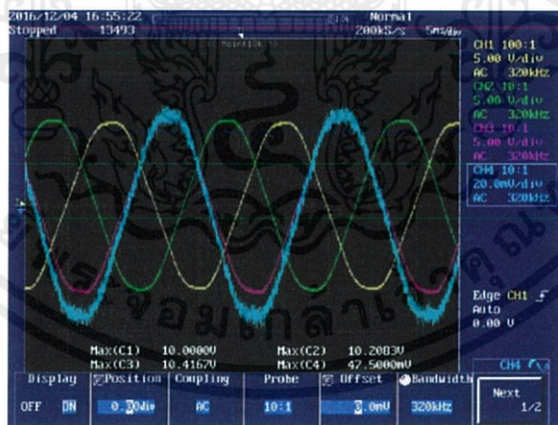
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 สัญญาณแรงดันขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 60°



รูปที่ 4.11 สัญญาณแรงดันขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 90°



รูปที่ 4.12 สัญญาณแรงดันขาเข้าสามเฟสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มุม 120°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 เปรียบเทียบค่าแรงดันเหนี่ยวนำระหว่างมอเตอร์แบบดั้งเดิมและที่ออกแบบใหม่

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าแรงดันเหนี่ยวนำระหว่างมอเตอร์แบบดั้งเดิมและที่ออกแบบใหม่

Mechanical Angle (degree)	Induce Voltage (mV)	
	มอเตอร์แบบดั้งเดิม	มอเตอร์ที่ออกแบบใหม่
0	49.98	99.85
30	50.13	100.02
60	50.56	101.54
90	52.24	101.95

อภิปรายผลการทดลอง

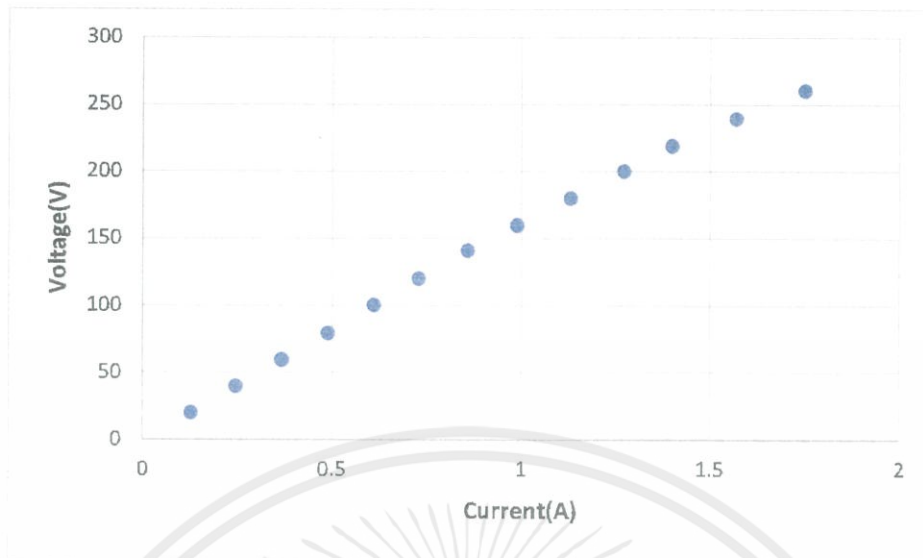
เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส และทำการหมุนโรเตอร์ไปที่ตำแหน่งต่างๆ จะมีการเปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูป 4.2 ถึง 4.6 เหตุที่ทำให้เป็นเช่นนี้เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (E) จะเปลี่ยนแปลงตามค่าฟลักซ์ (ϕ) และค่าฟลักซ์เป็นไปตาม sine-function ดังนั้นเมื่อหมุนโรเตอร์ไปที่มุมต่างๆ จะทำให้ค่า Induce voltage มีดังรูป 4.1

แต่เมื่อจ่ายด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส และทำการหมุนโรเตอร์ไปที่ตำแหน่งต่างๆ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีค่าค่อนข้างคงที่ ดังรูป 4.8 ถึง 4.12 เพราะว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ลัทธิ (F_{total}) ในทุกตำแหน่งมีค่าเท่ากัน ดังนั้น ไม่ว่าจะหมุนโรเตอร์ไปตำแหน่งใดก็ตามค่า Induce voltage ต้องมีค่าใกล้เคียงกันทุกจุด ดังรูป 4.7 และจากตาราง 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการลดจำนวนรอบของขดลวดอาร์มาเจอร์ลงครึ่งหนึ่ง ค่าแรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นประมาณสองเท่า เป็นไปตามสมการ 2.58 ($E = 4.44 f N_c \phi_p$)

4.2 การศึกษาย่านการอิมตัวของแกนเหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองย่านการอิมตัวของแกนเหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

Current(A)	Voltage(V)
0.13	20
0.25	39.9
0.37	59.6
0.49	79.5
0.61	100.5
0.73	120.1
0.86	140.8
0.99	159.9
1.13	179.9
1.27	200.1
1.4	219.03
1.57	239.35
1.75	260.3



รูปที่ 4.13 กราฟแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

อภิปรายผลการทดลอง

จากกราฟจะเห็นได้ว่าในช่วงแรงดันไฟฟ้า 0-220 V กระแสจะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น โดยเพิ่มประมาณ 0.12 A ในทุกๆ 20 V ซึ่งหมายความว่าแกนเหล็กยังไม่อิ่มตัว แต่ในช่วงแรงดันตั้งแต่ 220 V ขึ้นไป กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 0.17 ในทุกๆ 20 V นั้นหมายความว่าแกนเหล็กอิ่มตัวในช่วงแรงดันมากกว่า 220 V ดังนั้น ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กอิ่มตัวที่แรงดันประมาณ 220 โดยประมาณ

4.3 ผลการทดสอบหาจรรยาบรรณโดยประมาณ(การพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต)

No-load test

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลอง No-load test (การพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต)

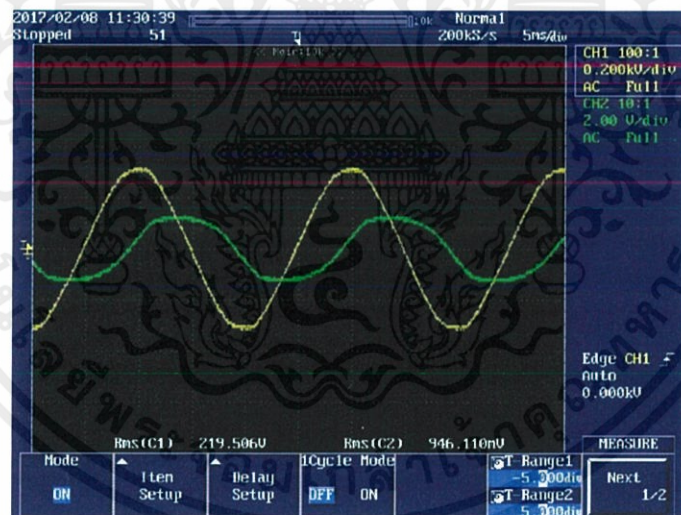
Voltage(V)	Current(V)	Power factor	Speed(rpm)
219.50	0.95	0.31	1498

Block-rotor test

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลอง Block-rotor test (การพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต)

Voltage(V)	Current(A)	Power factor
49.84	1.89	0.81

นำค่าที่ได้จาก No-load test และ Block-rotor test มาคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามวิธีในหัวข้อที่ 2.14



