สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

Induction Machine Design

โดย

นายธนานันต์ กุลเทพบัณฑิตย์
นายพิพัฒน์ มณโฑ
นายภคนันท์ เพิ่มทรัพย์

ประ
ร 9221
2549
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....62650
วัน,เดือน,ปี.....21 ส.ค. 2549

b.....11623408
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

Induction Machine Design

โดย

นายธนานันต์ กุลเทพบัณฑิตย์

นายพิพัฒน์ มณโฑ

นายภคนันท์ เพิ่มทรัพย์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.พิชิต ลำยอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ผู้จัดทำ

1. นายธนานันต์ กุลเทพบัณฑิตย์
2. นายพิพัฒน์ มณโฑ
3.นายภคนันท์ เพิ่มทรัพย์

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ พิชิต ลำยอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I

การออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

นายธนานันต์ กุลเทพบัณฑิตย์
นายพิพัฒน์ มณโฑ
นายภคนันท์ เพิ่มทรัพย์
รศ.พิชิต ลำยอง อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เสนอการวิจัยทฤษฎีการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยในการวิจัยนี้ได้ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิดวาวด์โรเตอร์ในการทดลองเพื่อพิสูจน์ทฤษฎีต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทั้งนี้ได้มีการออกแบบและพันขดลวดของสเตเตอร์และโรเตอร์ขึ้นใหม่ในลักษณะต่าง ๆ กันเพื่อใช้ในการทดลอง แล้วทำการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้ในทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการทดลองต่าง ๆ รวมทั้งการทดลองในเรื่องของ เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Magnetic leakage flux) และ แรงบิดจากสนามแม่เหล็ก (Electromagnetic Torque) นอกจากนั้นยังได้ทำการหาวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ทำการทดลองไว้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Induction Machine Design

Thananan Kullathepbandit
Pipat Montro
Pakanun Permzub
Assc.Prof.Pichit Lumyong Advisor
2005

Abstract

This project presents the research of induction motor design theory by using a three-phase induction motor type wound rotor in any experiment to prove some theorem of induction motor. Anyhow, it is necessary to rewind stator and rotor coil in any kind to use in the experiment. Then can be compare the calculated outcome with the result from all experiment including the experiment of magnetic leakage flux and electromagnetic torque. Finally, the equivalent circuit of induction motor, which used in this project, is also presented in this paper.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRAC	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีวงจรแม่เหล็ก	3
2.1 สารแม่เหล็ก (magnetic material)	3
2.2 Reluctance	4
2.3 Inductance (*L*)	4
2.4 Mutual Inductance	5
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	9
3.1 โครงสร้าง	9
3.2 สนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetic field)	10
3.2.1 การวิเคราะห์โดยวิธีกราฟ(Graphical Method)	10
3.2.2 การพิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์(Analytical Method)	13
3.3 แรงดันเหนี่ยวนำ(Induced Voltage)	15
3.4 เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำหลายเฟส	16
3.4.1 การทำงานขณะหยุดนิ่ง (Standstill operation)	16
3.4.2 การเลื่อนเฟส (Phase shifter)	17
3.4.3 การทำงาน(หมุน)ของมอเตอร์(Running Operation)	17
3.5 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ	19
3.5.1 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์ชนิดไม่มีขั้วยื่น	19
3.5.2 การเกิดแรงบิดในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	24
3.6 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	24
3.7 การวิเคราะห์วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

บทที่ 4 การออกแบบการทดลองและการพันมอเตอร์ที่ใช้ทดลอง 31
4.1 มอเตอร์ที่ใช้ทำการทดสอบ 31
4.2 การออกแบบการพันขดลวดใหม่สำหรับมอเตอร์ที่จะใช้ทำการทดสอบ 32
4.3 การพันมอเตอร์และการต่อหัวสาย 34
4.4 ออกแบบขั้นตอนการทดลอง 37
บทที่ 5 การทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง 38
5.1 การทดลองหาค่าความอิ่มตัวของแกนเหล็ก 38
5.2 การทดลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 40
5.2.1 หาค่าความต้านทาน (R) ของขดลวดที่โรเตอร์และ สเตเตอร์โดยวิธีโวลต์แอมแปร์ (V-I Method) 40
5.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่เปลี่ยนแปลงกับ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 48
5.3 การทดลองเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (Flux Linkage) 53
5.3.1 การทดลองเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (ป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ด้านสเตเตอร์) 53
5.3.2 การทดลองเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (ป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ด้านโรเตอร์) 55
5.4 การทดลองแรงบิด 57
บทที่ 6 การหาวงจรสมมูลของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 61
6.1 การทดสอบดรึงโรเตอร์(Block Rotor Test) 61
6.2 การทดสอบขณะไม่มีภาระ(No Load Test) 62
6.3 ผลการทดสอบเพื่อหาวงจรสมมูลของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 63
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 65

เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H 3
รูปที่ 2.2 แสดงการเกี่ยวคล้องของเส้นแรงแม่เหล็ก 6
รูปที่ 2.3 วงจรแม่เหล็กที่มีขดลวดพันร่วมแกน 2 ขด 8
รูปที่ 3.1 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส โรเตอร์ชนิดกรงกระรอก 10
รูปที่ 3.2 การสั่นของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ 11
รูปที่ 3.3 สนามแม่เหล็กหมุนจากการวิเคราะห์ด้วยกราฟ 12
รูปที่ 3.4 การเคลื่อนที่ของรูปคลื่น mmf รวม(The mmf resultant) 13
รูปที่ 3.5 การกระจายของสนามแม่เหล็กในช่องอากาศ(Air gap flux density) 16
รูปที่ 3.6 การเลื่อนเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 19
รูปที่ 3.7 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสองขั้วอย่างง่าย 20
(a) แบบจำลองพื้นฐาน 20
(b) ไดอะแกรมของเวคเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก 20
รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 25
รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความถี่สลิป 26
รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 27
รูปที่ 3.11 วงจรสมมูลในอีกรูปแบบหนึ่ง 29
รูปที่ 4.1 รูปร่างและขนาดร่อง Slot ของสเตเตอร์และโรเตอร์ 31
รูปที่ 4.2 แท่งสี่เหลี่ยมแทนขดลวดแต่ละเฟส 35
รูปที่ 4.3 แสดงการขดลวดเฟส A 35
รูปที่ 4.4 แสดงการขดลวดเฟส A และเฟส B 35
รูปที่ 4.5 แสดงการขดลวดเฟส A เฟส B และเฟส C 35
รูปที่ 4.6 แสดงวงจรการพันขดลวดสเตเดอร์ทั้ง 3 ตัว 36
รูปที่ 5.1 แสดงวิธีทำการทดสอบหาค่าความอิ่มตัวของแกนเหล็ก 39
รูปที่ 5.2 กราฟผลการทดลองเรื่องแกนเหล็กอิ่มตัว 39
รูปที่ 5.3 แสดงวงจรการทดสอบหาค่าความต้านทาน 40
รูปที่ 5.4 กราฟการหาความต้านทานด้วย V-I Method ของขดลวดสเตเดอร์ตัวที่ 1 42
รูปที่ 5.5 กราฟการหาความต้านทานด้วย V-I Method ของขดลวดสเตเดอร์ตัวที่ 2 43
รูปที่ 5.6 กราฟการหาความต้านทานด้วย V-I Method ของขดลวดสเตเดอร์ตัวที่ 3 44
รูปที่ 5.7 กราฟการหาความต้านทานด้วย V-I Method ของขดลวดโรเดอร์ตัวที่ 1 46
รูปที่ 5.8 กราฟการหาความต้านทานด้วย V-I Method ของขดลวดโรเดอร์ตัวที่ 2 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 5.9 แสดงวิธีการทดสอบหาแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ 51
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลอง 52
รูปที่ 5.11 การทดลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 58
รูปที่ 5.12 การทดลองเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (ป้อนแรงดันด้านสเตเตอร์) 59
รูปที่ 5.13 การทดลองเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (ป้อนแรงดันด้านโรเตอร์) 59
รูปที่ 5.14 การทดลองแรงบิด 60
รูปที่ 6.1 แสดงวงจรสมมูล 1 เฟสของการทดสอบดรึงโรเตอร์ 62
รูปที่ 6.2 แสดงวงจรสมมูล 1 เฟสของการทดสอบขณะไม่มีภาระ 63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลของมอเตอร์ที่ใช้ทำการทดสอบ 31

ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลการพันของสเตเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง 37

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองเรื่องแกนเหล็กอิ่มตัว 38

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลอง V-I Method เพื่อหาความต้านทานของ ขดลวดสเตเตอร์ตัวที่ 1 40

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลอง V-I Method เพื่อหาความต้านทานของ ขดลวดสเตเตอร์ตัวที่ 2 41

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลอง V-I Method เพื่อหาความต้านทานของ ขดลวดสเตเตอร์ตัวที่ 3 41

ตารางที่ 5.5 ผลการทดลอง V-I Method เพื่อหาความต้านทานของ ขดลวดโรเตอร์ตัวที่ 1 45

ตารางที่ 5.6 ผลการทดลอง V-I Method เพื่อหาความต้านทานของ ขดลวดโรเตอร์ตัวที่ 2 45

ตารางที่ 5.7 ผลการทดลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าทางด้าน สเตเตอร์ 48

ตารางที่ 5.7 ผลการทดลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าทางด้าน โรเตอร์ 50

ตารางที่ 5.9 ผลการทดลองเรื่องเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (Flux Linkage) โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ด้านสเตเตอร์ 53

ตารางที่ 5.10 ผลการทดลองเรื่องเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (Flux Linkage) โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ด้านโรเตอร์ 55

ตารางที่ 5.11 ผลการทดลองเรื่องแรงบิดและพลังงานสะสมในช่องอากาศ 57

ตารางที่ 6.1 แสดงค่าอัตราส่วนระหว่าง X_1 กับ X_2 ตามชนิดของ เครื่องจักรไฟฟ้าแต่ละชนิด 62

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการทดสอบตรึงโรเตอร์ (Block Rotor Test) 63

ตารางที่ 6.3 แสดงผลการทดสอบขณะไร้ภาระทางไฟฟ้า(No Load Test) 64

ตารางที่ 6.4 แสดงค่าตัวแปรของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำของมอเตอร์ที่นำมาทดสอบ 64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัจจุบันอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทมอเตอร์ที่ใช้กันอยู่โดยส่วนใหญ่ ทั้งในโรงงานอุตสาหกรรม และตามร้านค้าบ้านเรือน จะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำเกือบทั้งสิ้น ทั้งนี้มีใช้กันตั้งแต่ระบบไฟฟ้าเฟสเดียวและในระบบ 3 เฟส ด้วยเพราะมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่มีส่วนประกอบที่ยุ่งยาก สะดวกและแข็งแรงทนทานไม่ค่อยมีปัญหาในการใช้งาน การซ่อมแซมบำรุงรักษาทำได้ง่ายได้ความเร็วรอบค่อนข้างคงที่และที่สำคัญ มีราคาถูก มอเตอร์เหนี่ยวนำจึงเป็นมอเตอร์ที่ใช้งานแพร่หลายที่สุด ซึ่งปัจจุบันการผลิตมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสในประเทศไทยมี 2 วิธี คือการผลิตโดยลอกเลียนแบบดัดแปลง และการผลิตโดยการซื้อเทคโนโลยีจากต่างประเทศซึ่งต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก ส่วนที่มีการผลิตโดยลอกเลียนแบบดัดแปลงนั้น ผู้ผลิตก็จะไปคำนึงถึงต้นทุนการผลิดเป็นหลัก โดยไม่สนใจเรื่องคุณภาพ ซึ่งจะทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำเหล่านั้นไม่มีมาตรฐานเพียงพอ

แม้ว่าในปัจจุบันจะมีผู้ผลิตมอเตอร์บางรายทำการวิจัยและพัฒนามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขึ้นมาเอง แต่ก็ยังมีปัญหาต่างๆเช่น ค่าใช้จ่าย ความยุ่งยากในการคำนวณ เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย เป็นต้น ดังนั้นจึงเห็นว่าถ้าได้มีการวิจัยและศึกษาถึงทฤษฎีการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำจากห้องวิจัยที่มีความพร้อมทางด้านเครื่องมือการทดสอบ และมีมาตรฐานเป็นที่ยอมรับ จะเป็นการช่วยให้เกิดความรู้ความเข้าใจในศาสตร์ทางนี้มากขึ้น ด้วยเพราะปัจจุบันประเทศของเรานั้นยังขาดซึ่งผู้ที่มีความเชี่ยวชาญและความเข้าใจอย่างถ่องแท้ อันจะนำมาซึ่งการพัฒนาเพื่อช่วยลดปัญหาต่าง ๆ ที่มีอยู่ให้น้อยลง อีกทั้งยังจะเป็นการสนับสนุนให้ผู้ผลิตหันมาทำการวิจัยและพัฒนามากขึ้น จนสามารถผลิดมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขึ้นมาโดยเทคโนโลยีของประเทศเราเองได้ จะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการซื้อและนำเข้าลงได้ และเพิ่มการผลิตภายในประเทศให้มากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยอาศัยการทดสอบเพื่อพิสูจน์ถึงทฤษฎีต่าง ๆ เพื่อหาปัจจัยสำคัญ ๆ ที่มีผลต่อการทำงานและการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและส่งเสริมให้มีการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

ศึกษาและทำการทดสอบเพื่อพิสูจน์ทฤษฎีที่จำเป็นในการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอาศัยการทดสอบพื้นฐานกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดวาวด์โรเตอร์ในห้องปฏิบัติการจากนั้นทำการออกแบบคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้โครงสร้างของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนี่ยวนำที่มีใช้กันอยู่จริง แล้วทำการพันขดลวดขึ้นใหม่ จากนั้นทำการทดสอบเพื่อพิสูจน์ทฤษฎีต่าง ๆ โดยเน้นศึกษาไปที่เรื่องเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2. ศึกษาวิธีการพันขดลวดมอเตอร์แบบต่าง ๆ เพื่อพันขดลวดที่สเตเตอร์ และโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดวาวด์โรเตอร์ที่จะใช้ทำการทดสอบ

3. ทำการทดลองพื้นฐานกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้มีการคำนวณและพันขดลวดขึ้นใหม่ เพื่อกำหนดคุณลักษณะต่าง ๆ จากนั้นทำการเปรียบเทียบการคำนวณในทางทฤษฎีกับผลที่ได้จากการทดลอง เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของทฤษฎีต่าง ๆ และเพื่อช่วยให้มีความเข้าใจและมั่นใจในตัวทฤษฎียิ่งขึ้น เพื่อการนำไปพัฒนาหรือประยุกต์ใช้ในการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

4. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับ การสูญเสียจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล(Magnetic leakage flux) และทฤษฎีการเกิดแรงบิด (Electromagnetic Torque) ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

5. ออกแบบและพันขดลวดใหม่ให้เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีพิกัดตามที่ต้องการ

6. ออกแบบการทดลอง และทำการทดลองเรื่อง เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล และแรงบิด ตลอดจนการทดลองพื้นฐานด่าง ๆ กับมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวที่ได้ทำการพันขดลวดไว้

7. ทำการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ อันเป็นคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อนำมาวิเคราะห์จากวงจรสมมูลอีกครั้งหนึ่ง

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสนั้นมีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน การที่ได้มีการศึกษาและวิจัยถึงการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ตลอดจนการที่ได้มีการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่มีความพร้อมทางด้านเครื่องมืออุปกรณ์และมีความเชื่อถือได้ จะทำให้เกิดความเข้าใจในหลักการและทฤษฎีในการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำมากยิ่งขึ้น จึงเป็นเหมือนจุดเริ่มต้นที่จะส่งเสริมให้ได้มีการออกแบบและพัฒนามอเตอร์เหนี่ยวนำขึ้นในประเทศของเรา อันจะเป็นประโยชน์ในการช่วยลดการซื้อเทคโนโลยีจากต่างประเทศและผลักดันให้มีการดื่นตัวที่จะศึกษาและพัฒนาอย่างจริงจังต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีวงจรแม่เหล็ก

2.1 สารแม่เหล็ก (Magnetic Material)

เป็นสารที่นำมาใช้ในการสร้างวงจรแม่เหล็กเพราะจะทำให้ค่าความต้านทานของวงจรแม่เหล็กต่ำอันเนื่องมาจากสารแม่เหล็กจะมีค่า Relative permeability สูง โดยสามารถกำหนดคุณสมบัติทางแม่เหล็กจากความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H และความสัมพันธ์อยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.1

เมื่อคุณสมบัติของสารแม่เหล็กมีความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H เป็นไปอย่างเชิงเส้น (Linear)

$$B = \mu_0 \mu_r H \tag{2.1}$$

เมื่อ B = Magnetic flux density หน่วย T (Tesla, Weber/m^2)

H = Magnetic field intensity หน่วย At/m

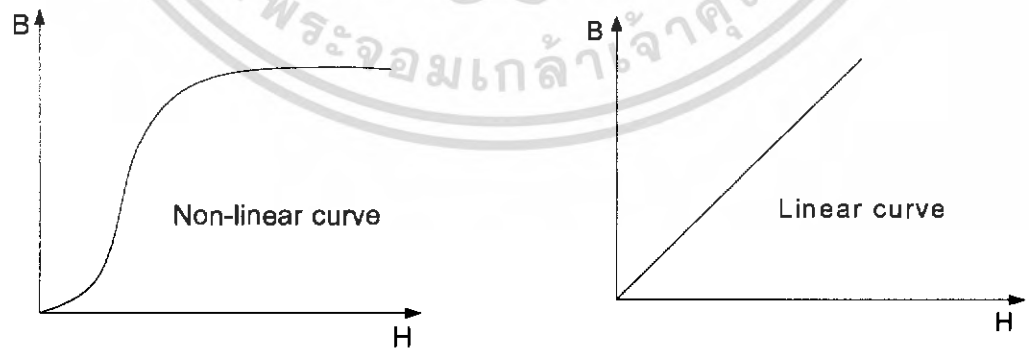
μ_0 = Permeability of free space หน่วย Wb/At.m

μ_r = Relative permeability

μ = Permeability หน่วย Wb/At.m

; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$

$$B = \mu H \tag{2.2}$$



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 Reluctance

จาก Ampere's law

$$Ni = \oint_c H.d\vec{l}$$

$$Ni = Hl$$

$$Ni = \frac{B}{\mu} l = \frac{\phi}{\mu A} l$$

$$Ni = \phi \Re \tag{2.3}$$

$$\Re = \frac{l}{\mu A} \tag{2.4}$$

เมื่อ Ni = Magneto-motive force หน่วย At (Ampere –turns)

ϕ = Magnetic flux หน่วย Wb

$\Re$ = Reluctance of magnetic circuit หน่วย At/Wb

l = Average length หน่วย m

A = Average area หน่วย m^2

2.3 Inductance (*L*)

ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเป็นอัตราส่วนระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (Flux linkage) กับกระแสที่ไหลในขดลวด (i)

$$L = \frac{\lambda}{i} \tag{2.5}$$

เมื่อ λ = Flux linkage หน่วย Wb.t

ϕ = Magnetic flux หน่วย Wb

เส้นแรงแม่เหล็กแม่เหล็กเกี่ยวคล้องในขดลวดสามารถหาได้จากผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องแต่ละรอบของขดลวดทั้งหมด n รอบ

$$\lambda = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4 + ... + \phi_n$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ถ้าทุกวงรอบมีเส้นแรงแม่เหล็กคล้องเท่ากันคือเท่ากับ ϕ สามารถหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องในขดลวดที่มีจำนวนรอบของขดลวดทั้งหมด n รอบได้จาก

$$\lambda = N\phi$$

จาก Ampere's law

$$Ni = Hl$$

ดังนั้น

$$\frac{H}{i} = \frac{N}{l}$$

จากสมการที่ (2.5)

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

$$L = \frac{N^2}{\Re} \qquad (2.6)$$

เมื่อ L = Inductance หน่วย H (Henry)

2.4 Mutual Inductance

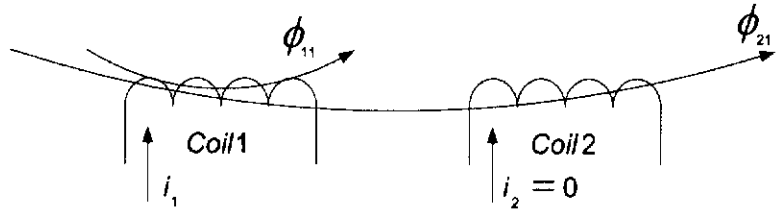
ในวงจรแม่เหล็กที่มีขดลวดมากกว่าหนึ่งขด ค่าของจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่มาเกี่ยวคล้องขดลวดทั้งหมด (Total flux linkage) จึงประกอบด้วย เส้นแรงแม่เหล็กของตัวเอง (Self flux linkage) กับ เส้นแรงแม่เหล็กรอบข้าง

ดังนั้นจึงแบ่งค่าความเหนี่ยวนำในขดลวดเพื่อจุดประสงค์ในการหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องออกเป็น 2 แบบ คือ

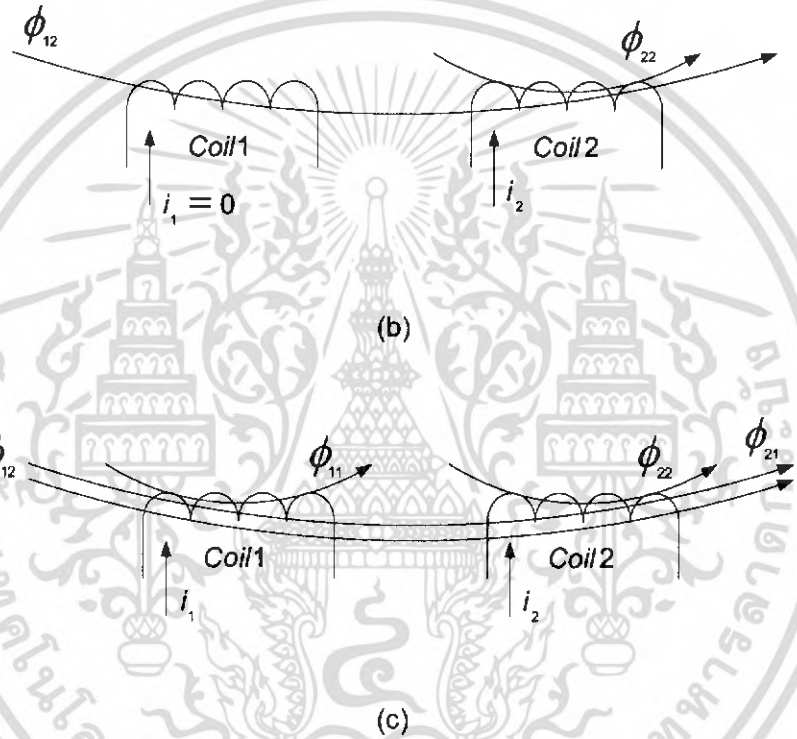
- ค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self-inductance)
- ค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual inductance)

ซึ่งแสดงเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องขดลวด 2 ขด ดังรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



รูปที่ 2.2 แสดงการเกี่ยวคล้องของเส้นแรงแม่เหล็ก

ซึ่งสามารถหาค่า λ_1 และ λ_2 ได้ดังนี้

$$\lambda_1 = \lambda_{11} + \lambda_{12} = N_1\phi_{11} + N_1\phi_{12} \quad (2.7)$$

$$\lambda_2 = \lambda_{21} + \lambda_{22} = N_2\phi_{21} + N_2\phi_{22} \quad (2.8)$$

เมื่อ λ_1 = flux linkage of coil 1

λ_2 = flux linkage of coil 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_1 = N_1\phi_{11} + N_1K_{12}\phi_{22}$$
$$\lambda_2 = N_2K_{21}\phi_{11} + N_2\phi_{22}$$

เมื่อ $\phi_{11} = \frac{N_1 I_1}{\Re_1}$, $\phi_{22} = \frac{N_2 I_2}{\Re_2}$

แทนค่าในสมการ

$$\lambda_1 = \frac{N_1^2}{\Re_1} I_1 + K_{12}\frac{N_1N_2}{\Re_2} I_2$$
$$\lambda_2 = K_{21}\frac{N_1N_2}{\Re_2} I_2 + \frac{N_2^2}{\Re_2} I_2$$

ถ้ากำหนดให้ $L_{11} = \frac{N_1^2}{\Re_1}$; $L_{22} = \frac{N_2^2}{\Re_2}$; $L_{12} = K_{12}\frac{N_1N_2}{\Re_2}$; $L_{21} = K_{21}\frac{N_1N_2}{\Re_1}$

$$\lambda_1 = L_{11}I_1 + L_{12}I_2 \quad (2.9)$$
$$\lambda_2 = L_{21}I_1 + L_{22}I_2 \quad (2.10)$$

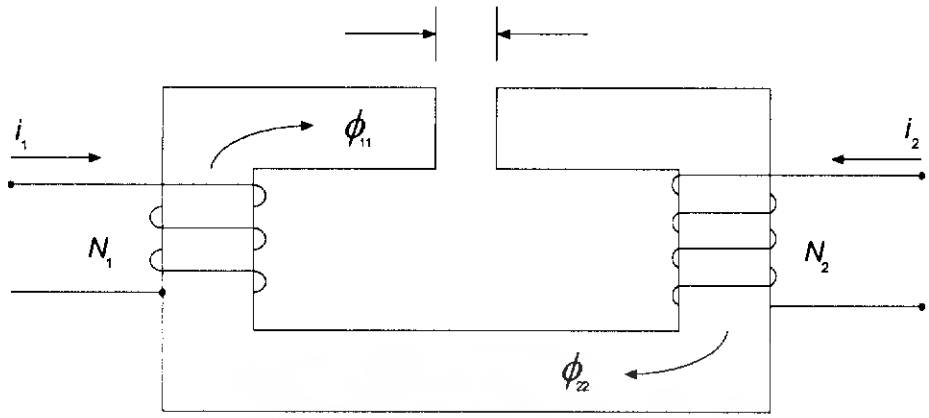
เมื่อ L_{11} = Self-inductance ของขดลวด 1
L_{22} = Self-inductance ของขดลวด 2
L_{12} = Mutual inductance ของขดลวด 1 ถูกกระทำโดยขดลวด 2
L_{21} = Mutual inductance ของขดลวด 2 ถูกกระทำโดยขดลวด 1
K_{12} = Coupling coefficient ของขดลวด 1 ถูกกระทำโดยขดลวด 2
K_{21} = Coupling coefficient ของขดลวด 2 ถูกกระทำโดยขดลวด 1
; $0 \le K \le 1.0$

ในกรณีที่วงจรแม่เหล็กไม่มีสนามแม่เหล็กรั่ว

$$\lambda_1 = N_1\phi_{11} + N_1\phi_{22}$$
$$\lambda_2 = N_2\phi_{11} + N_2\phi_{22}$$

เมื่อ $\phi_{11} = \frac{N_1 I_1}{\Re_g}$; $\phi_{22} = \frac{N_2 I_2}{\Re_g}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 วงจรแม่เหล็กที่มีขดลวดพันร่วมแกน 2 ขด

แทนค่าในสมการ

$$\lambda_1 = \frac{N_1^2}{\Re_g} I_1 + \frac{N_1 N_2}{\Re_g} I_2$$

$$\lambda_2 = \frac{N_1 N_2}{\Re_g} I_2 + \frac{N_2^2}{\Re_g} I_2$$

กำหนดให้ $L_{11} = \frac{N_1^2}{\Re_g}$; $L_{22} = \frac{N_2^2}{\Re_g}$

$L_{12} = K_{12} \frac{N_1 N_2}{\Re_g}$; $L_{21} = K_{21} \frac{N_1 N_2}{\Re_g}$

$L_{12} = L_{21}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.1 โครงสร้าง

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (3 phase induction motor) เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ทำงานโดยอาศัยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ซึ่งส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ 1.สเตเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนอยู่กับที่ และ 2.โรเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่มีการหมุน โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 สเตเตอร์ (Stator)

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น ส่วนที่อยู่กับที่เรียกว่า สเตเตอร์ซึ่งมีขดลวด 3–เฟส วางอยู่ในร่อง slot ภายในสเตเตอร์ โดยที่ตัวมันทำจากแผ่นเหล็กอัดซ้อนเป็นแกน(lamination) ที่มีคุณสมบัติ high– grads sheet steel

3.1.2 โรเตอร์ (Rotor)

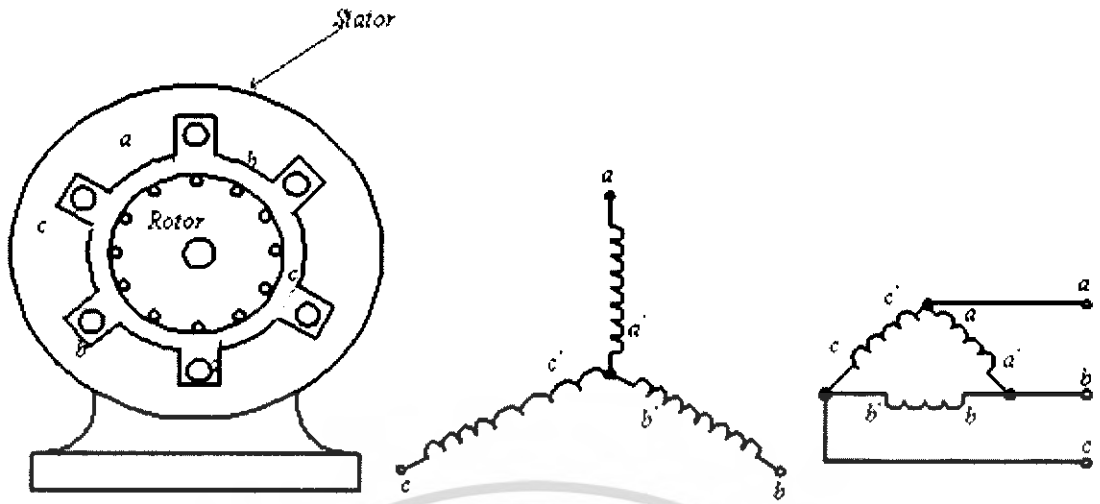
สำหรับตัวโรเตอร์ทำมาทำจากแผ่นเหล็กอัดซ้อนเป็นแกน(Lamination) ที่มีคุณสมบัติ highly permeable steel laminations และโรเตอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ

1. โรเตอร์ชนิดกรงกระรอก (Squirrel-cage type Rotor) ซึ่งประกอบด้วยแท่งตัวนำที่นำมาจากอลูมิเนียม(Aluminum) หรือทองแดง(Copper) ฝังอยู่ในภายใต้ ร่องสล๊อตของโรเตอร์ โดยที่ตัวนำดังกล่าวนี้ถูกลัดวงจรที่ปลายทั้งสองด้านด้วยตัวนำ อลูมิเนียมหรือทองแดงรูปวงแหวน

2. โรเตอร์ชนิดขดลวดพัน (Wound -rotor type Rotor) ซึ่งลักษณะการพันของขดลวดเหมือนกับขดลวดสเตเตอร์(stator winding) โดยที่ขั้วของขดลวดโรเตอร์ถูกต่อเข้ากับวงแหวนลื่น (slip rings) ทั้ง 3 ชุด และโรเตอร์ชนิดดังกล่าวนี้สามารถ ต่อความต้านทานจากวงจรภายนอกเข้าไปได้ ทั้งนี้เพื่อจุดประสงค์ในการปรับปรุงรูปคลื่น mmf แรงบิดที่เครื่องจักรเหนี่ยวนำสร้างขึ้น และการควบคุมความเร็ว โดยที่การวางขดลวดเป็นลักษณะวางแบบกระจายทั้งที่ โรเตอร์ และ สเตเตอร์ ในแต่ละเฟส ดังนั้นเมื่อกระแสไหลผ่านขดลวดที่วางกระจายมันจะทำให้เกิดการกระจายของ mmf ในลักษณะรูปคลื่นแบบไซนูซอยด์ (sinusoidal) ในช่องอากาศ