รูปที่ 4.14 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก No-load test

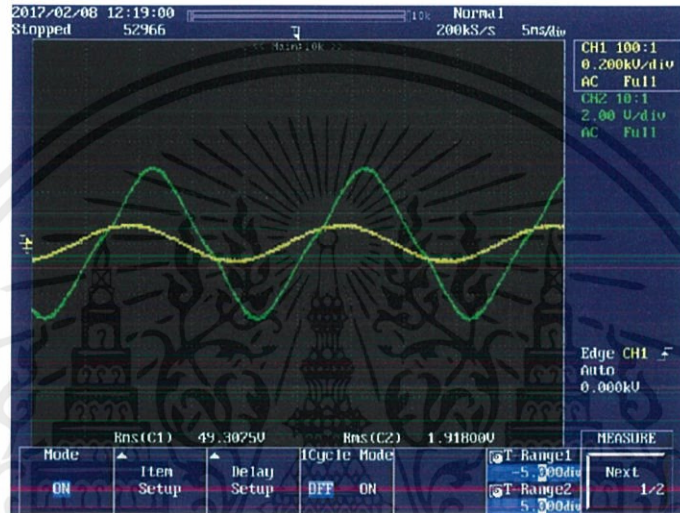
จะได้

$$I_c = 0.95 \cos 72^\circ = 0.29 \quad \text{A}$$

$$I_m = 0.95 \sin 72^\circ = 0.90 \quad \text{A}$$

$$R_c = \frac{V_{ni}}{I_c} = 757 \quad \text{ohm/phase}$$

$$X_m = \frac{V_{ni}}{I_m} = 244 \quad \text{ohm/phase}$$



รูปที่ 4.15 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก Block-rotor test

$$Z_{bl} = \frac{V_{bl}}{I_{bl}} = \frac{49.84 \angle 0^\circ}{1.89 \angle -36^\circ} = 21.33 + j15.5 \quad \text{ohm/phase}$$

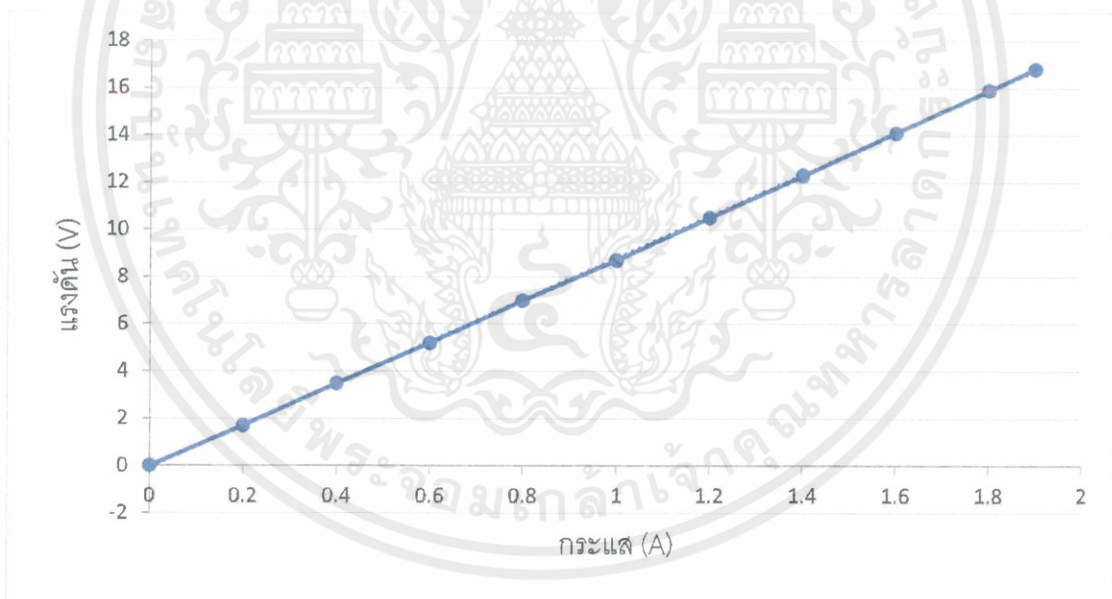
ดังนั้น

$$R_1 + R_2 = 21.33 \quad \text{ohm/phase}$$

$$X_1 + X_2 = 15.5 \quad \text{ohm/phase}$$

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (การผันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต)

Current(V)	Voltage(V)
0.20	1.70
0.40	3.50
0.60	5.20
0.80	7.00
1.00	8.70
1.20	10.50
1.40	12.30
1.60	14.10
1.80	15.90
1.90	16.80



รูปที่ 4.16 กราฟแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะจ่าย DC power supply

(การผันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต)

จะได้ค่า

$$\text{Slope} = R_1 = 8.74$$

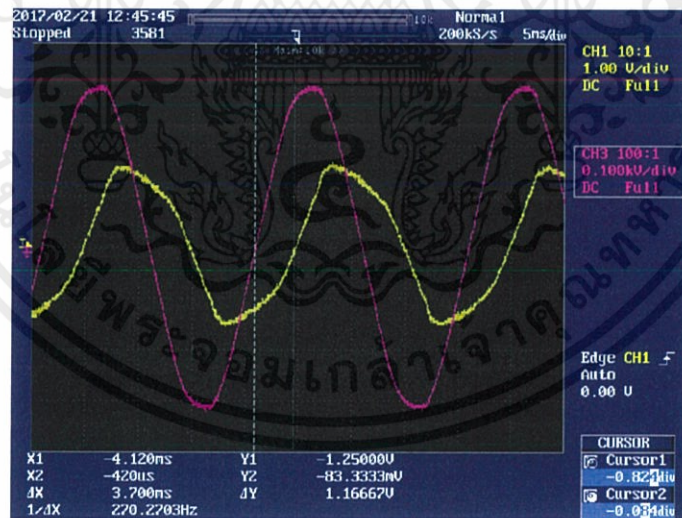
ohm/phase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

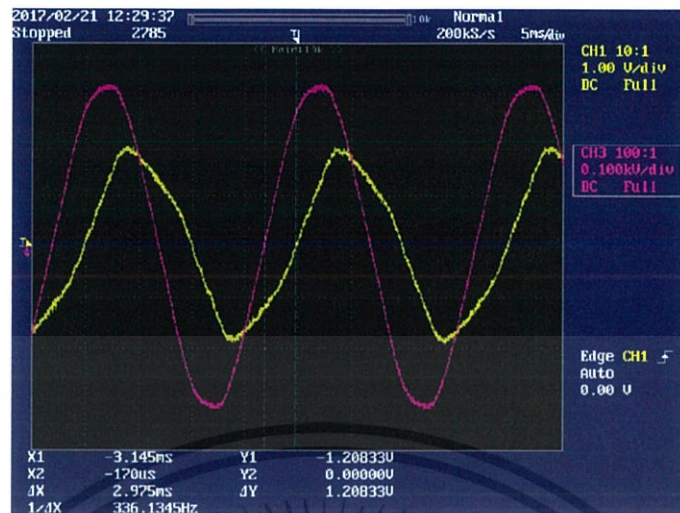
4.4 ผลการทดลองจ่ายแรงดันเพื่อขับมอเตอร์ที่แรงดัน 220 V 50 Hz (การพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต)

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองจ่ายแรงดันมอเตอร์ที่แรงดัน 220 V 50 Hz (การพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต)

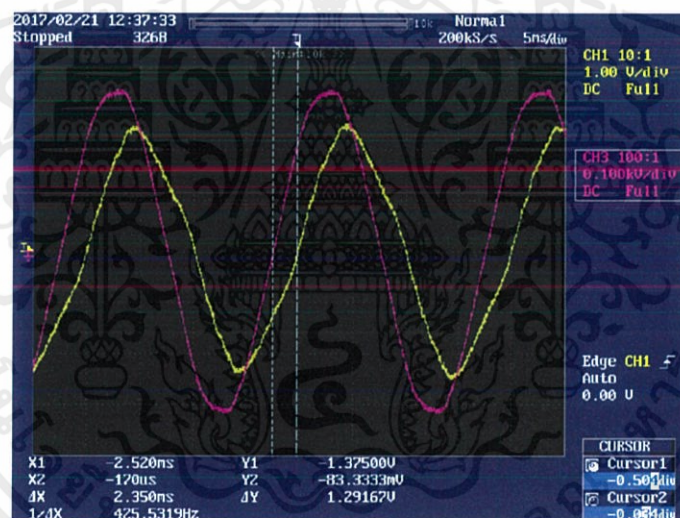
% Load (approximately)		No-load	50	75	100
AC	Voltage (V)	226.13	224.42	224.50	226.50
	Current (A)	1.11	1.26	1.63	1.80
	Power factor	0.40	0.59	0.74	0.78
	Power input (W)	301.21	500.50	812.40	1022.90
DC	Voltage (V)	226.00	218.90	210.52	206.95
	Current (A)	0.10	1.00	2.20	2.90
Speed (rpm)		1478	1455	1422	1401
Torque (N.m)		1.40	2.50	4.20	5.50
Power output (W)		232.16	365.70	625.43	807.00
Efficiency (%)		72	73	77	79