สำหรับรูปที่ 3.1 (a) เป็นการพิจารณาเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3-เฟส ซึ่งขดลวดสเตเตอร์วางกระจายอยู่ในร่องสล๊อตของตัวสเตเตอร์ โดยขดลวดแต่ละเฟสวางห่างกัน 120° ทางไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อความสมดุล และจากรูป 3.1 (a) กับ (c) นั้นแทนขดลวด aa' ในเฟส a ขดลวด bb' แทนในเฟส b และ ขดลวด cc' แทนในเฟส c ตามลำดับ ซึ่งการต่อขดลวดทั้ง 3-เฟส ต่อเป็นแบบ Wye(Y) หรือ Delta (D)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) ภาพตัดของมอเตอร์ (b)ขดลวดต่อแบบ Y (c)ขดลวดต่อแบบ D

รูปที่ 3.1 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส โรเตอร์ชนิดกรงกระรอก

3.2 สนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetic field)

สนามแม่เหล็ก (Magnetic field) ที่เกิดขึ้นเมื่อผ่านกระแสเข้าไปในขดลวดทั้ง 3-เฟส ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Machines) แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีขนาดและทิศทางขึ้นอยู่กับค่ากระแสชั่วขณะที่ไหลผ่านขดลวด ดังรูปที่ 3.2 (b) และกระแสไหลผ่านขดลวดทั้ง 3-เฟส กำหนดเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$I_a = I_m \cos \omega t \tag{3.1}$$

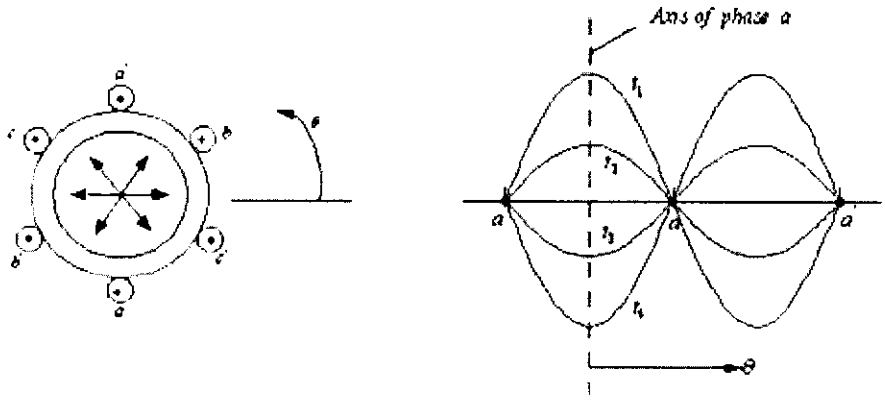
$$I_b = I_m \cos\left(\omega t - 120^\circ\right) \tag{3.2}$$

$$I_c = I_m \cos\left(\omega t + 120^\circ\right) \tag{3.3}$$

3.2.1 การวิเคราะห์โดยวิธีกราฟ (Graphical Method)

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขที่เวลาชั่วขณะในแต่ละช่วงเวลา ขนาดและทิศทางของผลลัพธ์รูปคลื่น mmf สามารถหาค่าได้โดยการกำหนดจากรูปที่ 3.2(a) เมื่อพิจารณากระแสที่ไหลผ่านขดลวดแต่ละเฟส (phase windind) กำหนดได้ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b)

รูปที่ 3.2 การสั่นของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ

$$i_a = I_m \tag{3.4}$$

$$i_b = -\frac{I_m}{2} \tag{3.5}$$

$$i_c = -\frac{I_m}{2} \tag{3.6}$$

สำหรับองค์ประกอบของรูปคลื่น *mmf* และ ผลลัพธ์ของรูปคลื่น *mmf* แสดงไว้ในรูปที่ 3.3 (b) โดยที่กระแสชั่วขณะในช่วงเวลา $t = t_0$ แสดงดังรูปที่ 3.3 (c) และกำหนดเป็นสมการดังนี้ คือ

$$i_a = 0, F_a = 0 \tag{3.7}$$

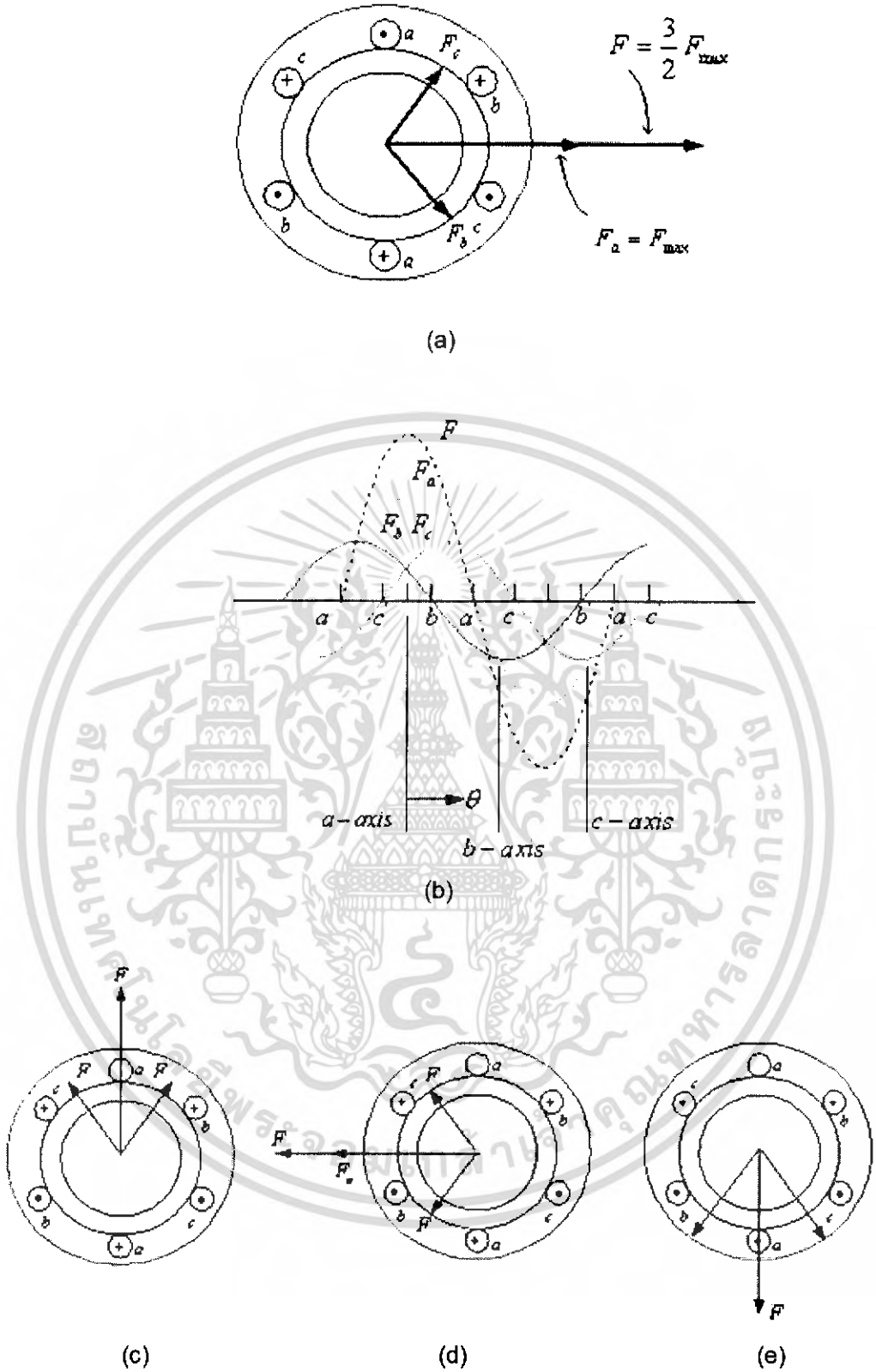
$$i_b = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m, F_b = \frac{\sqrt{3}}{2} F_{\max} \tag{3.8}$$

$$i_c = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_m, F_c = -\frac{\sqrt{3}}{2} F_{\max} \tag{3.9}$$

สำหรับผลลัพธ์ของรูปคลื่น *mmf* 1 รอบการหมุนต่อวัฏจักรของกระแสที่เปลี่ยนแปลงในเครื่องจักรกลชนิด 2 ขั้วแม่เหล็ก นั้นหมายความว่าถ้าพิจารณา เครื่องจักรกลชนิด p-ขั้วแม่เหล็ก 1 วัฏจักรของกระแสที่เปลี่ยนแปลงจะทำให้ได้รูปคลื่น *mmf* หมุน $2/p$ รอบ สำหรับการหมุน n รอบต่อนาทีของเครื่องจักรกล p-ขั้วแม่เหล็ก ที่ความถี่ f กำหนดความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

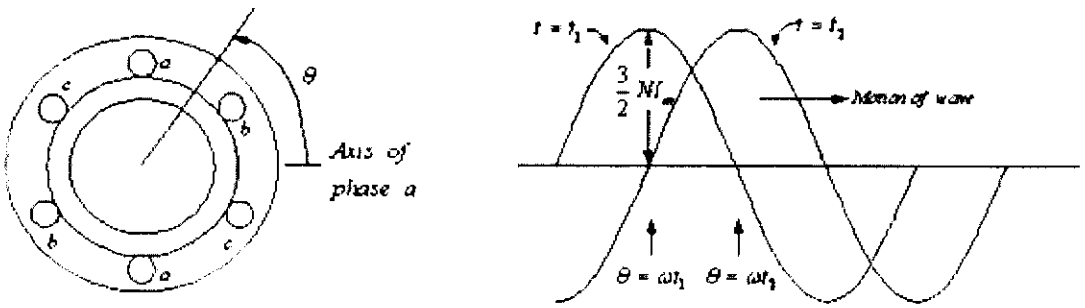
$$n_s = \frac{2}{p} f 60 = \frac{120 f}{p} \tag{3.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 สนามแม่เหล็กหมุนจากการวิเคราะห์ด้วยกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b)

รูปที่ 3.4 การเคลื่อนที่ของรูปคลื่น *mmf* รวม (The *mmf* resultant)

3.2.2 การพิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์ (Analytical Method)

อีกวิธีการหนึ่งสำหรับการพิจารณาเครื่องจักรกลชนิด2-ขั้วแม่เหล็ก ที่มีขดลวด 3-เฟส วางบนสเตเตอร์ การวิเคราะห์ดังกล่าวนี้จะพิจารณาถึงผลลัพธ์ของรูปคลื่น *mmf* (resultant *mmf* wave) ที่จุดต่างๆในช่องอากาศ ซึ่งกำหนดมุมการหมุนคือ θ โดยจุดเริ่มต้นของมุม θ เลือกตามแกนของเฟส a ดังรูปที่ 3.4(a) ซึ่งที่เวลาชั่วขณะใดๆ ในช่องอากาศทั้ง 3-เฟส ที่กำหนดตามมุม θ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$F(\theta) = F_a(\theta) + F_b(\theta) + F_c(\theta) \tag{3.11}$$

ถ้าพิจารณาที่เฟส a

$$F_a(\theta) = Ni_a \cos\theta \tag{3.12}$$

โดยที่ N = ค่าสัมประสิทธิผลของจำนวนรอบในเฟส a

i_a = กระแสในเฟส a

และค่า *mmf* เนื่องจากเฟส b และ c กำหนดได้ดังนี้ คือ

$$F_b(\theta) = Ni_b \cos\left(\theta - 120^\circ\right) \tag{3.13}$$

$$F_c(\theta) = Ni_c \cos\left(\theta + 120^\circ\right) \tag{3.14}$$

ดังนั้น ผลลัพธ์รูปคลื่น *mmf* ที่มุม q คือ

$$F(\theta) = Ni_a \cos\theta + Ni_b \cos\left(\theta - 120^\circ\right) + Ni_c \cos\left(\theta + 120^\circ\right) \tag{3.15}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณากระแส I_a, I_b และ I_c ในฟังก์ชันของเวลา กำหนดได้ดังสมการ (3.1), (3.2) และ (3.3)

นั่นคือ
$$F(\theta,t)=\begin{bmatrix} NI_m\cos\omega t\cos\theta \\ +NI_m\cos\left(\omega t-120^\circ\right)\cos\left(\theta-120^\circ\right) \\ +NI_m\cos\left(\omega t+120^\circ\right)\cos\left(\theta+120^\circ\right)\end{bmatrix} \tag{3.16}$$

สำหรับเทอมทางด้านขวามือของสมการ (3.16) สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ และแยกสมการได้ออกเป็น 2 องค์ประกอบของการหมุนไปข้างหน้า (Forward-rotating component) และองค์ประกอบของการหมุนถอยหลัง (Backward-rotating component) ดังสมการที่ (3.17)

$$F(\theta,t)=\underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{2}NI_m\cos(\omega t-\theta) \\ +\frac{1}{2}NI_m\cos(\omega t-\theta) \\ +\frac{1}{2}NI_m\cos(\omega t-\theta)\end{bmatrix}}_{\text{Forward-rotating component}}+\underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{2}NI_m\cos(\omega t+\theta) \\ +\frac{1}{2}NI_m\cos\left(\omega t+\theta-240^\circ\right) \\ +\frac{1}{2}NI_m\cos\left(\omega t+\theta+240^\circ\right)\end{bmatrix}}_{\text{Backward-rotating component}} \tag{3.17}$$

$$F(\theta,t)=\frac{3}{2}NI_m\cos(\omega t-\theta) \tag{3.18}$$

สมการ (3.18) แสดงผลลัพธ์ของรูปคลื่น mmf ในช่องอากาศ ซึ่งมีลักษณะดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดการหมุนของ mmf คงที่ ที่ความเร็วเชิงมุม $(\omega=2\pi f)$ สำหรับความเร็วรูปคลื่น mmf หมุนที่ $\omega=2\pi f$ radians per second ของเครื่องจักรกล p-ขั้วแม่เหล็กแสดงไว้ในสมการ (3.10) ในหน่วยรอบต่อนาที (rpm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(Induced Voltage)

ในส่วนนี้เป็นการพิจารณาเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3-เฟส โดยถือว่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดทั้ง 3-เฟส สมดุล และการกระจายของรูปคลื่นสนามแม่เหล็กหมุนในช่องอากาศเป็นรูปคลื่นไซนูซอยด์ โดยการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดอธิบายได้จากกฎของ ฟาราเดย์(Faraday's laws) และเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ตามสมการดังต่อไปนี้ คือ

$$B(\theta) = B_{max}\cos\theta \tag{3.19}$$

$$\phi_p = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B(t)\, lr\, d\theta = 2B_{max}\, lr \tag{3.20}$$

เมื่อ ϕ_p คือ เส้นแรงในช่องอากาศต่อขั้วแม่เหล็ก

l คือ ความยาวตามแกนของสเตเตอร์

r คือ รัศมีของสเตเตอร์

เมื่อพิจารณาขดลวดเฟส (Phase coil) ที่ระยะพิชเต็ม(Full-pitch) ของขดลวด N รอบ (coil sides ของแต่ละเฟสห่างกัน 180 องศาทางไฟฟ้าดังรูปที่ 3.5) จะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กหมุน (หรือขั้วแม่เหล็กหมุน) ทำให้เส้นแรงเชื่อมโยง (flux linkage) ของขดลวด (coil)เปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งจากรูปที่ 3.5 (a) เส้นแรงเชื่อมโยงของขดลวด aa' มีค่าสูงสุดเท่ากับ $N\phi_p$ ขณะที่ wt = 0° และเท่ากับศูนย์ที่ wt = 90° ซึ่งเส้นแรงเชื่อมโยง I_a(wt) เปลี่ยนแปลงตาม cosin ของมุม ω ดังนั้น

$$\lambda_a(\omega t) = N\phi_p\cos\omega t \tag{3.21}$$

ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด aa' จากกฎของฟาราเดย์ คือ

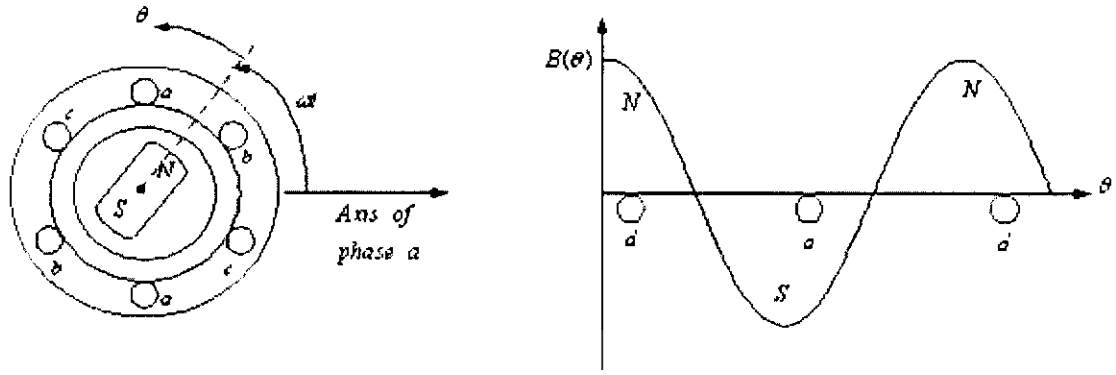
$$e_a = -\frac{d\lambda_a}{dt} = \omega N\phi_p \sin\omega t = E_{max}\sin\omega t \tag{3.22}$$

และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเฟส b และ c กำหนดได้ดังนี้คือ

$$e_b = E_{max}\sin\left(\omega t - 120^\circ\right) \tag{3.23}$$

$$e_c = E_{max}\sin\left(\omega t + 120^\circ\right) \tag{3.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b)

รูปที่ 3.5 การกระจายของความหนาแน่นในช่องอากาศ (Air gap flux density)

ดังนั้นจากสมการที่ (3.22) ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเทอม rms เขียนได้ดังนี้ คือ

$$E_{rms} = \frac{\omega N \phi_p}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N \phi_p}{\sqrt{2}} = 4.44 f N \phi_p \qquad (3.25)$$

สำหรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจึงต้องมีองค์ประกอบตัวคูณลด (K_w) ซึ่งกำหนดไว้ในช่วง 0.85 ถึง 0.95 ดังนั้นค่า rms ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับขดลวดที่วางกระจายคือ

$$E_{rms} = 4.44 f N_{ph} \phi_p K_w \qquad (3.26)$$

เมื่อ N_{ph} คือ จำนวนรอบของขดลวดทั้งหมดที่ต่ออนุกรมกันต่อเฟส

3.4 เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำหลายเฟส

3.4.1 การทำงานขณะหยุดนิ่ง (Standstill operation)

เมื่อพิจารณาเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ 3-เฟส แบบขดลวดพัน (Wound-rotor) ขณะโรเตอร์เปิดวงจรถ้าขดลวดสเตเตอร์ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนทั้งในขดลวด สเตเตอร์และโรเตอร์ เกิดขึ้นที่ความถี่เดียวกันคือ f_1 โดยที่ขนาดของแรงดันดังกล่าวนั้น พิจารณาได้จากสมการที่ (3.26) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 \phi_p K_{w1} \quad (3.27)$$

$$E_2 = 4.44 f_1 N_2 \phi_p K_{w2} \quad (3.28)$$

โดยที่ E_1 คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดสเตเตอร์

E_2 คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์(ที่ความถี่ f_1)

ดังนั้น

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \times \frac{K_{w1}}{K_{w2}} \quad (3.29)$$

และถ้าองค์ประกอบตัวคูณลด K_{w1} และ K_{w2} มีค่าเท่ากันอัตราส่วนจำนวนรอบ (turns ratio) กำหนดได้ดังนี้ คือ

$$\text{อัตราส่วนจำนวนรอบ} = \frac{E_1}{E_2} \cong \frac{N_1}{N_2} \quad (3.30)$$

3.4.2 การเลื่อนเฟส (Phase shifter)

ถ้าทำให้โรเตอร์หยุดหมุนในตำแหน่งใด ๆ ที่สัมพันธ์กับแนวแกนขดลวดเฟสของสเตเตอร์ โดยที่โรเตอร์ทำมุม β ดังรูปที่ 3.6 (a) ซึ่งกรณีนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดโรเตอร์เลื่อนเฟสไปจากขดลวดสเตเตอร์เป็นมุม β ดังรูปที่ 3.6 (b) และ (c) ดังนั้นสามารถใช้หลักการของการเลื่อนเฟสมาพิจารณาเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำแบบขดลวดพัน โดยการหมุนของโรเตอร์ 1 รอบทางกลมีการเลื่อนเฟส อยู่ในช่วง 360° ทางไฟฟ้า

3.4.3 การทำงาน(หมุน)ของมอเตอร์(Running Operation)

ถ้าป้อนไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย 3-เฟสเข้าสู่ขดลวดสเตเตอร์และวงจรโรเตอร์ถูกปิด ส่งผลทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในวงจรโรเตอร์ โดยกระแสเหนี่ยวนำในโรเตอร์ทำให้เกิดแรงบิด (Torque) ขึ้นตามกฎของเลนซ์ (Lenz's law) และการหมุนโรเตอร์จะมีทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนที่ความสัมพันธ์กับความเร็วระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนและการลดลงของความเร็วโรเตอร์ ซึ่งมีผลทำให้ความเร็วที่โรเตอร์หมุน (n_m) น้อยกว่าความเร็ว n_s สำหรับกรณี $n_m = n_s$ นั้นไม่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสในโรเตอร์ ซึ่งมีผลทำให้ไม่เกิดแรงบิดด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

62650

ความแตกต่างระหว่างความเร็วโรเตอร์ n_m และความเร็วซิงโครนัส n_s เรียกว่า สลิป (Slip(s)) ซึ่งกำหนดได้ดังนี้ คือ

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \tag{3.31}$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน และความเร็วโรเตอร์ เมื่อพิจารณาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสในวงจรโรเตอร์ที่ความถี่ f_2 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้ คือ

$$f_2 = \frac{p}{120}\left(n_s - n_m\right) = \frac{p}{120} s n_s = s f_1 \tag{3.32}$$

f_2 คือความถี่ในวงจรโรเตอร์ เรียกว่า ความถี่สลิป(slip frequency) และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจรโรเตอร์ที่ค่าสลิป s คือ

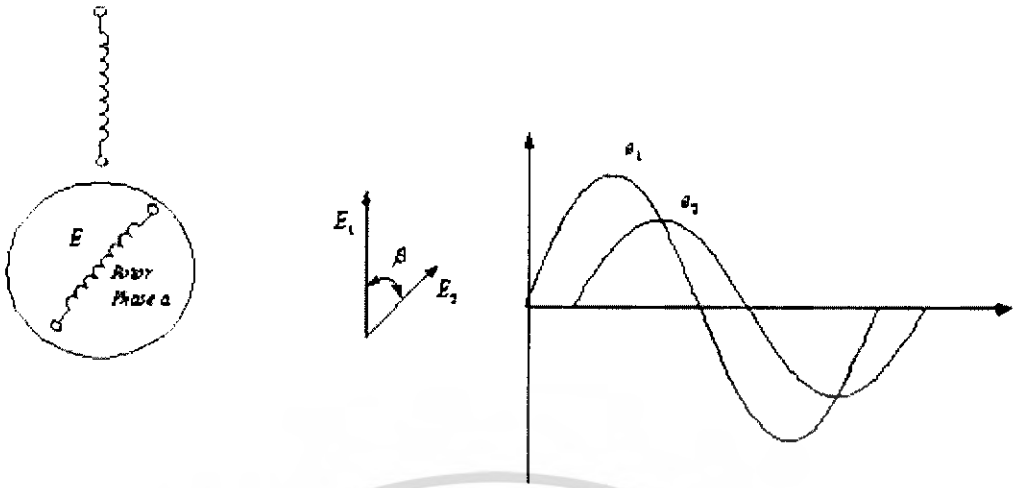
$$E_{2s} = 4.44 f_2 N_2 \phi_p K_{w2} = 4.44 s f_1 N_2 \phi_p K_{w2} = s E_2 \tag{3.33}$$

เมื่อ E_2 คือ แรงดันเหนี่ยวนำในวงจรโรเตอร์ขณะอยู่นิ่งที่ความถี่ f_1 และกระแสเหนี่ยวนำในขดลวดโรเตอร์ทั้ง 3-เฟส ที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่ความเร็ว n_r กำหนดได้ดังนี้คือ

$$n_r = \frac{120 f_2}{p} = \frac{120 s f_1}{p} = s n_s \tag{3.34}$$

และเนื่องจากโรเตอร์ตัวมันหมุนที่ความเร็ว n_m ดังนั้นการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนที่โรเตอร์ในช่องอากาศที่ความเร็ว $n_m + n_r = (1-s)n_s + s n_s = n_s$ นั่นหมายความความว่าสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ในช่องอากาศจะเกิดขึ้นที่ความเร็วเดียวกับความเร็วซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b) (c)

รูปที่ 3.6 การเลื่อนเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.5 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีโรเตอร์เป็นประเภทไม่มีขั้วยื่น ดังนั้น ช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์จึงมีขนาดเท่ากันตลอด (Uniform air-gap) การเกิดแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงมีหลักการเดียวกับการเกิดแรงบิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้าซนิดโรเตอร์ไม่มีขั้วยื่น

3.5.1 การเกิดแรงบิดในมอเตอร์ชนิดไม่มีขั้วยื่น

เมื่อมีกระแสไหลในสเตเตอร์และโรเตอร์ จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นที่สเตเตอร์และโรเตอร์ เส้นแรงแม่เหล็กดังกล่าวจะเกี่ยวคล้องกันผ่านช่องว่างอากาศระหว่างขดลวดทั้งสองนี้ เรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กร่วม (Mutual Flux) ซึ่งเป็นเส้นแรงแม่เหล็กส่วนมากในเครื่องจักรกลไฟฟ้า ในส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กส่วนน้อยที่ไม่ได้ผ่านช่องว่างอากาศแต่จะเกี่ยวคล้องเฉพาะที่ตัวขดลวดที่กำเนิดเส้นแรงนั้นเรียกว่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage Flux) ในส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงบิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นจะพิจารณาเฉพาะเส้นแรงแม่เหล็กร่วมเท่านั้น ส่วนเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลจะมีผลต่อสมรรถนะของเครื่องจักร โดยผลของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลจะมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปของค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage Inductance)

ในการพิจารณาการเกิดแรงบิดจะพิจารณาจากเส้นแรงแม่เหล็กร่วมลัพธ์ (Resultance Mutual Flux) โดยพิจารณาในเทอมของ Magnetic Coenergy ที่สะสมอยู่ในช่องว่างอากาศในรูปของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์, โรเตอร์และมุม δ_s ระหว่างแกนแม่เหล็กทั้งสอง ซึ่งแรงบิดสามารถคำนวณได้จากการหาอนุพันธ์เชิงซ้อน (Partial Derivative) ของ Coenergy กับมุม δ_s ในการพิจาณากำหนดให้สนามแม่เหล็กแนวเส้นสัมผัสมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังนั้นจึงพิจาณาเฉพาะสนามแม่เหล็ก H ในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางเท่านั้น เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการอินทิเกรตเชิงเส้นความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผ่านช่องอากาศจะได้เท่ากับ Hg ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ $\Im_{sr}$ ดังสมการ

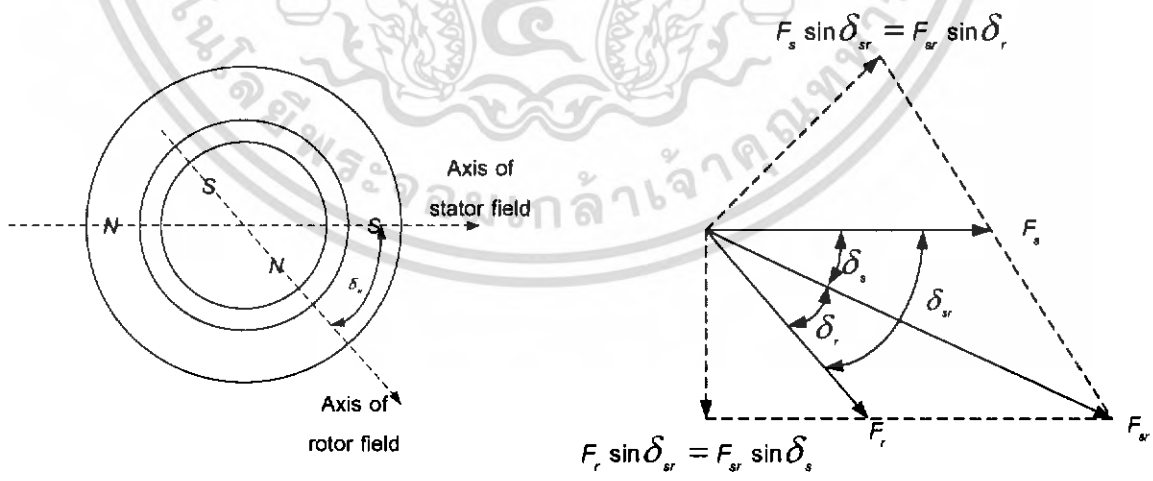
$$H_g = \Im_{sr} \tag{3.35}$$

สัญลักษณ์ $\Im_{sr}$ แสดงให้เห็นว่าค่า mmf wave เป็นฟังก์ชันของมุมรอบ ๆ เส้นรอบวงของ สเตเตอร์ เวคเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ F_{sr} เกิดจากผลรวมทางเวคเตอร์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์ F_s และโรเตอร์ F_r ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการการรวมกันทางเวคเตอร์ได้ดังนี้

$$F_r^2 = F_s^2 + F_r^2 + 2F_sF_r\cos\delta_{sr} \tag{3.36}$$

ค่า F แทนค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ดังนั้นสนามแม่เหล็กลัพธ์ H มีการกระจายตัวแบบไซนูซอยด์ ซึ่งค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กลัพธ์หาได้จากสมการ

$$H_{peak} = \frac{F_{sr}}{g} \tag{3.37}$$



รูปที่ 3.7 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสองขั้วอย่างง่าย (a) แบบจำลองพื้นฐาน (b) ไดอะแกรมของเวคเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของ Coenergy density ในช่องว่างอากาศ ณ จุดใดๆในเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กเท่ากับ H มีค่าเท่ากับ $\frac{\mu_0}{2}H^2$ ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของ Coenergy density มีค่าเท่ากับ

$$\frac{\mu_0}{2}\frac{H_{peak}^2}{2}$$

$$\frac{\mu_0}{4}\left(\frac{F_{sr}}{g}\right)^2 \tag{3.38}$$

โดย μ_0 = ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ

F_{sr} = ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ (ampere-turn)

g = ระยะช่องว่างอากาศ (m)

H_{peak} = ค่าสูงสุดของความเข้มสนามแม่เหล็ก

ดังนั้น ค่า Coenergy ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ

W'_{fld} = (ค่าเฉลี่ยของ Coenergy density)(ปริมาณของช่องว่างอากาศ)

$$= \frac{\mu_0}{4}\left(\frac{F_{sr}}{g}\right)^2 \pi D l g$$

$$= \frac{\mu_0 \pi D l g}{4g} F_{sr}^2 \tag{3.39}$$

โดยที่ D = ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างอากาศ (m)

l = ความยาวในแนวแกนของช่องว่างอากาศ (m)

g = ระยะช่องว่างอากาศ (m)

จากสมการที่ 3.36 จะได้ค่า Coenergy ที่สะสมอยู่ในช่องว่างอากาศในรูปของค่าสูงสุดของขนาดแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์ดังสมการ

$$W'_{fld} = \frac{\mu_0 \pi D l g}{4g}(F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos\delta_{sr}) \tag{3.40}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ 3.40 สามารถหาสมการของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าได้โดยการหาอนุพันธ์เชิงซ้อนระหว่าง Coenergy และมุมระหว่างแกนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าของสเตเตอร์และโรเตอร์ซึ่งจะได้สมการแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีสองขั้วดังนี้

$$T = +\frac{\partial W'_{fd}}{\partial \delta_{sr}} = -\frac{\mu_0 \pi DI}{2g} F_s F_r \sin\delta_{sr} \qquad (3.41)$$

ในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้ามีจำนวน P ขั้ว จะได้สมการแรงบิดอยู่ในรูป

$$T = -\frac{P}{2}\frac{2}{2}\frac{\mu_0 \pi DI}{g} F_s F_r \sin\delta_{sr} \qquad (3.42)$$