รูปที่ 4.17 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ 0% load

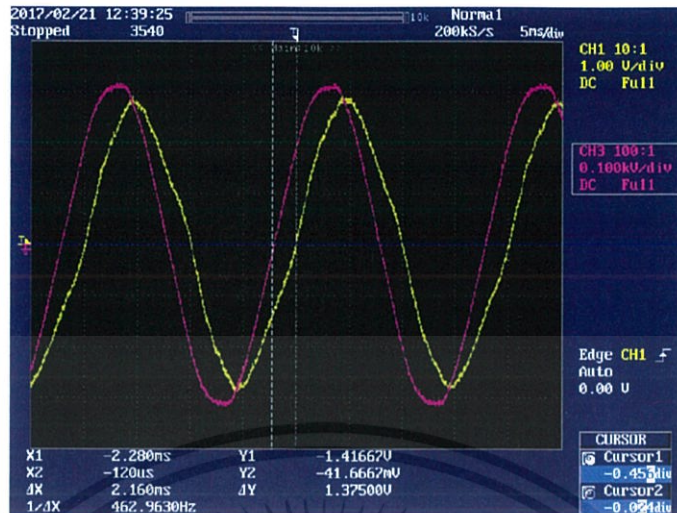


รูปที่ 4.18 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ 50% load



รูปที่ 4.19 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ 75% load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ 100% load

ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Power input, Power output, Efficiency

หา Power input

$$\begin{aligned} \text{ที่ 100\%Load } P_{i/p} &= 3V_p I_p \cos \theta = 3 \times 226.50 \times 1.80 \times \cos 0.78 \\ &= 1022.90 \text{ W} \end{aligned}$$

หา Power output

$$\begin{aligned} \text{ที่ 100\%Load } P_{o/p} &= T\omega = T \times \frac{2\pi \times n_r}{60} = 6.3 \times \frac{2\pi \times 1401}{60} \\ &= 807.00 \text{ W} \end{aligned}$$

หา Efficiency

$$\begin{aligned} \text{ที่ 100\%Load } \%E_{ff} &= \frac{P_{o/p}}{P_{i/p}} = \frac{807.00}{1022.90} \times 100 \\ &= 79\% \end{aligned}$$

4.5 ผลการทดสอบหาวจรสมมูลโดยประมาณ(การพันขดลวดตามการออกแบบใหม่)

No-load test

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลอง No-load test (การพันขดลวดตามการออกแบบใหม่)

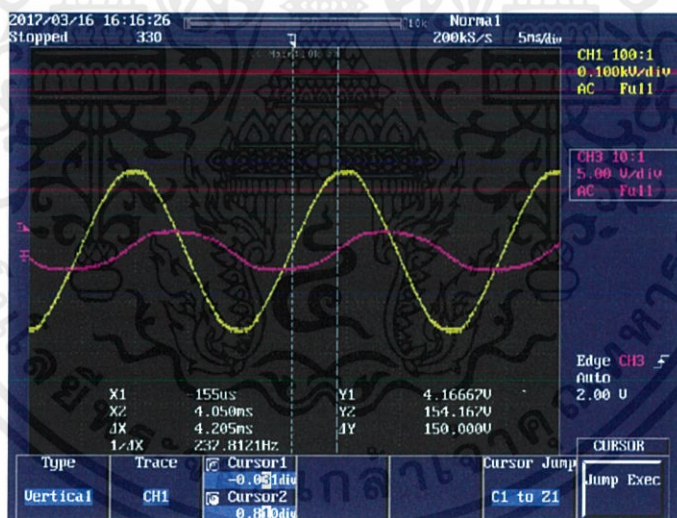
Voltage(V)	Current(A)	Power factor	Speed(rpm)
110.19	1.42	0.25	1499

Block-rotor test

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลอง Block-rotor test (การพันขดลวดตามการออกแบบใหม่)

Voltage(V)	Current(A)	Power factor
24.43	3.14	0.71

นำค่าที่ได้จาก No-load test และ Block-rotor test มาคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามวิธีในหัวข้อที่ 2.14



รูปที่ 4.21 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก No-load test

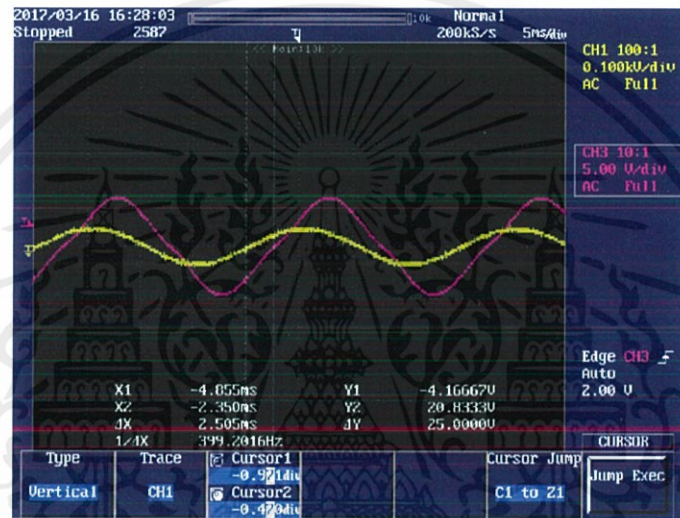
จะได้

$$I_c = 1.42 \cos 75.69^\circ = 0.35 \quad \text{A}$$

$$I_m = 1.42 \sin 75.69^\circ = 1.38 \quad \text{A}$$

$$R_c = \frac{V_{nl}}{I_c} = 314 \quad \text{ohm/phase}$$

$$X_m = \frac{V_{nl}}{I_m} = 80 \quad \text{ohm/phase}$$



รูปที่ 4.22 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก Block-rotor test

$$Z_{bl} = \frac{V_{bl}}{I_{bl}} = \frac{24.43 \angle 0^\circ}{3.14 \angle -45.1^\circ} = 5.49 - j5.51 \quad \text{ohm/phase}$$