จากรูปที่ 3.7b จะพบว่า $F_r \sin\delta_{sr}$ เป็นส่วนประกอบของ F_r ในแนวตั้งฉากกับ F_s และ $F_s \sin\delta_{sr}$ เป็นส่วนประกอบของ F_s ในแนวตั้งฉากกับ F_r ซึ่งจากสมการที่ 3.42 แสดงให้เห็นว่าค่าแรงบิดแปรผันกับผลคูณเชิงเวคเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์ เมื่อพิจารณาจารูปที่ 3.7 b จะได้ความสัมพันธ์

$$F_s \sin\delta_{sr} = F_{sr} \sin\delta_r \qquad (3.43)$$

$$F_r \sin\delta_{sr} = F_{sr} \sin\delta_s \qquad (3.44)$$

จากความสัมพันธ์ดังสมการ 3.43 และ 3.44 เมื่อทำการแปลงรูปแบบสมการให้อยู่ในรูปแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์จะได้

$$T = -\frac{P}{2}\frac{\pi}{2}\frac{\mu_0 DI}{g} F_s F_{sr} \sin\delta_r \qquad (3.45)$$

$$T = -\frac{P}{2}\frac{\pi}{2}\frac{\mu_0 DI}{g} F_r F_{sr} \sin\delta_r \qquad (3.46)$$

จากสมการที่ 3.42, 3.45 และ 3.46 เป็นการนำเสนอรูปแบบของสมการแรงบิดใน 2 รูปแบบคือ

1. แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กของแต่ละส่วนโดยแยกเป็นส่วนของสเตเตอร์และโรเตอร์ดังสมการที่ 3.42

2. แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์และส่วนของสเตเตอร์หรือโรเตอร์ดังสมการที่ 3.45 และ 3.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.42, 3.45 และ 3.46 พบว่าค่าสนามแม่เหล็กจะถูกนำเสนอในรูปแบบของค่าสูงสุดของรูปคลื่นของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ถ้ากำหนดให้แกนเหล็กไม่มีการอิ่มตัว จะพบว่าค่าสนามแม่เหล็กสามารถนำเสนอในรูปค่าสูงสุดของรูปคลื่นของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กหรือเส้นแรงต่อขั้ว ดังนั้นค่าสูงสุดของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B จะได้จากสมการ $\frac{\mu_o F}{g}$ เมื่อ F แทนค่าสูงสุดของรูปคลื่นของแรงเคลื่อนแม่เหล็กดังนั้นจากสมการที่ 3.46 เมื่อต้องการนำเสนอแรงบิดในรูปของฟลักความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์จะได้ดังสมการ

$$T = -\frac{P}{2}\frac{\pi Dl}{2} B_{sr} F_r \sin\delta_r \tag{3.47}$$

ในการออกแบบอุปกรณ์ทางด้าน electromagnetic จะมีข้อจำกัดอยู่ที่การอิ่มตัวของสารแม่เหล็กซึ่งค่าสูงสุดของรูปคลื่นของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กลัพธ์ B_{sr} มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 – 2.0 T เพื่อให้เกิดความสะดวกในการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าดังนั้นจึงสามารถแปลงรูปสมการให้อยู่ในรูปของเส้นแรงแม่เหล็กลัพธ์โดย

$$\Phi = (\text{ค่าเฉลี่ยของค่า } B \text{ ในแต่ละขั้ว})(\text{พื้นที่ของขั้วแม่เหล็ก}) \tag{3.48}$$

ค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นสัญญาณแบบไซนูซอยด์ในครึ่งลูกคลื่นมีค่าเท่ากับ $2/\pi$ คูณกับค่าสูงสุดของรูปคลื่นดังสมการ

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B \frac{\pi Dl}{P} = \frac{2Dl}{P} B \tag{3.49}$$

ค่า B แทนค่าสูงสุดของรูปคลื่นของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ดังนั้นผลลัพธ์ของสมการที่ 3.47 คือ

$$T = -\frac{\pi}{2}\left(\frac{P}{2}\right)^2 \Phi_{sr} F_r \sin\delta_r \tag{3.50}$$

โดยที่ Φ_{sr} = เส้นแรงแม่เหล็กลัพธ์ซึ่งสร้างโดยสเตเตอร์และโรเตอร์

δ_r = มุมระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กของโรเตอร์และแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การเกิดแรงบิดในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.5 ซึ่งค่าแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีลักษณะเดียวกับการเกิดแรงบิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดไม่มีขั้วยื่นซึ่งสมการแรงบิดแสดงดังสมการที่ 3.50 จากสมการที่ 3.50 พิจารณาเทอมของ Φ_r โดยกำหนดให้ Φ_r มีค่าคงที่เมื่อมีการป้อนแรงดันและความถี่ที่คงที่ให้แก่สเตเดอร์ทำให้เทอม $-\frac{\pi}{2}\left(\frac{P}{2}\right)^2 \Phi_r$ ของสมการ 3.50 มีค่าคงที่ เมื่อพิจารณาแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์ F_r ซึ่งค่าดังกล่าวจะมีขนาดแปรผันตามขนาดของกระแสที่โรเตอร์ I_r ดังนั้นเมื่อจัดรูปแบบสมการแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้อยู่ในรูปอย่างง่ายจะได้สมการ

$$T = KI_r \sin\delta_r \tag{3.51}$$

โดยที่ K = ค่าคงที่

3.6 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

รูปแบบหนึ่งในการพิจารณารูปคลื่นของเส้นแรงแม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็กคือการพิจารณาจากวงจรสมมูลโดยพิจารณาให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้รับการกระตุ้นจากแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟสสมดุล ในการพิจารณาวงจรสมมูลนั้นจะทำการพิจารณาแยกเป็นเฟสไป โดยมีการกำหนดให้มีการต่อวงจรของมอเตอร์เป็นแบบ Y และแรงดันที่ปรากฏที่ขั้วของวงจรสมมูลเป็นแรงดันเฟส ส่วนกระแสเป็นกระแสไลน์ ลักษณะของวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเหมือนกับหม้อแปลงโดยเริ่มพิจารณาจากด้านสเตเตอร์ก่อนซึ่งสมการซึ่งอธิบายวงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์เป็นดังนี้

$$\hat{V}_1 = \hat{E}_1 + \hat{I}_1\left(R_1 + jX_1\right) \tag{3.52}$$

โดยที่ $\hat{V}_1$ = แรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์ (V)

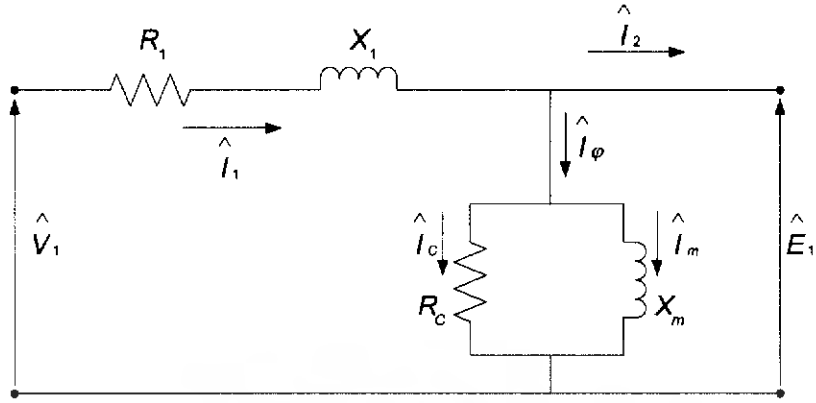
$\hat{E}_1$ = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสร้างจากเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ (V)

$\hat{I}_1$ = กระแสสเตเตอร์(A)

R_1 = ความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ (Ω)

X_1 = ค่า reactance ที่สเตเตอร์ (Ω)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศถูกสร้างจากผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งจากรูปที่ 3.8 กระแสสเตเตอร์ $\hat{I}_1$ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือส่วนประกอบทางด้ารภาระ (load component) $\hat{I}_2$ ซึ่งเป็นส่วนที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ และส่วนที่สองคือ ส่วนประกอบทางด้านกระตุ้นหรือกระแสกระตุ้น (exiting component) $\hat{I}_\varphi$ ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศแบะเป็นฟังก์ชั่นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ $\hat{E}_1$ กระแสกระตุ้นจะถูกแบ่งเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกอยู่ในรูปการสูญเสียที่แกนเหล็ก(core loss component) $\hat{I}_c$ ซึ่งมีเฟสทับกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า $\hat{E}_1$ ส่วนที่สองอยู่ในรูปของกระแสที่สร้างสนามแม่เหล็ก $\hat{I}_m$ ซึ่งล้าหลัง $\hat{E}_1$ อยู่90 องศา ซึ่งในวงจรสมมูลจะแสดงการสูญเสียในแกนเหล็กในรูปของ R_c ต่อขนานอยู่กับส่วนที่สร้างสนามแม่เหล็กในรูปของ X_m ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะต่ออยู่กับแรงเคลื่อนไฟฟ้า $\hat{E}_1$

เมื่อพิจารณาโรเตอร์ที่ความเร็วรอบและเส้นแรงเดียวกันโดยใช้หลักการเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการ transfer ส่วนประกอบทางด้าน secondary มาด้าน primary โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ primary และ secondary ในรูปของ turn ratio

$$\hat{E}_{2s} = a\hat{E}_{rotor} \tag{3.53}$$

โดยที่ $\hat{E}_{2s}$ = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจรสมมูลของโรเตอร์

$\hat{E}_{rotor}$ = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจริงที่โรเตอร์

a = turn ratio

ในส่วนของความสัมพันธ์ทางด้านกระแสก็เช่นเดียวกับแรงดันไฟฟ้าโดยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสจริงที่โรเตอร์ $\hat{I}_{rotor}$ และกระแสในวงจรสมมูลของโรเตอร์ $\hat{I}_{2s}$ เป็นดังสมการที่ 3.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{I}_{2s} = \frac{\hat{I}_{rotor}}{a} \tag{3.54}$$

เมื่อนำสมการที่ 3.53 มาหารด้วยสมการที่ 3.54 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง impedance ของวงจรสมมูลของโรเตอร์ Z_{2s} และค่า impedanceของวงจรโรเตอร์จริง Z_{rotor}

$$Z_{2s} = \frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}} = \frac{a^2 \hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{rotor}} = a^2 Z_{rotor} \tag{3.55}$$

จากสมการที่ 3.53, 3.54 และ 3.55 ค่า E_{2s}, I_{2s} และ Z_{2s} เป็นค่าที่ได้จากการ transfer ตัวแปรและพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์มาทางสเตเตอร์โดยอาศัยหลักการของหม้อแปลงโดยมองจากกรอปอ้างอิงของโรเตอร์(rotor reference frame) โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.56

$$\frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}} = Z_{2s} = R_2 + jsX_2 \tag{3.56}$$

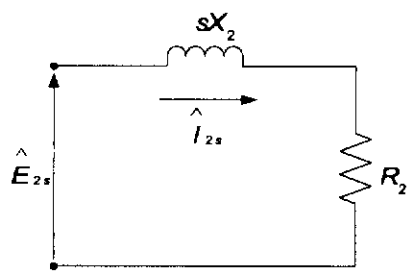
โดยที่ Z_{2s} = ค่า impedance ของโรเตอร์ที่ความถี่สลิปอ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์

R_2 = ค่าความต้านทานของโรเตอร์อ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์

sX_2 = ค่า reactance ของโรเตอร์อ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์ที่ความถี่สลิป

จากสมการที่ 3.56 จะได้ค่า reactance มีค่าแปรผันกับค่าสลิปของมอเตอร์โดยที่ X_2 เป็นค่า reactance ที่ความถี่เดียวกับสเตเตอร์ เมื่อมองโรเตอร์จากกรอปอ้างอิงโรเตอร์(rotor reference frame) จะได้วงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 3.9

เมื่อพิจารณาค่าตัวแปรต่างๆของโรเตอร์โดยมองจากกรอปอ้างอิงของสเตเตอร์ (stator reference frame) พบว่าเมื่อมองจากด้านสเตเตอร์จะพบว่ารูปคลื่นของเส้นแรงแม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส โดยเส้นแรงแม่เหล็กดังกล่าวจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์ $\hat{E}_1$ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ $\hat{E}_{2s}$ ซึ่งหากว่า ไม่มีผลจากความเร็วของโรเตอร์(โรเตอร์หยุดนิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสเตเตอร์)



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความถี่สลิป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์จะเท่ากับที่สเตเตอร์ แต่เนื่องจากโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วใดๆ ทำให้มีความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์เท่ากับ s ซึ่งส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์มีความสัมพันธ์กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์ดังสมการ 3.57

$$\hat{E}_{2s} = s\hat{E}_1 \tag{3.57}$$

ในส่วนประกอบทางด้านภาระ(load component) I_2 ของกระแสทางด้านสเตเตอร์ใช้สำหรับสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อต่อต้านแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์เพื่อรักษาระดับเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศไว้ และเนื่องจากสมมติให้จำนวนรอบของขดลวดทางด้านโรเตอร์และสเตเตอร์มีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง I_2 และ I_{2s} เป็นดังสมการ 3.58

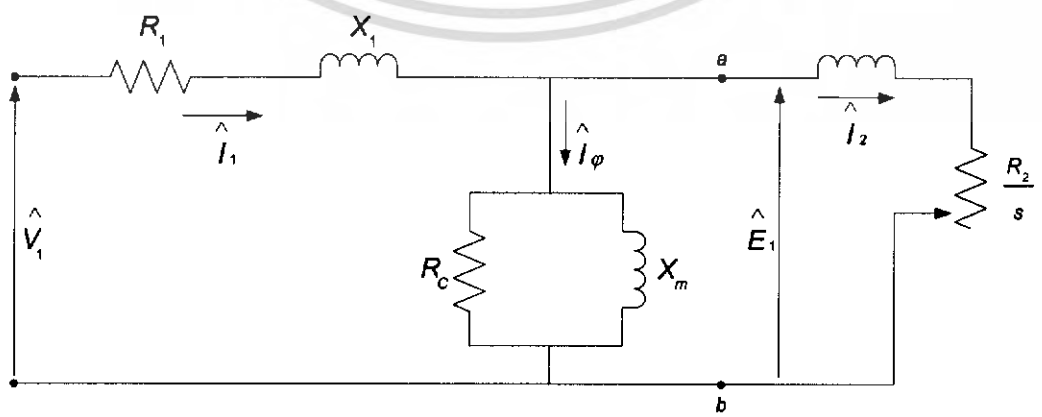
$$\hat{I}_{2s} = \hat{I}_2 \tag{3.58}$$

เมื่อนำสมการที่ 3.57 หารด้วยสมการที่ 3.58 จะได้

$$\frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}} = \frac{s\hat{E}_1}{\hat{I}_2} \tag{3.59}$$

เมื่อนำผลของความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ามาพิจารณาร่วมกับสมการที่ 3.56 และสมการที่ 3.59 จะได้ความสัมพันธ์

$$\frac{s\hat{E}_2}{\hat{I}_2} = \frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}} = R_2 + jsX_2 \tag{3.60}$$



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าสลิปหารทั้งสองข้างของสมการที่ 3.60 จะได้

$$\frac{\hat{E}_1}{\hat{I}_2} = \frac{R_2}{s} + jX_2 \tag{3.61}$$

เป็นการพิจารณาองค์ประกอบของโรเตอร์จากกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์ และเมื่อพิจารณาทางกายภาพพบว่าสัญญาณไฟฟ้าบนโรเตอร์ซึ่งมีความถี่ *sf* โดยมีทิศทางไปในทางเดียวกับโรเตอร์ซึ่งมีความถี่ (1-s)f ดังนั้นเมื่อมองจากกรอบอ้างอิงของโรเตอร์พบว่าสัญญาณไฟฟ้าที่โรเตอร์มีความถี่เท่ากับ *sf* แต่เมื่อพิจารณาจากกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์จะพบว่าสัญญาณไฟฟ้าบนโรเตอร์จะมีความถี่เท่ากับ ความถี่ซิงโครนัสนั่นเอง (synchronous frequency) เมื่อพิจาณาในรูปของวงจรสมมูลจะได้ดังรูปที่ 3.10

3.7 การวิเคราะห์วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ภายหลังจากที่ได้วงจรสมมูลแล้ว สามารถนำวงจรสมมูลมาคำนวณหาสมรรถนะและคุณลักษณะต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำอันได้แก่ กำลังไฟฟ้า, แรงบิด เป็นต้น

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.10 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ transfer ผ่านช่องอากาศ (power transfer across the airgap) P_{g1} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.62 โดยอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์

$$P_{g1} = q_1 \hat{I}_2^2 \frac{R_2}{s} \tag{3.62}$$

ค่า q_1 แทนจำนวนเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากสมการที่ 3.62 กำลังไฟฟ้าที่ได้เป็นกำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่ส่งผ่านช่องว่างอากาศโดยกำลังไฟฟ้าดังกล่าวสามารถแยกออกได้เป็นสองส่วนคือส่วนที่เป็นการสูญเสียที่สเตเตอร์ในรูปความร้อนดังสมการที่ 3.63

$$rotor\ I^2 Rloss = q_1 \hat{I}_2^2 R_2 \tag{3.63}$$

อีกส่วนคือส่วนที่แปลงรูปพลังงานมาเป็นพลังงานกลดังสมการที่ 3.64

$$P = P_{g1} - rotor\ \hat{I}^2\ Rloss = q_1 \hat{I}_2^2 \frac{R_2}{s} - q_1 \hat{I}_2^2 R_2 \tag{3.64}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.64 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปที่กะทัดรัดขึ้นได้

$$P = q_1 \hat{I}_2^2 R_2 \frac{(1-s)}{s} \tag{3.65}$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปของ P_{g1} ดังสมการที่ 3.66

$$P = (1-s)P_{g1} \tag{3.66}$$

จากสมการที่ 3.64, 3.65 และ 3.66 เมื่อนำมาเขียนในรูปของวงจรสมมูลซึ่งแยกองค์ประกอบที่เป็นการสูญเสียในรูปของความร้อนและในรูปของกำลังทางกลออกได้ดังรูปที่ 3.11

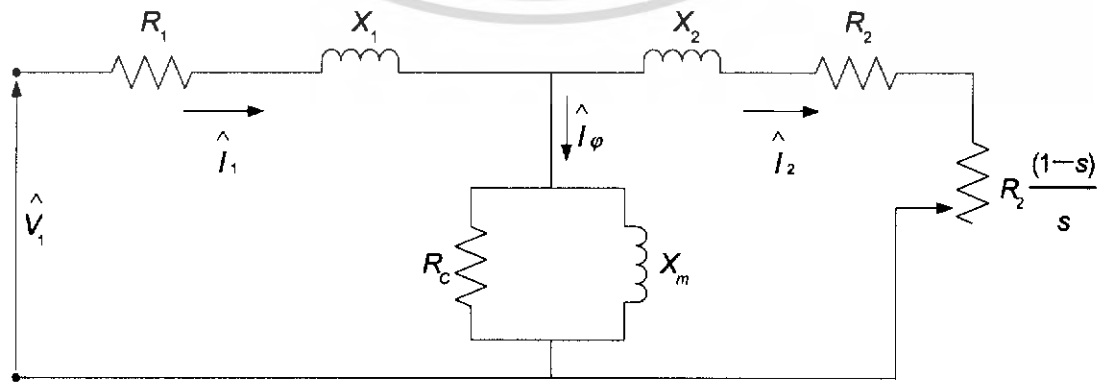
โดยค่า R_2 เป็นตัวแทนความสูญเสียในรูปของความร้อนและ $R_2\frac{(1-s)}{s}$ แทนส่วนที่เป็นกำลังงานทางกล

ค่า electromagnetic torque T_e เป็นแรงบิดที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์ ซึ่งผลคูณระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ความเร็วซิงโครนัส ω_s จะได้กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 3.67

$$P = (1-s)\omega_s T_e \tag{3.67}$$

เมื่อนำสมการที่ 3.65 มาพิจารณาร่วมกับสมการที่ 3.35 จะได้สมการแรงบิดดังสมการที่ 3.68

$$T_e = \frac{1}{\omega_s} q_1 \hat{I}_2^2 \frac{R_2}{s} \tag{3.68}$$



รูปที่ 3.11 วงจรสมมูลในอีกรูปแบบหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ค่า q_1 จะมีค่าเท่ากับ 3 ดังนั้น สมการที่ 3.68 จะกลายเป็น

$$T_e = 3\hat{I}_2^2 \frac{R_2}{s\omega_s} \tag{3.69}$$

ในส่วนของค่าความเร็วซิงโครนัส ω_s สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.70

$$\omega_s = \frac{4\pi f}{p} \tag{3.70}$$

โดยที่ p = จำนวนขั้วของมอเตอร์

f = ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า

ค่าแรงบิดที่ได้จากสมการที่ 3.69 เป็นค่าแรงบิดภายในมอเตอร์เท่านั้น ซึ่งยังไม่เป็นค่าแรงบิดที่ใช้ขับภาระด่าง ๆ ซึ่งต้องนำค่าความสูญเสียทางกลเนื่องจากความเสียดทานและแรงต้านของลมและค่า stray load losses ออกเสียก่อนจึงจะได้ค่าแรงบิดที่เพลาใช้ขับภาระจริง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

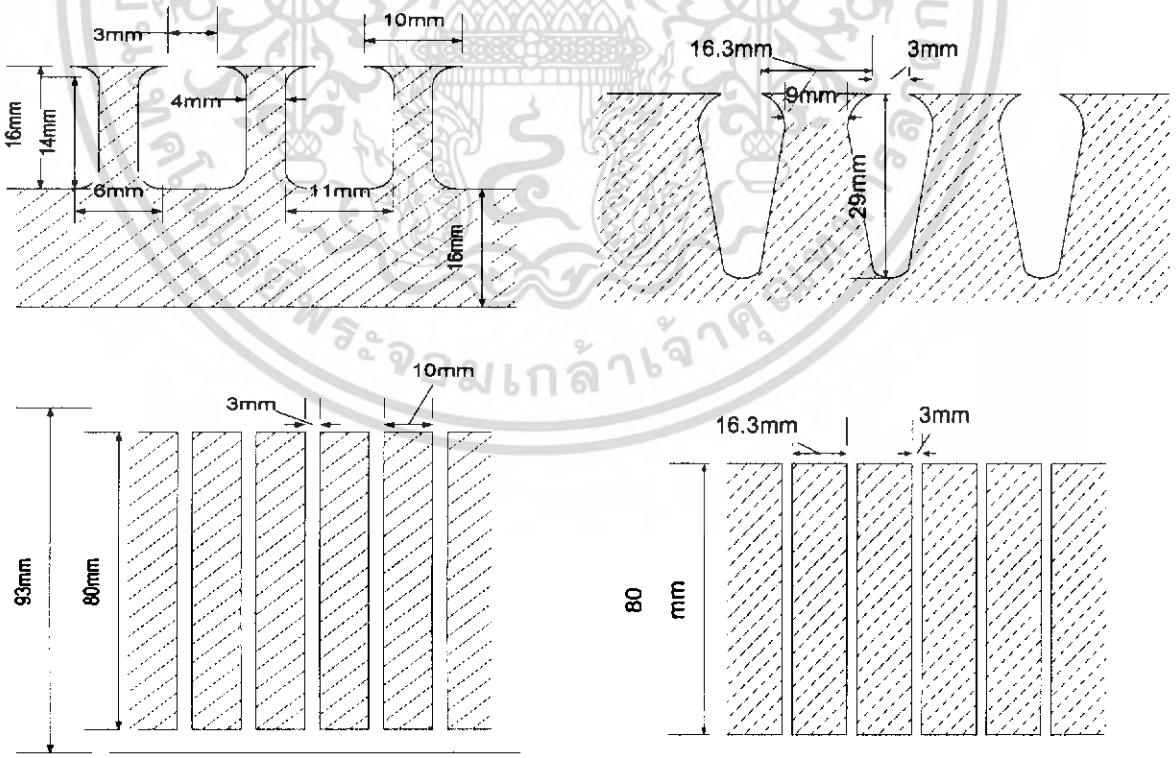
บทที่4
การออกแบบการทดลองและการพันมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

4.1 มอเตอร์ที่ใช้ทำการทดลอง

มอเตอร์ที่ใช้ทำการทดลองทฤษฎีต่าง ๆ ในช่วงแรกนี้เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด "Wound-Rotor Induction Motor" ยี่ห้อ Thai Generator 3-phase 2kW 220/380V 3A 1450rpm ซึ่งเราได้ทำการซ่อมแซมและพันขดลวดขึ้นใหม่โดยอาศัยการคำนวณพื้นฐานเพื่อหาจำนวนรอบ, ขนาดของลวดที่ใช้ และรูปแบบการพันที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลของมอเตอร์ที่ใช้ทำการทดลอง

ข้อมูล	Stator	Rotor
จำนวนร่อง slot	36	24
ความยาวแกนเหล็ก	80 mm	80 mm
เส้นผ่านศูนย์กลาง	151.2 mm	149.6 mm
เส้นรอบวงแกนเหล็ก	475 mm	470 mm
ขนาด Air Gap	0.8 mm	



รูปที่ 4.1 รูปร่างและขนาดร่อง Slot ของสเตเตอร์และโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การออกแบบการพันขดลวดใหม่สำหรับมอเตอร์ที่จะใช้ทำการทดสอบ

Stator Part

$$Flux \text{ per pole} = \frac{B_{av}\pi DL}{P}$$

$$= \frac{0.6 \times \pi \times 15.12 \times 8 \times 10^{-4}}{4}$$

$$= 5.7 \times 10^{-3} \quad \text{Wb}$$

- Stator turns per phase

$$T_s = \frac{E_s}{4.44 f \phi_m}$$

$$= \frac{220}{4.44 \times 50 \times 5.7 \times 10^{-3}} = 173.84 \approx 180 \ turns$$

; $Q = 2kW$

- Stator current per phase

$$I_s = \frac{Q}{3E_s} = \frac{2000}{3 \times 220} = 3.03 \ A$$

-Area of each stator conductor

$$\delta_s = 3 \quad ; \quad a_s = \frac{I_s}{\delta_s} = \frac{3.03}{3} = 1.01 \ mm^2$$

$$\delta_s = 4 \quad ; \quad a_s = \frac{I_s}{\delta_s} = \frac{3.03}{4} = 0.7575 \ mm^2$$

;เลือกใช้ที่ $\delta_s = 4 \rightarrow$ SWG No.19 Area 0.811 mm^2

-Conductor per stator slot

$$Z_{ss} = \frac{6T_s}{S_s} = \frac{6 \times 180}{36} = 30 \ conductors$$

-Approximate area of each slot

$$Approximate \ area \ of \ each \ slot = \frac{Z_{ss} \times a_s}{space \ factor}$$

$$= \frac{30 \times 0.811}{0.4}$$

$$= 60.825 \ mm^2$$

-Area of each slot

$$Area \ of \ each \ stator \ slot = \frac{1}{2} \times (9 + 10.5) \times 14 = 136.5 \ mm^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-%copper of each stator slot

$$\%copper\ of\ each\ stator\ slot = \frac{60.825}{136.5} \times 100 = 44.56\%$$

Rotor Part

-Rotor turns per phase

$$T_r = \frac{E_r}{E_s} \bullet T_s = \frac{220 \times 180}{220} = 180\ turns$$

-Rotor current per phase

$$I_r = 0.85\left(\frac{I_s T_s}{T_r}\right) = \frac{0.85 \times 3.03 \times 180}{180} = 2.5755\ A$$

-Rotor conductor area

$$\delta_s = 3 \quad ; \quad a_r = \frac{I_r}{\delta_r} = \frac{2.5755}{3} = 0.8585\ mm^2$$

$$\delta_s = 4 \quad ; \quad a_r = \frac{I_r}{\delta_r} = \frac{2.5755}{4} = 0.6438\ mm^2$$

;เลือกใช้ที่ $\delta_s = 4 \rightarrow$ SWG No.19 Area 0.811 mm^2

-Conductor per rotor slot

$$Z_{rs} = \frac{6T_r}{S_r} = \frac{6 \times 180}{24} = 45\ \ conductors$$

$$\approx Z_{rs} = \frac{6T_r}{S_r} = \frac{6 \times 184}{24} = 46\ \ conductors$$

-Approximate area of each slot

$$Approximatea\ area\ of\ each\ slot = \frac{Z_{rs} \times a_r}{space\ factor}$$

$$= \frac{46 \times 0.811}{0.4}$$

$$= 93.265\ mm^2$$

-Area of each rotor slot

$$Area\ of\ each\ rotor\ slot = (4 \times 25) + \left(\frac{5.5 \times 25}{2}\right) = 168.75\ mm^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-%copper of each slot

$$\%copper\ of\ each\ \text{rotor}\ slot = \frac{93.625}{168.75} \times 100 = 55.27\%$$

4.3 การพันมอเตอร์และการต่อหัวสาย

การต่อมอเตอร์สามเฟสใช้งาน มอเตอร์สามเฟสนั้น โพลแต่ละโพลจะประกอบด้วยขดลวด 3 ชุด หรือ 3 เฟสคือ เฟส A เฟส B และเฟส C การต่อขดลวดมี 2 แบบด้วยกันคือ แบบสตาร์หรือวาย(Y) และ แบบเดลต้า (Δ) ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดต่อไป โดยจะเริ่มต้นภายหลังจากการพันขดลวดเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขดลวดแต่ละเฟสที่ขั้วแม่เหล็กแต่ละโพลนั้น จะมีปลาย 2 เส้นคือ ต้นกับปลาย ขดลวด 1 เฟสจะมี 3 คอยล์ ต่อปลายสายแต่ละคอยล์อันดับกัน

แล้วจะเหลือปลายสายต้นกับปลายเพียงชุดละ 2 เส้นเท่านั้น ดังนั้นกรณีมอเตอร์ชนิด 4 ขั้วแม่เหล็กนี้จะมีขดลวด 4 ชุดในแต่ละเฟส เมื่อเขียนแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าแทนขดลวดแต่ละเฟสจะได้ดังรูปที่ 4.2

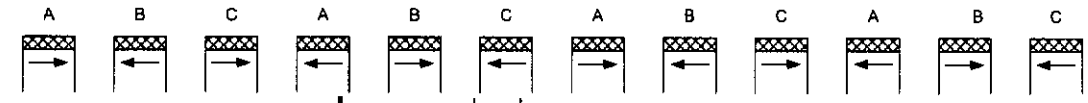
พร้อมกันนี้เราก็จะให้ทิศทางของกระแสไฟไหลในแต่ละเฟสที่จะสร้างสนามแม่เหล็กหมุน มีทิศทางดังรูปที่ 4.2 ด้วย คือถ้าให้กระแสที่ไหลผ่านเฟส A สร้างสนามแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือแล้ว กระแสไฟของเฟส B ที่อยู่ใกล้ๆ ก็จะต้องสร้างสนามแม่เหล็กเป็นขั้วใต้ขึ้นมาสลับกันอย่างนี้เรื่อยไปจนหมดทุกเฟส และทุกโพล การต่อขดลวดแต่ละเฟสกระทำได้ดังนี้ คือ เริ่มต้นจากขดลวดเฟส A ต่อสายไฟเข้าที่ต้นของเฟส A ที่โพลที่ 1 ต่อปลายของเฟส A ที่โพลที่ 1 เข้ากับปลายของเฟส A ที่โพลที่ 2 (ทิศทางของกระแสจะไหลสวนทางกัน) ต่อต้นของเฟส A ที่โพลที่ 2 เข้ากับต้นของเฟส A ที่โพลที่ 3 และต่อปลายของเฟส A ที่โพลที่ 3 เข้ากับปลายของเฟส A ที่โพลที่ 4 ในที่สุดจะเหลือต้นกับปลายของเฟส A เพียง 2 เส้นดังรูปที่ 4.3

การต่อขดลวดเฟส B และเฟส C ก็กระทำในลักษณะเดียวกันคือ ที่เฟส B เริ่มต้นที่เฟส B ของโพลที่ 1 ไปเรื่อยจนถึงโพลที่ 4 จะเหลือปลายสาย 2 เส้นเช่นเดียวกับเฟส A ดังรูปที่ 4.4 และการต่อเฟส C ก็เริ่มจากขดลวดเฟส C ของโพลที่ 1 ไปเรื่อยจนถึงโพลที่ 4 จะเหลือปลายสาย 2 เส้น ดังรูปmuj 4.5