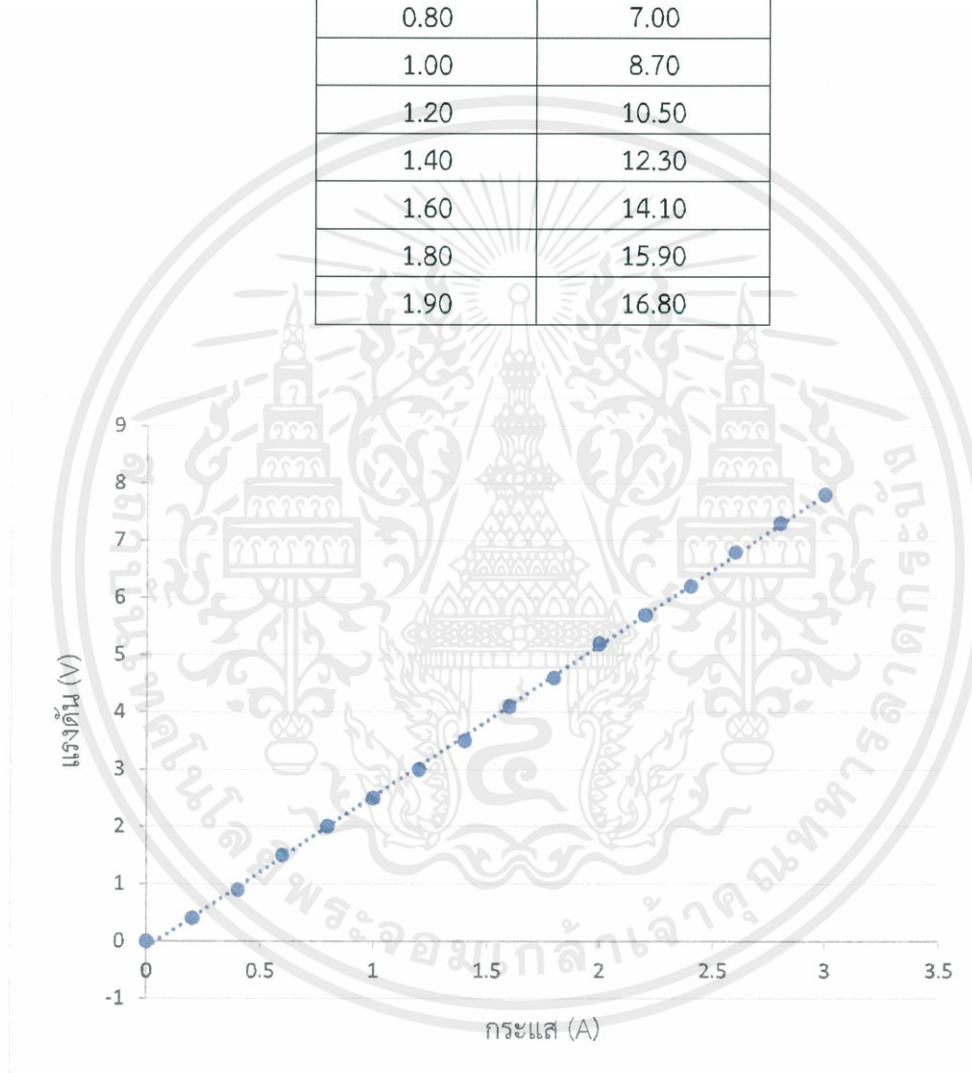
ดังนั้น

$$R_1 + R_2 = 5.49 \quad \text{ohm}$$

$$X_1 + X_2 = 5.51 \quad \text{ohm}$$

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (การผันขดลวดตามการออกแบบใหม่)

Current(V)	Voltage(V)
0.20	1.70
0.40	3.50
0.60	5.20
0.80	7.00
1.00	8.70
1.20	10.50
1.40	12.30
1.60	14.10
1.80	15.90
1.90	16.80



รูปที่ 4.23 กราฟแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะจ่าย DC power supply

(การผันขดลวดตามการออกแบบใหม่)

จะได้ค่า

$$\text{Slope} = R_1 = 2.5$$

ohm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อภิปรายผลการทดลอง

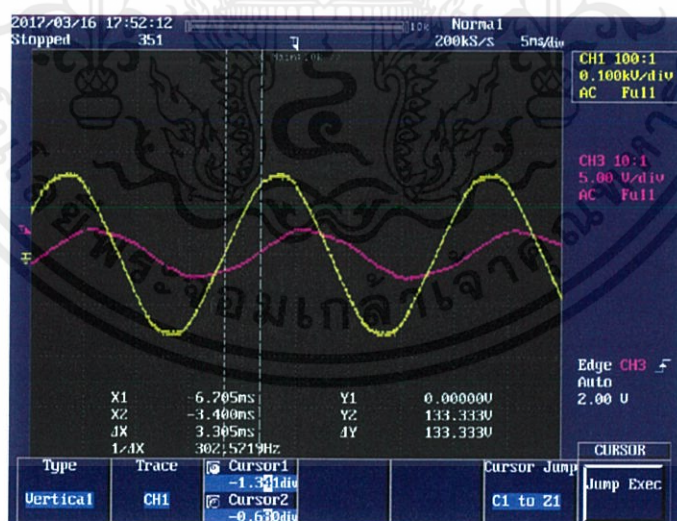
จากการผลทดลอง 4.3 ทำให้ได้ทราบพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ต้นแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต และจากผลการทดลอง 4.5 ทำให้ได้ทราบพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ที่ทำการออกแบบใหม่ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่า R_c, X_m ของมอเตอร์ที่ทำการออกแบบใหม่ จะมีค่าลดลงจากมอเตอร์ต้นแบบเพราะว่าแรงดันที่ใช้ในการทดลองไม่เท่ากัน เป็นผลทำให้ค่าเปลี่ยนแปลงไป และค่า R_1 ของมอเตอร์ที่ทำการออกแบบใหม่ จะมีค่าลดลงจากมอเตอร์ต้นแบบเพราะว่าได้มีการลดจำนวนรอบในการพันขดลวดลงครึ่งหนึ่ง และเพิ่มขนาดขดลวดขึ้น



4.6 ผลการทดลองจ่ายแรงดันเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ที่แรงดัน 110 V 50 Hz (การผันขดลวดตามการออกแบบใหม่)

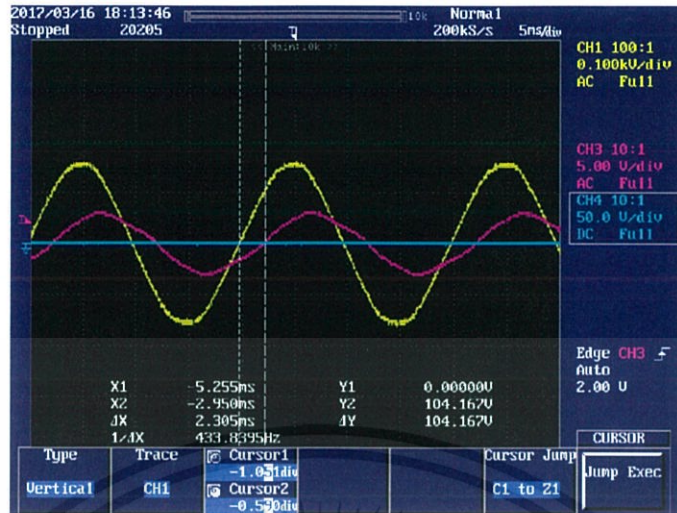
ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองจ่ายแรงดันมอเตอร์ที่แรงดัน 110 V 50 Hz (การผันขดลวดตามการออกแบบใหม่)

%Load(approximately)		No-load	50	75	100
AC	Voltage(V)	109.80	110.90	110.70	109.80
	Current(A)	1.72	1.90	2.50	3.10
	Power factor	0.60	0.72	0.82	0.87
	Power input(W)	339.94	455.13	680.81	886.35
Speed(rpm)		1464	1445	1419	1397
torque(N.m)		1.70	2.40	3.70	5.00
Power output(W)		260.63	363.17	549.81	731.48
Efficiency(%)		76.67	79.79	80.76	82.53

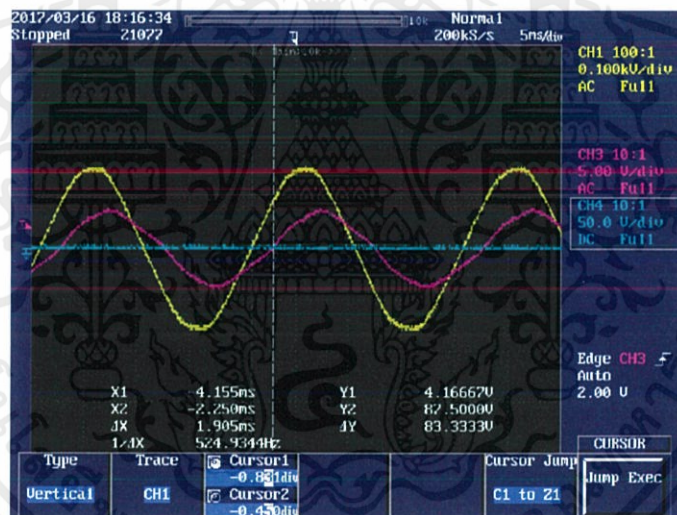


รูปที่ 4.24 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ 0% load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

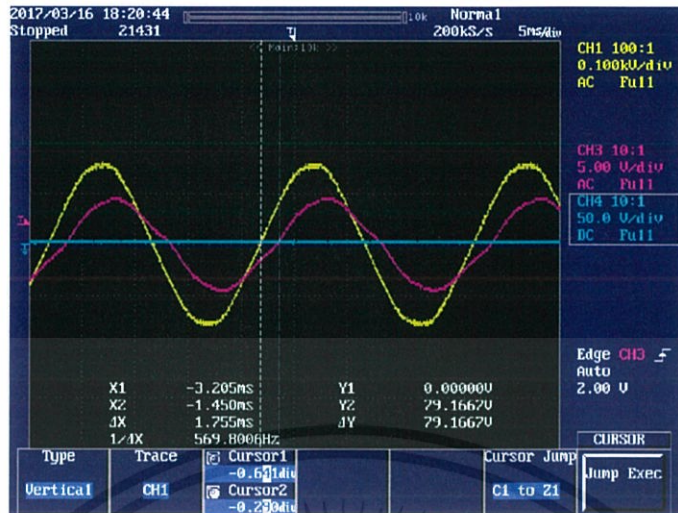


รูปที่ 4.25 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ 50% load



รูปที่ 4.26 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ 75% load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ 100% load

ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Power input, Power output, Efficiency

หา Power input

$$\begin{aligned} \text{ที่ 100\%Load } P_{i/p} &= 3V_p I_p \cos \theta = 3 \times 109.80 \times 3.10 \times \cos 0.87 \\ &= 886.35 \quad \text{W} \end{aligned}$$

หา Power output

$$\begin{aligned} \text{ที่ 100\%Load } P_{o/p} &= T\omega = T \times \frac{2\pi \times n_r}{60} = 5.0 \times \frac{2\pi \times 1397}{60} \\ &= 731.48 \quad \text{W} \end{aligned}$$

หา Efficiency

$$\begin{aligned} \text{ที่ 100\%Load } \%E_{ff} &= \frac{P_{o/p}}{P_{i/p}} = \frac{886.35}{731.48} \times 100 \\ &= 82.53\% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ผลการทดลองจ่ายแรงดันเพื่อขับมอเตอร์ที่แรงดัน 220 V 100 Hz ด้วย Inverter (การผันขดลวดตามการออกแบบใหม่)

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองจ่ายแรงดันมอเตอร์ที่แรงดัน 220 V 100 Hz ด้วย Inverter (การผันขดลวดตามการออกแบบใหม่)

%Load(approximately)		No-load	50	75	100
AC	Voltage(V)	223.80	224.26	222.14	221.17
	Current(A)	1.65	1.92	2.52	3.12
	Power factor	0.50	0.57	0.63	0.66
	Power input(W)	553.91	736.30	1058.00	1366.30
Speed(rpm)		2964	2941	2903	2877
torque(N.m)		1.40	1.90	2.80	3.80
Power output(W)		434.55	585.16	851.20	1144.86
Efficiency(%)		78.45	79.47	80.45	83.79

ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Power input, Power output, Efficiency

หา Power input

$$\begin{aligned} \text{ที่ } 100\% \text{Load } P_{i/p} &= 3V_p I_p \cos \theta = 3 \times 221.17 \times 3.12 \times \cos 0.66 \\ &= 1366.30 \quad \text{W} \end{aligned}$$

หา Power output

$$\begin{aligned} \text{ที่ } 100\% \text{Load } P_{o/p} &= T\omega = T \times \frac{2\pi \times n_r}{60} = 3.80 \times \frac{2\pi \times 2877}{60} \\ &= 1144.86 \quad \text{W} \end{aligned}$$

หา Efficiency

$$\begin{aligned} \text{ที่ } 100\% \text{Load } \%E_{ff} &= \frac{P_{o/p}}{P_{i/p}} = \frac{1144.86}{1366.30} \times 100 \\ &= 83.79\% \end{aligned}$$

อภิปรายผลการทดลอง

จากการผลทดลอง 4.4 ทำให้ได้ทราบประสิทธิภาพของมอเตอร์ต้นแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต และจากผลการทดลอง 4.6 ทำให้ได้ทราบประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ทำการออกแบบใหม่ ซึ่งจะเห็นได้ว่า การที่ลดจำนวนรอบขดลวดลงครึ่งหนึ่ง และเพิ่มขนาดของขดลวดขึ้น ทำให้กำลังสูญเสียในสายลวด เป็นผลให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ทำการออกแบบใหม่ดีกว่ามอเตอร์ต้นแบบ

จากการทดลอง 4.4 และ 4.7 เป็นการจ่ายแรงดันเท่าเดิม แต่ความถี่เพิ่มเป็นสองเท่า เพื่อที่จะได้ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กคงเดิม เมื่อเทียบผลการทดลอง 4.4 และ 4.7 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ทำการออกแบบใหม่ดีกว่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ต้นแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต เนื่องจากการที่ลดจำนวนรอบขดลวดลงครึ่งหนึ่ง และเพิ่มขนาดของขดลวดขึ้น ทำให้กำลังสูญเสียในสายลวด



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

5.1.1 การทดลองการศึกษาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน (มอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบ Wound rotor)

การทดลองเรื่องแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยวิธีขดลวดค้นหา (search coil) สามารถบอกคุณลักษณะของสนามแม่เหล็กทั้งในกรณีที่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสและกรณีไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส โดยที่เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสจะเกิดสนามแม่เหล็กหมุน (rotating magnetic field) โดยแสดงออกมาในลักษณะของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่มีขนาดคงที่เท่ากันในทุกๆ มุมองศาทางกล แต่มีมุมต่างเฟสที่สัมพันธ์กับตำแหน่งขดลวดค้นหา เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์เฟสใดเฟสหนึ่งผลที่ได้คือจะเกิดสนามแม่เหล็กที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาในแนวแกนแม่เหล็กของเฟสนั้นๆ

5.1.2 การทดลองย่านการอิ่มตัวของแกนเหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า (มอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบ Wound rotor)

การทดลองนี้เป็นการทดลองพื้นฐานเพื่อหาจุดอิ่มตัวของแกนเหล็ก เพื่อเป็นพื้นฐานในการทดลองอื่นๆ เพื่อไม่ให้เกิดการทดลองในย่านที่แกนเหล็กไม่อิ่มตัว ซึ่งจะส่งผลให้ผลการทดลองไม่สอดคล้องกับทฤษฎีซึ่งจะกล่าวต่อไปในการทดลองอื่นๆ ซึ่งการทดลองจะแสดงกราฟในลักษณะของ V-I curve และผลที่ได้คือ แกนเหล็กจะอิ่มตัวที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 220 V โดยประมาณ

5.1.3 การทดลองหาวงจรมูลโดยประมาณของมอเตอร์ที่มีการพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต และการพันขดลวดตามการออกแบบใหม่

จากผลการทดลอง No-load test สามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์แกนเหล็กได้ โดยค่า R_c และ X_m ของการพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต และการพันขดลวดตามการออกแบบใหม่ต่างกัน เพราะว่าเมื่อเราจ่ายแรงดันป้อนเข้าต่างกัน จะทำให้ค่าของ R_c และ X_m เปลี่ยนไป ด้วยเนื่องจากคุณสมบัติของแกนเหล็กที่เปลี่ยนแปลงไม่เป็นเชิงเส้น ขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่จุดทำงานของมอเตอร์