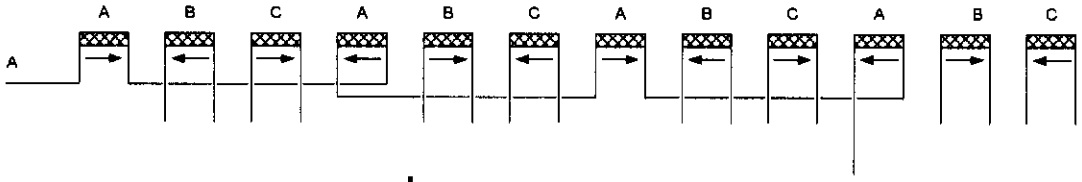
การต่อขดลวดมอเตอร์สามเฟส ใช้งานมี 2 แบบด้วยกัน คือ ต่อแบบสตาร์หรือวาย(Y) และ แบบเดลต้า (Δ) เพื่อจะต่อขดลวดให้เป็นแบบสตาร์นั้นให้เอาปลายของขดลวดทั้ง 3 เฟสมาต่อเข้าด้วยกัน จุดต่อนี้เรียกว่า star point

สำหรับการต่อขดลวดมอเตอร์สามเฟสแบบเดลต้านั้นกระทำได้ดังนี้คือ จากการต่อขดลวดในรูปที่ 4.5 ให้เอาปลายสายของเฟส A ที่โพลที่ 4 ต่อเข้ากับต้นของเฟส C ที่โพลที่ 1 จะได้ขดลวดแบบเดลต้า การต่อขดลวดมอเตอร์แบบสตาร์ก็เพื่อใช้กับแรงดันสูง เช่นแรงดัน 380 โวลต์ เป็นต้น และการต่อขดลวดมอเตอร์แบบเดลต้าก็เพื่อใช้กับแรงดันต่ำเช่น 220 โวลต์

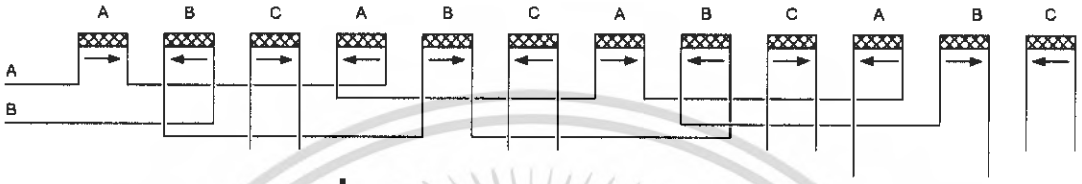
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



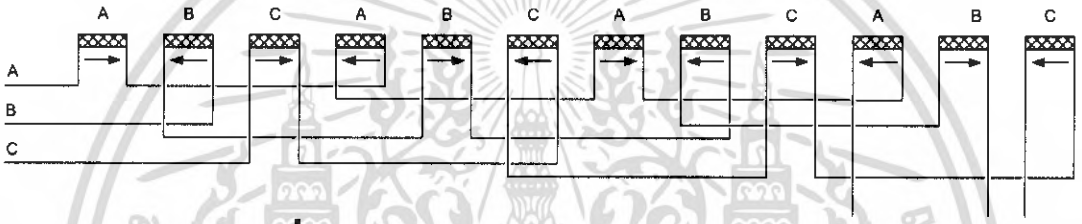
รูปที่ 4.2 แท่งสี่เหลี่ยมแทนขดลวดแต่ละเฟส



รูปที่ 4.3 แสดงการขดลวดเฟส A



รูปที่ 4.4 แสดงการขดลวดเฟส A และเฟส B

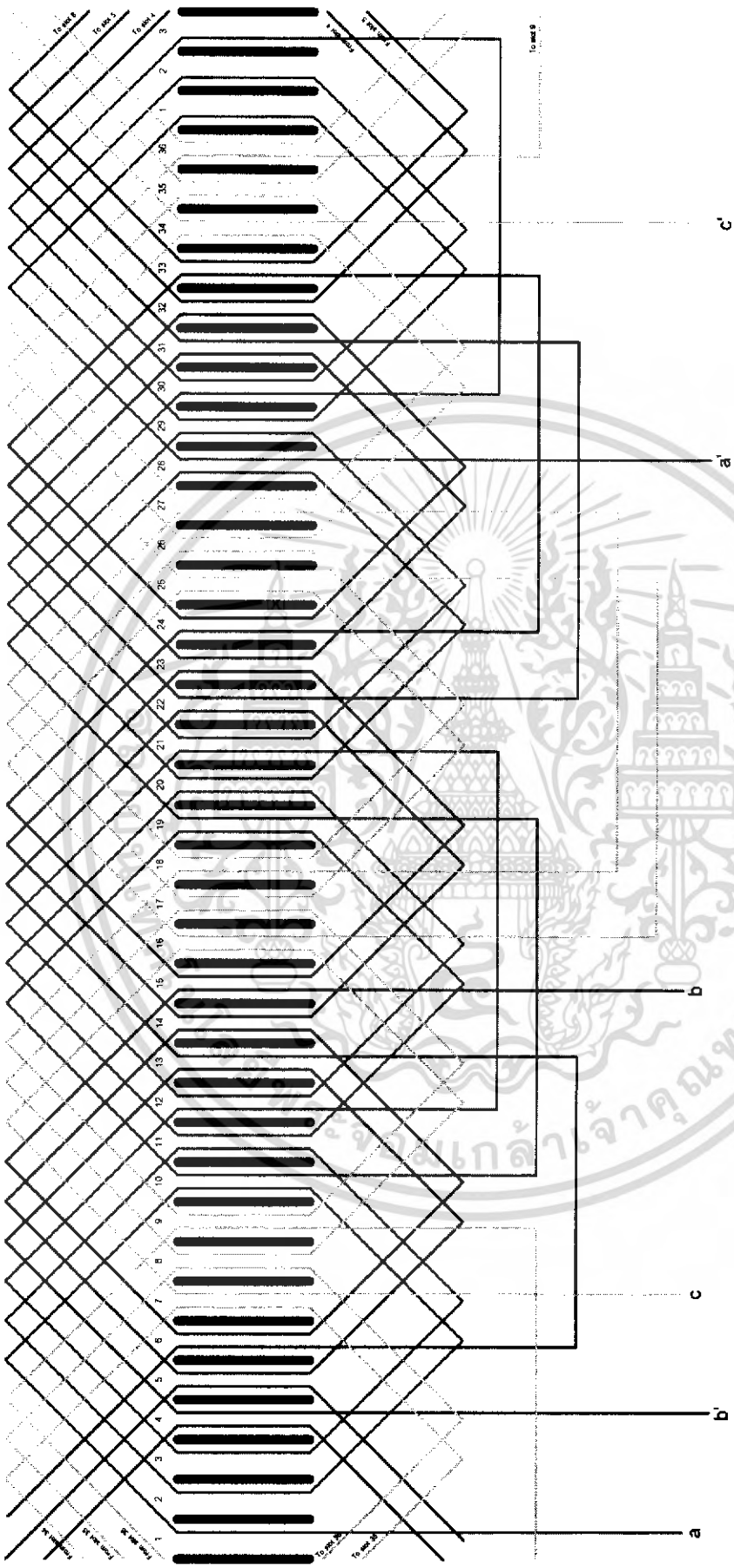


รูปที่ 4.5 แสดงการขดลวดเฟส A เฟส B และเฟส C

ในการต่อสายมอเตอร์สามเฟสเพื่อให้มอเตอร์หมุนกลับทางนั้นกระทำได้ง่ายๆดังนี้ คือ ถ้าแต่เดิมต่อปลายสายของขดลวดทั้ง 3 เฟส เข้ากับแรงดันไฟฟ้า มอเตอร์จะหมุนไปในทิศทางหนึ่ง เพื่อที่จะกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ให้สลับปลายสายของเฟส A กับเฟส B หรือ เฟส B กับเฟส C หรือเฟส A กับเฟส C เพียงคู่ใดคู่เดียว มอเตอร์ก็จะหมุนกลับทาง

จากการทดลองได้ออกแบบการพันขดลวดซึ่งแสดงดังรูปที่4.6 โดยมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวที่ใช้ในการทดลอง จะใช้ขดลวดดังแสดงในตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงรูปการพันขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลการพันของสเตเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

สเตเตอร์ตัวที่	จำนวนรอบต่อเฟส	เบอร์ขดลวด(SWG.No.)
1	240	18
2	360	19
3	384	20

4.4 ออกแบบขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการทดสอบสนามแม่เหล็กหมุนจากมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิดวาล์วโรเดอร์
2. ทำการทดสอบหาจุดอิ่มตัวของแกนเหล็ก
3. ทำการทดสอบหาการกระจายตัวของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก
4. ทำการทดสอบหาการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก
5. ทำการทดสอบหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
6. ทำการทดสอบหาเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องที่เกิดขึ้น
7. ทำการทดสอบหากระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ
8. ทำการทดสอบหาแรงบิดที่เกิดขึ้น และวิเคราะห์การเกิดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
9. ทำการทดสอบเพื่อหาวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
10. ทำการวิเคราะห์วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
11. หาแรงบิดและกำลังทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการคำนวณจากวงจรสมมูล
12. ทำการออกแบบเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ
13. ทำการทดสอบเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำที่ได้ทำการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การทดลอง
ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 การทดสอบหาค่าความอิ่มตัวของแกนเหล็ก

5.1.1 วิธีทำการทดสอบ

1.เปิดวงจรทางด้านปฐมภูมิ

2.ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ขดลวดด้านปฐมภูมิ

3.ทำการวัดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นด้านทุติยภูมิ

4.จดบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าแรงดันทางด้านปฐมภูมิและบันทึกค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านทุติยภูมิ

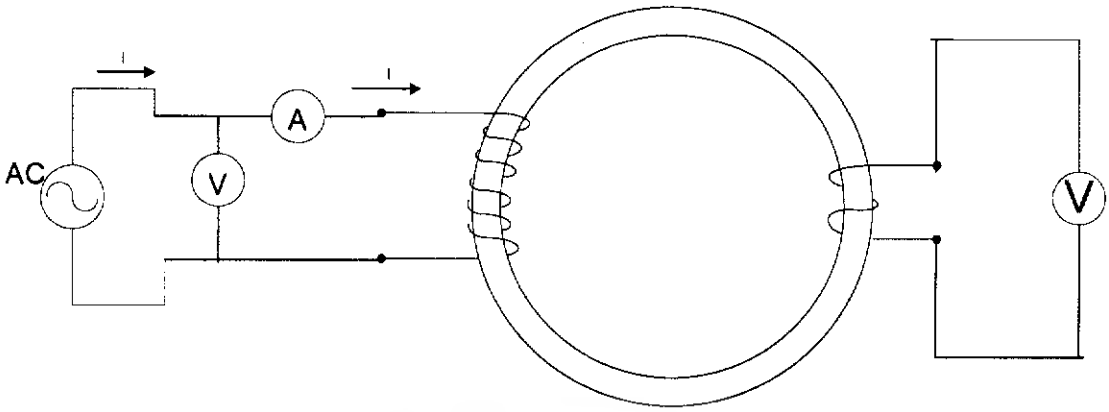
5.1.2 ผลการทดลอง

$N_{ปฐมภูมิ}$ =28 รอบ $N_{ทุติยภูมิ}$ =2 รอบ l =0.525 เมตร

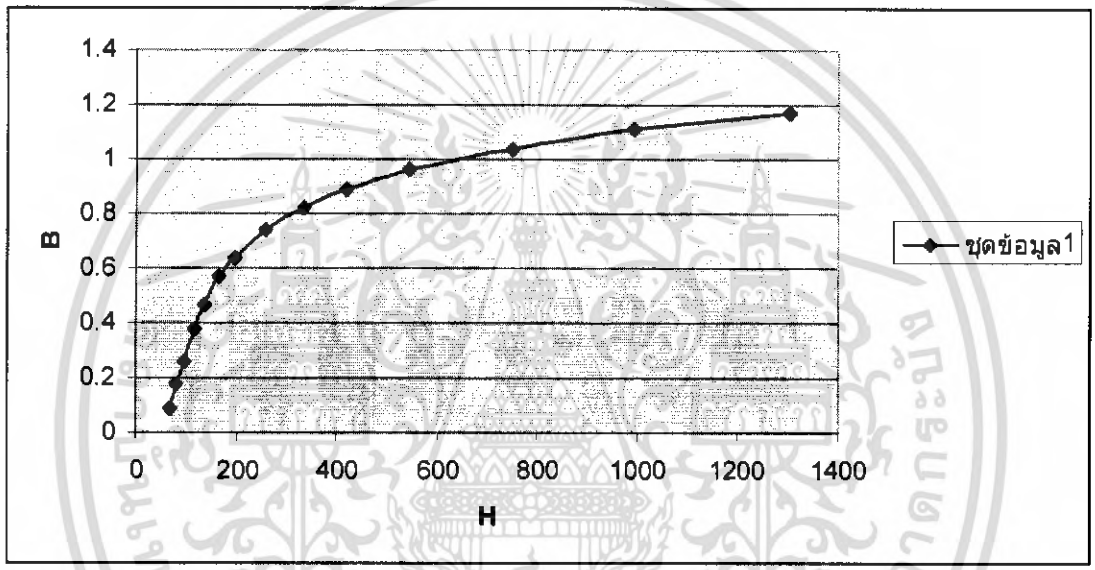
ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองเรื่องแกนเหล็กอิ่มตัว

B	$E_{out_{คำนวน}}$	$V_{in_{คำนวน}}$	$V_{in_{จริง}}$	H	I_{in}	$B_{ทดลอง}$	$E_{out_{ทดลอง}}$
0.1	0.066	0.925	0.928	67.73	1.27	0.09	0.057
0.2	0.132	1.85	1.88	82.13	1.54	0.18	0.122
0.3	0.198	2.775	2.61	96.53	1.81	0.26	0.170
0.4	0.264	3.7	3.77	116.79	2.19	0.38	0.251
0.5	0.33	4.625	4.65	138.66	2.60	0.47	0.313
0.6	0.396	5.55	5.6	165.56	3.11	0.57	0.373
0.7	0.462	6.475	6.35	196.25	3.68	0.64	0.421
0.8	0.528	7.4	7.46	259.18	4.86	0.74	0.490
0.9	0.594	8.325	8.37	333.31	6.25	0.82	0.544
1.0	0.660	9.25	9.16	418.64	7.85	0.89	0.589
1.1	0.726	10.175	10.11	544.5	10.21	0.96	0.636
1.2	0.792	11.1	11.17	750.25	14.07	1.04	0.689
1.3	0.858	12.025	12.08	991.9	18.6	1.11	0.724
1.4	0.924	12.95	12.92	1301.25	24.4	1.17	0.775

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 รูปแสดงวิธีทำการทดสอบหาค่าความอิ่มตัวของแกนเหล็ก



รูปที่ 5.2 กราฟผลการทดลองเรื่องแกนเหล็กอิ่มตัว

5.1.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้ามากขึ้นกระแสก็จะเพิ่มขึ้นด้วยในลักษณะเชิงเส้นในช่วงแรกและไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงท้ายของการทดลอง

5.1.4 สรุปผลการทดลอง

เมื่อทำการทดลองจะพบว่าค่าความอิ่มตัวของแกนเหล็กจะอิ่มตัวที่ความเข้มสนามแม่เหล็กประมาณ 1.2 Tesla

หากทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นมากและแม้จะเพิ่มกระแสมากขึ้นแต่ได้ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่น้อยซึ่งไม่คุ้มกับการเพิ่มกระแสไฟฟ้าและเป็นการเพิ่มความสูญเสียทางไฟฟ้าตามสมการ

$$P_{loss} = I^2 R \qquad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

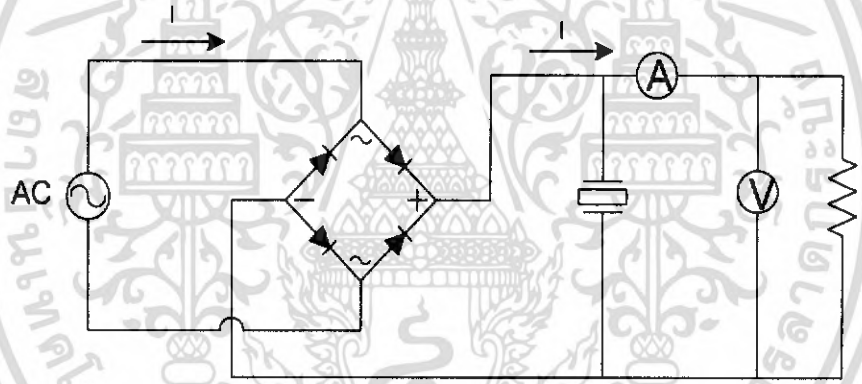
5.2 การทดลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