ส่วนผลจากการทดลอง Block-rotor test สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานของขดลวดฝั่งสเตเตอร์ของการพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต และการพันขดลวดตามการออกแบบใหม่ได้ต่างกัน เพราะวลจํานวนรอบของขดลวดลงครั้งหนึ่ง และเพิ่มขนาดของเบอร์ลวด ทำให้ค่าความต้านทานใหม่ที่ได้มีค่าลดลง

5.1.4 การทดลองจ่ายแรงดันเพื่อขับมอเตอร์ที่แรงดัน 220 V, 50 Hz (การพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต), แรงดัน 110 V, 50 Hz และแรงดัน 220 V, 100 Hz (การพันขดลวดตามการออกแบบใหม่)

จากผลการทดลองในการพันขดลวดทั้งสามแบบจะเห็นได้ว่าที่เปอร์เซ็นต์โหลดโดยประมาณที่เหมือนกัน ประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ออกแบบใหม่ดีกว่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่พันขดลวดแบบดั้งเดิม โดยทำการทดลองที่ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กคงที่ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากว่า เมื่อลดจํานวนรอบของขดลวดลงและเพิ่มขนาดของเบอร์ลวด ทำให้ค่าความต้านทานในสายลดลง จึงเป็นผลทำให้ค่ากำลังสูญเสียในขดลวดน้อยลงด้วย และทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้น

5.2 ปัญหาของโครงการและแนวทางแก้ไขปัญหา

5.2.1 ปัญหาของโครงการ

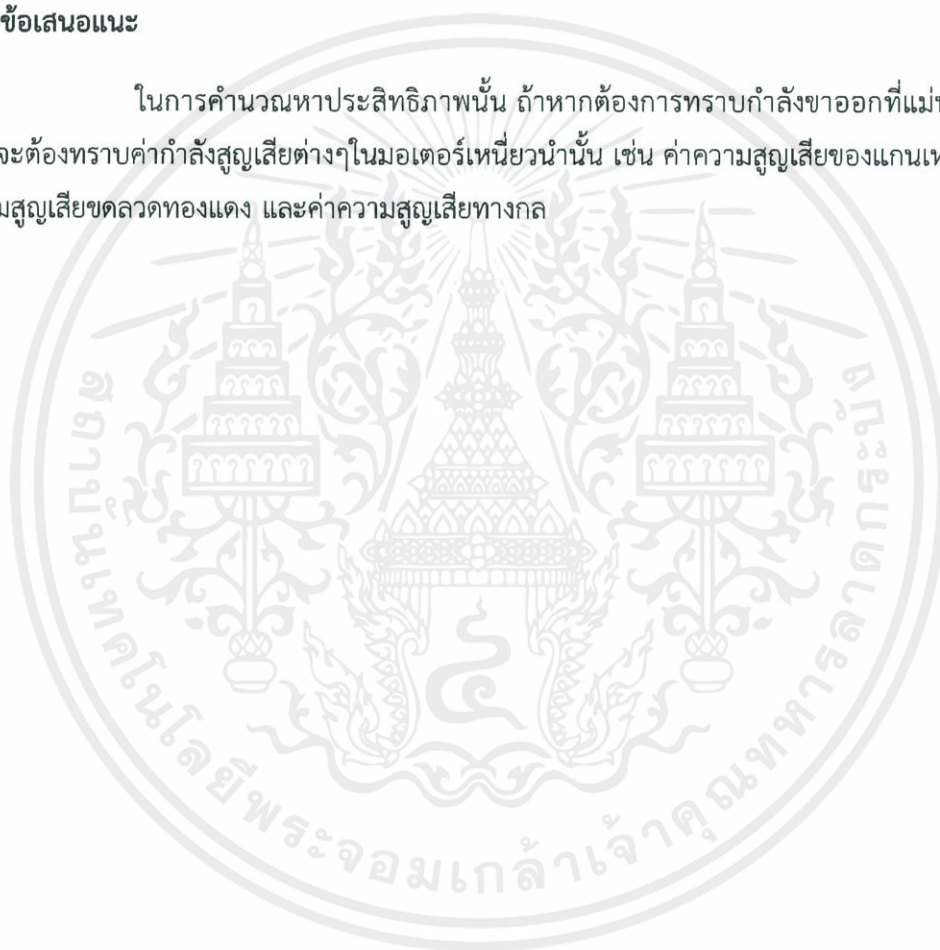
ในการทดลองมีปัญหาเรื่องการอ่านค่าจากเครื่องมือวัด ทั้งจาก Oscilloscope, Multi-meter, และ Torque meter เช่น แรงดันป้อนเข้าที่อ่านได้จาก Oscilloscope กับ Multi-meter มีค่าแตกต่างกัน, ค่าตัวประกอบกำลังที่คำนวณมาจากความห่างของแรงดันและกระแสที่อ่านได้จาก Oscilloscope อาจมีความคลาดเคลื่อน, ค่าแรงบิดกับความเร็วที่ได้จาก Torque meter มีการแกว่ง ทำให้ต้องเลือกค่าเพื่อจดบันทึกลงในผลการทดลอง, และในตอนแรกของการพันขดลวดใหม่ต้องการที่จะลดจํานวนรอบลงครั้งหนึ่งและเพิ่มขนาดขดลวดเป็นสองเท่าของขดลวดเดิม แต่ในความเป็นจริงทำได้ยาก เพราะขดลวดที่มีขนาดเป็นสองเท่าพอดีมีความแข็งแรงมาก ทำให้ดัดและวางลงในร่องสล้อตยาก

5.2.2 แนวทางแก้ไขปัญหา

ปัญหาในเรื่องการอ่านค่าสามารถแก้ปัญหาก็ได้โดยการจดค่าที่อ่านได้มา 3 ค่า แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อให้ได้ค่าที่ออกมามีความใกล้เคียงกับค่าที่ถูกต้องมากที่สุด, ส่วนปัญหาในการพันที่ต้องการเพิ่มขนาดขดลวดเป็นสองเท่า นั้น สามารถทำได้โดยนำขดลวดขนาดเดิมมาขานกัน แล้วลดจำนวนรอบในการพันลงครึ่งหนึ่ง

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการคำนวณหาประสิทธิภาพนั้น ถ้าหากต้องการทราบกำลังขาออกที่แม่นยำนั้น ควรจะต้องทราบค่ากำลังสูญเสียต่างๆในมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น เช่น ค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก ค่าความสูญเสียขดลวดทองแดง และค่าความสูญเสียทางกล



เอกสารอ้างอิง

- [1] พิชิต ล้ายอง, **เครื่องจักรกลไฟฟ้า**, ครั้งที่ 3, กรุงเทพฯ, สนพ. ห้างหุ้นส่วนจำกัด มีนเซอร์วิส ซัพพลาย, 2556
- [2] นายเรืองกิตต์ ปัญญาพงศธร นายวัชรภูมิ ทรัพย์ประเสริฐ และ นายวิทย์ พ่วงเจริญ, “สนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส,” **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสนามแม่เหล็กหมุน การออกแบบและทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

The study of rotating magnetic field, the design and testing for improving the efficiency of 3-phase induction motor

นัทธี น้อยพรหม นิธิศ อำนาคะ พงศ์ปณต ไวบรรเทา และเพชร ศรีภักดี

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาสนามแม่เหล็กหมุนและคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยจะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์ทั้งแบบขดลวดและแบบกรงกระรอกเป็นกรณีศึกษา ในขั้นต้นจำเป็นต้องศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โรเตอร์แบบขดลวดที่ใช้ทำการศึกษา และการศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสชนิดโรเตอร์แบบกรงกระรอก สุดท้ายแล้วทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าขาออกเพื่อทำการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ภาระต่าง ๆ หลังจากนั้นทำการออกแบบการพันขดลวดอาร์มาเจอร์ใหม่ โดยการลดขนาดและเพิ่มจำนวนรอบขดลวด

คำสำคัญ: โรเตอร์แบบขดลวด, โรเตอร์แบบกรงกระรอก, แรงเคลื่อนไฟฟ้า, แรงเคลื่อนแม่เหล็ก, สนามแม่เหล็กหมุน

Abstract

This thesis presents the study of rotating magnetic field and performance and characteristics induction motor tests. This research uses two types of induction motors which are squirrel cage rotor and wound rotor as tested motor. First step of testing the motor is to study the Structure and characteristics of the wound rotor. Then, the characteristics of the squirrel-cage induction motor. Lastly, the input and output power using to find the efficiency of induction motor at different loads is obtained. In this project, the winding of armature coil is newly designed by decreasing the size of coil and increasing the number of coil turns.

Keywords: Wound rotor, Squirrel cage, Electromotive force, Magnetomotive Force, Rotating magnetic field

1. บทนำ

เนื่องจากความรู้ความเข้าใจทางด้านเครื่องจักรกลไฟฟ้ามีส่วนสำคัญในการพัฒนาวิชาชีพในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและสาขาที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสอดคล้องกับสถานการณ์ในปัจจุบันที่โรงงานในภาคอุตสาหกรรมหรือแม้แต่สิ่งอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวัน ได้นำเอาเครื่องจักรกลไฟฟ้ามาใช้ขับเคลื่อนภาระ

ทางกลแทนแรงงานมนุษย์และสัตว์ ในที่นี้จะกล่าวถึงเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับเนื่องจากมีการใช้งานเป็นส่วนใหญ่ อีกทั้งยังมีข้อได้เปรียบด้านการใช้งานมากกว่าเครื่องจักรกล

ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีข้อจำกัดด้านความเร็ว (speed) ของเครื่องจักรกลและประสิทธิภาพ (efficiency) ของเครื่องจักรกล

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน

เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่ตำแหน่งวงขดลวดแต่ละเฟส แกนของขดลวดจะห่างกันเท่ากับ 120 องศาทางไฟฟ้า

จะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กกลิ้ง (Rotating mmf wave) ที่เกิดจากการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ทั้ง 3 เฟส ดังสมการ

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

โดยที่เทอม

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

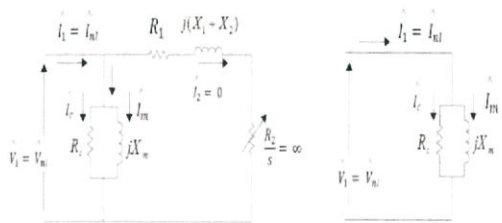
ทำให้

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

2.2 การทดสอบหาจรรยาจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

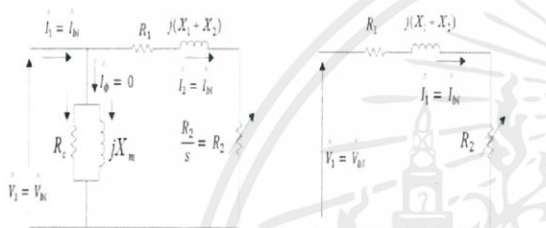
No-load test จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่อยู่ในภาวะไร้ภาระที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ จะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำความเร็วรอบในการหมุนใกล้เคียงกับ Synchronous speed (n_s) กำลังที่ป้อนเข้ามอเตอร์จะสูญเสียเนื่องจาก

- Core loss (P_c)
- Stator copper loss เนื่องจากกระแสกระตุ้น สนามแม่เหล็ก
- Mechanical loss



รูปที่ 2.22 วงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขณะไร้ภาระ

Block-rotor test ทำได้โดยการยึดตัวโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้หยุดอยู่กับที่ ($n_r = 0$) แล้วค่อยๆปรับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าจนกระแสไฟฟ้ที่ไหลในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นค่าที่พิกัด (Rated current)



รูปที่ 2.23 วงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขณะยึดตัวโรเตอร์

3. วิธีการทดลอง

3.1 การทดสอบหาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน

การทดสอบนี้จะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าสู่สเตเตอร์ โดยกระแสไฟฟ้าเฟสเดียวจะสร้างฟลักซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำการใส่ขดลวดค้นหาเข้าที่โรเตอร์ไป 0-360 องศาทางกลหรือ 0-720 องศาทางไฟฟ้าและทำการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จาก search coil

3.2 จ่ายแรงดันเพื่อขับมอเตอร์ที่แรงดัน 220 V, 50 Hz (squirrel cage rotor)

หัวข้อนี้เป็นการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสที่แรงดัน 220 V 50 Hz เข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เพื่อขับ DC Generator ที่ต่อแบบ Compound และมีขดลวดไฟฟ้ต่ออยู่ โดยทางด้านขาเข้าวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และตัวประกอบกำลัง ส่วนทางด้านขาออกที่ออกจาก DC Generator วัดค่า แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าแรงบิดและความเร็วจากนั้นทำการทดลองที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ คือ 0%, 50%, 75% และ 100% ของโหลด แล้วนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าขาออกเพื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพ โดยจะนำค่าประสิทธิภาพไปเปรียบเทียบกับค่าของมอเตอร์หลังการพันขดลวดตามการออกแบบใหม่

3.3 จ่ายแรงดันเพื่อขับมอเตอร์ที่แรงดัน 110 V, 50 Hz และ แรงดัน 220 V 100 Hz (squirrel cage rotor)

หลังจากพันมอเตอร์ใหม่โดยลดจำนวนรอบลงครึ่งหนึ่งและเพิ่มขนาดขดลวด ทำให้มอเตอร์สามารถรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้แค่ 110 V ที่ความถี่ 50 Hz แต่ถ้าต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ 220 V ค่าความถี่จะต้องเป็นสองเท่าคือ 100 Hz เพื่อจะทำให้ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กคงที่ จากนั้นทำการวัดค่าต่างๆตามหัวข้อ 3.6 แล้วนำค่าต่างๆที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพเพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพก่อนการพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิตเพื่อศึกษาผลการทดลองที่ได้

4. การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การศึกษาคุณลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กหมุน

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองกรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสของมอเตอร์แบบดั้งเดิมและที่ออกแบบใหม่

Mechanical Angle (degree)	Induce Voltage (mV)	
	มอเตอร์แบบดั้งเดิม	มอเตอร์ที่ออกแบบใหม่
0	49.98	99.85
30	50.13	100.02
60	50.56	101.54
90	52.24	101.95

อภิปรายผลการทดลอง

จากตาราง 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการลดจำนวนรอบของขดลวดอาร์มาเจอร์ลงครึ่งหนึ่ง ค่าแรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นประมาณสองเท่าที่ความถี่เดียวกัน เป็นไปตามสมการ

$$E = 4.44 f N_c \phi_p$$

4.2 ผลการทดลองจ่ายแรงดันเพื่อขับมอเตอร์ที่แรงดัน 220 V 50 Hz (การพันขดลวดแบบดั้งเดิม)

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองจ่ายแรงดันมอเตอร์ที่แรงดัน 220 V 50 Hz (การพันขดลวดแบบดั้งเดิม)

% Load (approximately)		100
AC	Voltage (V)	226.50
	Current (A)	1.80
	Power factor	0.78
	Power input (W)	1022.90
Speed (rpm)		1401
Torque (N.m)		6.30
Power output (W)		807.00
Efficiency (%)		0.79

4.3 ผลการทดลองจ่ายแรงดันเพื่อขับมอเตอร์ที่แรงดัน 110 V 50 Hz (การออกแบบขดลวดใหม่)

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองจ่ายแรงดันมอเตอร์ที่แรงดัน 110 V 50 Hz (การออกแบบขดลวดใหม่)

% Load (approximately)		100
AC	Voltage(V)	109.80
	Current(A)	3.10
	Power factor	0.87
	Power input(W)	886.35
Speed(rpm)		1397
Torque(N.m)		5.00
Power output(W)		731.48
Efficiency (%)		82.53

4.4 ผลการทดลองจ่ายแรงดันเพื่อขับมอเตอร์ที่แรงดัน 220 V 100 Hz ด้วย Inverter (การพันขดลวดตามการออกแบบใหม่)

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองจ่ายแรงดันมอเตอร์ที่แรงดัน 220 V 100 Hz ด้วย Inverter (การพันขดลวดตามการออกแบบใหม่)

%Load(approximately)		100
AC	Voltage(V)	221.17
	Current(A)	3.12
	Power factor	0.66
	Power input(W)	1366.30
Speed(rpm)		2877
torque(N.m)		3.80
Power output(W)		1144.86
Efficiency(%)		83.79

อภิปรายผลการทดลอง

จากการผลทดลอง 4.2 ทำให้ได้ทราบประสิทธิภาพของมอเตอร์ต้นแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต และจากผลการทดลอง 4.3 ทำให้ได้ทราบประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ทำการออกแบบใหม่ ซึ่งจะเห็นได้ว่า การที่ลดจำนวนรอบขดลวดลงครึ่งหนึ่ง และเพิ่มขนาดของขดลวดขึ้น ทำให้กำลังสูญเสียในสายลดลง เป็นผลให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ทำการออกแบบใหม่ดีกว่ามอเตอร์ต้นแบบ

จากการทดลอง 4.2 และ 4.4 เป็นการจ่ายแรงดันเท่าเดิม แต่ความถี่เพิ่มเป็นสองเท่า เพื่อที่จะได้ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กคงเดิม เมื่อเทียบผลการทดลอง 4.2 และ 4.4 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ทำการออกแบบใหม่ดีกว่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ต้นแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิต เนื่องจากการที่ลดจำนวนรอบขดลวดลงครึ่งหนึ่ง และเพิ่มขนาดของขดลวดขึ้น ทำให้กำลังสูญเสียในสายลดลง

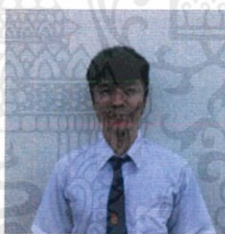
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนและประสิทธิภาพในการใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีโรเตอร์แบบขดลวดและแบบกรงระรอกโดยจะเปรียบเทียบระหว่างการพันขดลวดแบบดั้งเดิมจากผู้ผลิตและการพันขดลวดตามการออกแบบใหม่ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าที่เปอร์เซ็นต์โหลดโดยประมาณที่เหมือนกันจะมีค่ากำลังไฟฟ้าขาออกที่ใกล้เคียงกันแต่ค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของการพันขดลวดตามการออกแบบใหม่ที่น้อยกว่าเดิมทำให้มอเตอร์ที่ออกแบบใหม่มีประสิทธิภาพดีกว่าการพันขดลวดแบบดั้งเดิม ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากว่า เมื่อลดจำนวนรอบของขดลวดลงและเพิ่มขนาดของเบอร์ลวด ทำให้ค่าความต้านทานในสายลดลง จึงเป็นผลทำให้ค่ากำลังสูญเสียในขดลวดน้อยลงด้วย และทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1]พิชิต ล้ายอง,เครื่องจักรกลไฟฟ้า, ครั้งที่ 3, กรุงเทพ, สนพ. ห้างหุ้นส่วนจำกัด มินเซอร์วิส ซัพพลาย, 2556
- [2]นายเรืองกิตติ ปัญญาพงศธร นายวัชรภูมิ ทรัพย์ประเสริฐ และ นายวิชัย พ่วงเจริญ, “สนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส,” ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558

ประวัติผู้เขียนบทความ



นาย Nuttee น้อยพรหม
เกิดวันที่ 26 ตุลาคม พ.ศ. 2537
ที่อยู่ 78/51 ถนนบางบัวทอง-สุพรรณบุรี
ตำบลละหาร อำเภอบางบัวทอง นนทบุรี
11110
โทรศัพท์ 0830197217
E-mail:
nuttee.noiprom@gmail.com

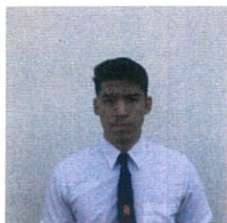


นาย Nitit อำนาคะ
เกิดวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2537
ที่อยู่ 344 ม.4 ตำบลเวียง อำเภอฟัว
เชียงใหม่ 50190
โทรศัพท์ 0897000682
E-mail:
nitit.amnaka @gmail.com



นาย Pongpanot ไวยวรรเทา
เกิดวันที่ 26 เมษายน 2537
ที่อยู่ 710/45 ตำบลศิลา อำเภอเมือง
ขอนแก่น 40000
โทรศัพท์ 0844494408
E-mail: pongpanot.w@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



นายพชร ศรีภักดี
 เกิดวันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ.2537
 ที่อยู่ 68 ม.8 ตำบลระวิง อำเภอเมือง
 เพชรบูรณ์ 67210
 โทรศัพท์ 0836020593
 E-mail:
 patchara.sripakdee@hotmail.com



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์

B	คือ	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Weber / m ² , Tesla)
H	คือ	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (A-Turn / m)
N	คือ	จำนวนรอบ (Turns)
μ_0	คือ	ความซึมซาบทางแม่เหล็กของอากาศ (Weber / A-Turn.m)
μ_r	คือ	ความซึมซาบสัมพัทธ์ (Weber / A-Turn.m)
Φ_p	คือ	ฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็ก (Weber / m ²)
l	คือ	ความยาวเฉลี่ย (m)
A	คือ	พื้นที่เฉลี่ย (m ²)
\mathcal{R}	คือ	ความต้านทานแม่เหล็ก (A-Turn / Weber)
λ	คือ	เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้อย (Weber.A)
L	คือ	ความเหนี่ยวนำ (Henry)
I	คือ	กระแสไฟฟ้า (Ampere)
V	คือ	แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย (Volt)
R	คือ	ความต้านทานไฟฟ้า (ohm)
e	คือ	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Volt)
θ	คือ	ตำแหน่งเชิงมุม (radian)
ω	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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

F	คือ	แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (A-Turn)
σ_{sr}	คือ	มุมระหว่างสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์
K_w	คือ	สัมประสิทธิ์การพันขดลวด
K_d	คือ	ตัวประกอบการกระจาย
K_p	คือ	ตัวประกอบระยะขดลวด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางขนาดลวดทองแดงมาตรฐาน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียนบทความ



นาย Nuttee น้อยพรหม
เกิดวันที่ 26 ตุลาคม พ.ศ. 2537
ที่อยู่ 78/51 ถนนบางบัวทอง-สุพรรณบุรี ตำบล
ละหาร อำเภอบางบัวทอง นนทบุรี 11110
จบการมัธยมศึกษาปลายที่โรงเรียนสวนกุหลาบ
วิทยาลัย นนทบุรี
โทรศัพท์ 0830197217
E-mail: nuttee.noiprom@gmail.com



นาย Nitit อำนาคะ
เกิดวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2538
ที่อยู่ 344 ม.4 ตำบลเวียง อำเภอพร้าว
เชียงใหม่ 50190
จบการมัธยมศึกษาปลายที่โรงเรียนยุพราช
วิทยาลัย เชียงใหม่
โทรศัพท์ 0897000682
E-mail: nitit.amnaka@gmail.com



นาย Pongpanot ไวรรรเทา
เกิดวันที่ 26 เมษายน 2537
ที่อยู่ 710/45 ตำบลศิลา อำเภอเมือง ขอนแก่น
40000
จบการมัธยมศึกษาปลายที่โรงเรียนแก่นนคร
วิทยาลัย ขอนแก่น
โทรศัพท์ 0844494408
E-mail: pongpanot.w@hotmail.com



นาย Patchara ศรีภักดี
เกิดวันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ.2537
ที่อยู่ 68 ม.8 ตำบลระวีง อำเภอเมือง เพชรบูรณ์
67210
จบการมัธยมศึกษาปลายที่โรงเรียนหนองไผ่
เพชรบูรณ์
โทรศัพท์ 0836020593
E-mail: patchara.sripakdee@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้