5.2.1 หาค่าความต้านทาน (R) ของขดลวดที่โรเตอร์และสเตเตอร์โดยวิธีโวลต์แอมแปร์ (V-I Method)

5.2.1.1 วิธีทำการทดสอบ

1. ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ขดลวดที่ต้องการทดสอบหาค่าความต้านทาน
2. จดบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า ณ ค่าแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ
3. นำค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามาคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้า และสามารถหาค่าความต้านทานไฟฟ้าได้จากความสัมพันธ์

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I} \tag{5.2}$$



รูปที่ 5.3 แสดงวงจรการทดสอบหาค่าความต้านทาน

5.2.1.2 ผลการทดลอง

- ส่วนสเตเตอร์

1. ความต้านทานสเตเตอร์ตัวที่1 (20 รอบ SWG 18)

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลอง V-I Method เพื่อหาความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ตัวที่ 1

Phase A		Phase B		Phase C	
V	I	V	I	V	I
5.1	3.6	5.2	3.6	5.0	3.5
10.4	7.2	10.4	7.2	10.2	7
15	10	15	10	15.0	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความต้านทานสเตเตอร์ตัวที่2 (30 รอบ SWG19)

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลอง V-I Method เพื่อหาความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ตัวที่ 2

Phase A		Phase B		Phase C	
V	I	V	I	V	I
5.2	1.1	5.3	1.1	5.3	1.1
10	2.2	10	2.2	10	2.2
14.8	3.3	15.3	3.4	15	3.3

3. ความต้านทานสเตเตอร์ตัวที่3 (40รอบ SWG 20)

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลอง V-I Method เพื่อหาความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ตัวที่ 3

Phase A		Phase B		Phase C	
V	I	V	I	V	I
5.3	1.3	5.3	1.3	5.3	1.3
11	2.1	10	2.0	11	2.1
15	3	15	3	15	3
20	3.9	20	3.9	20	3.9

ดังนั้นความต้านทานของสเตเตอร์ตัวที่ 1 แต่ละเฟสคือ

ข้อมูล	Phase A	Phase B	Phase C
ความต้านทาน(Ω)	1.5	1.5	1.5

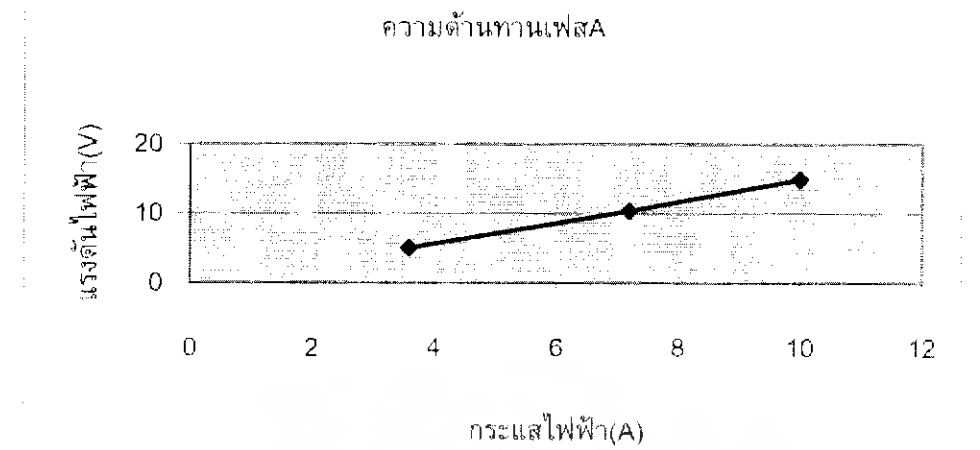
ความต้านทานของสเตเตอร์ตัวที่ 2 แต่ละเฟสคือ

ข้อมูล	Phase A	Phase B	Phase C
ความต้านทาน(Ω)	4.36	4.34	4.4

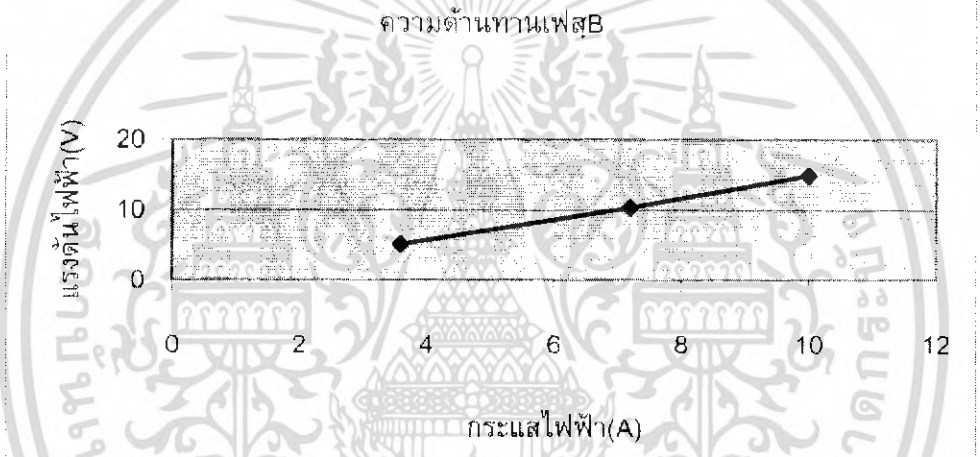
ความต้านทานของสเตเตอร์ตัวที่ 3 แต่ละเฟสคือ

ข้อมูล	Phase A	Phase B	Phase C
ความต้านทาน(Ω)	5.5	5.5	5.6

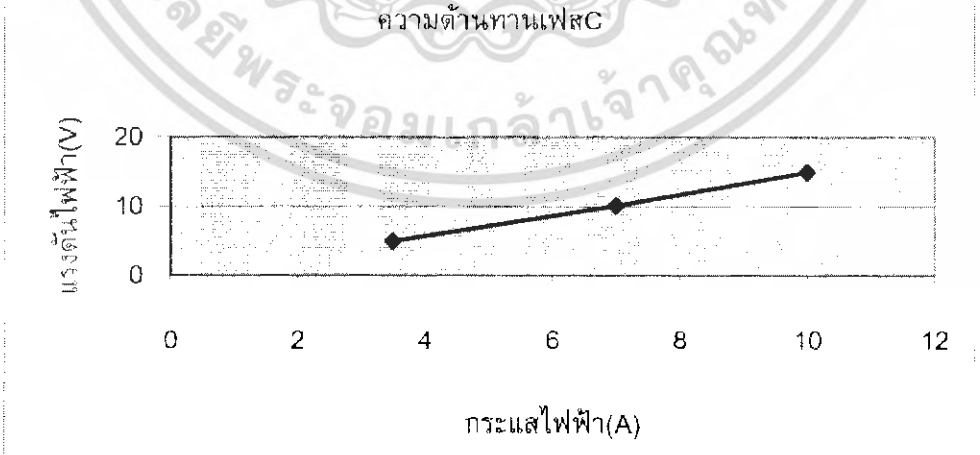
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(A)



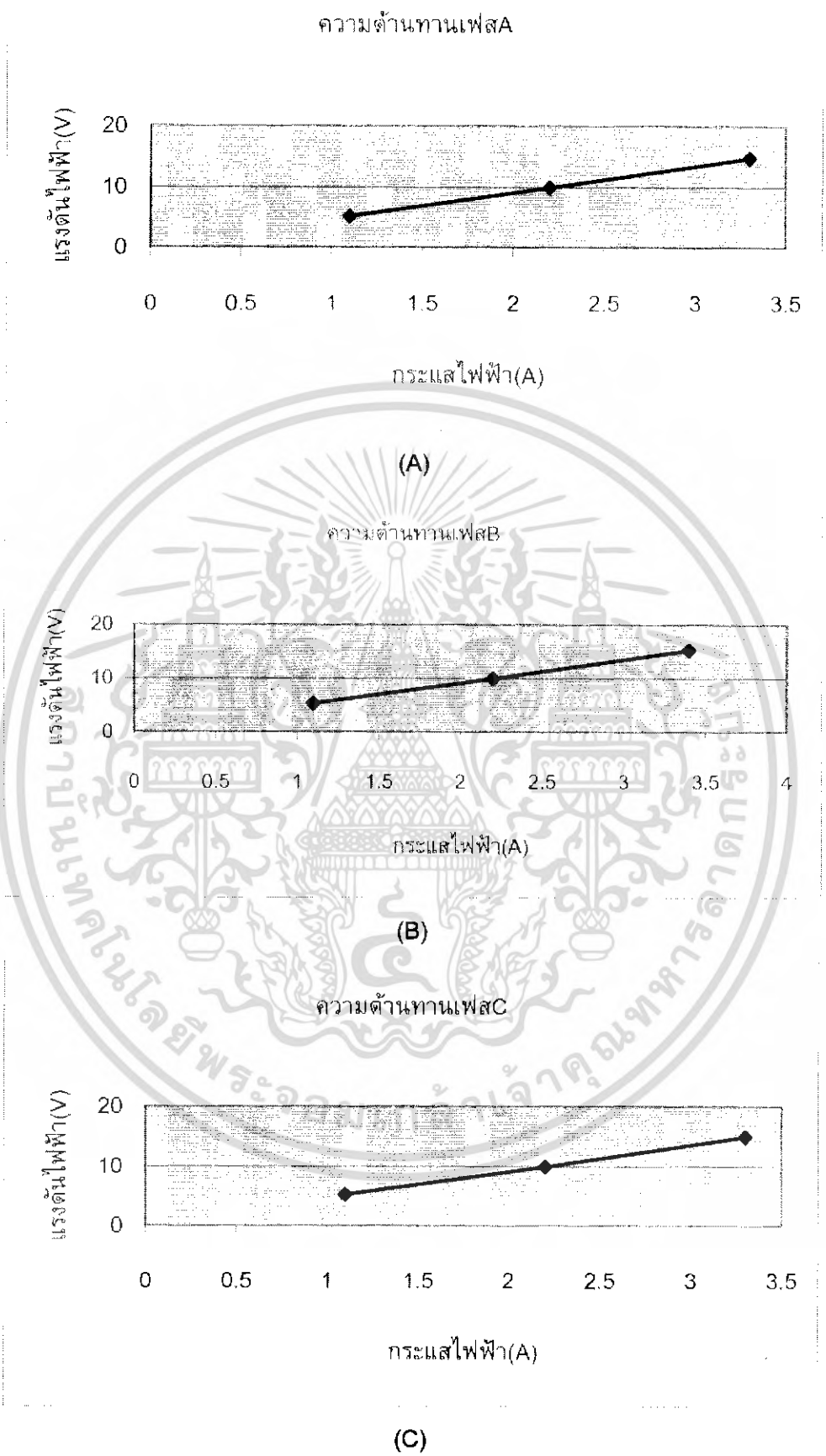
(B)



(C)

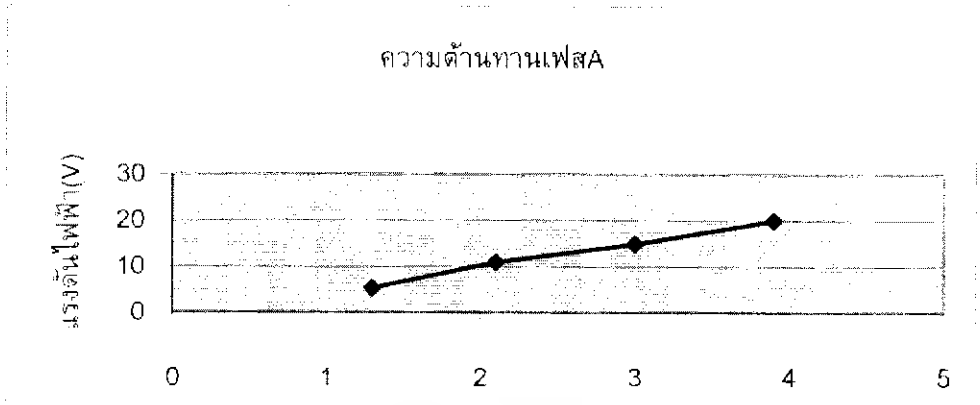
รูปที่ 5.4 กราฟการหาความต้านทานด้วย V-I Method ของขดลวดสเตเตอร์ตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

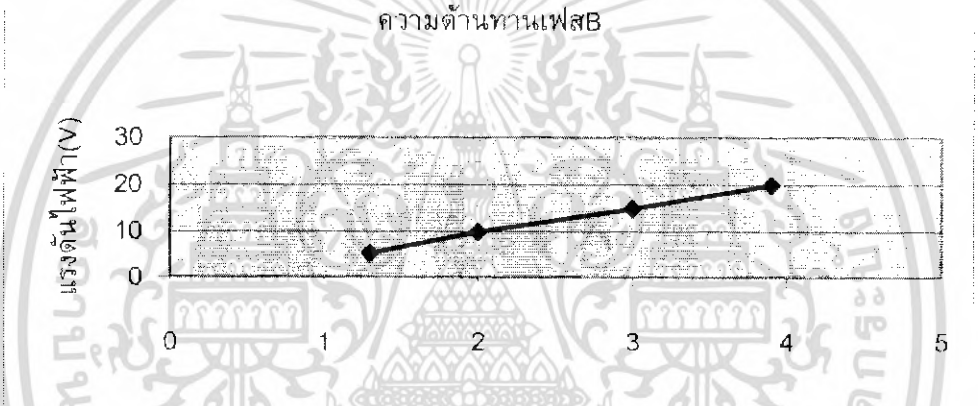


รูปที่ 5.5 กราฟการหาความต้านทานด้วย V-I Method ของขดลวดสเตเตอร์ตัวที่ 2

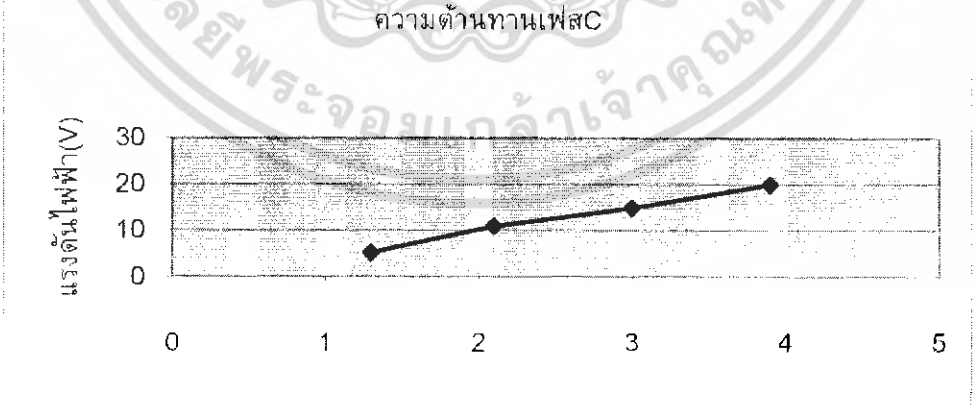
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(A)



(B)



(C)

รูปที่ 5.6 กราฟการหาความต้านทานด้วย V-I Method ของขดลวดสเตเตอร์ตัวที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ส่วนโรเตอร์

1. ความต้านทานโรเตอร์ตัวที่1 (20รอบ SWG18)

ตารางที่ 5.5 ผลการทดลอง V-I Method เพื่อหาความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ตัวที่ 1

Phase A		Phase B		Phase C	
V	I	V	I	V	I
5.27	1.2	5.3	1.2	5.3	1.2
10	2.3	10.1	2.3	10.2	2.3
16	3.6	15	3.4	15	3.4
21	4.65	20	4.4	20	4.4
25.3	5.5	25.3	5.5	25	5.45

2. ความต้านทานโรเตอร์ตัวที่2 (23 รอบ SWG 19)

ตารางที่ 5.6 ผลการทดลอง V-I Method เพื่อหาความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ตัวที่ 2

Phase A		Phase B		Phase C	
V	I	V	I	V	I
5.3	3.2	5.3	3.2	5.3	3.2
10	6.2	10.1	6.25	10	6.2
15.5	9	15	8.9	15	8.9
20	11.6	20	11.6	20	11.6

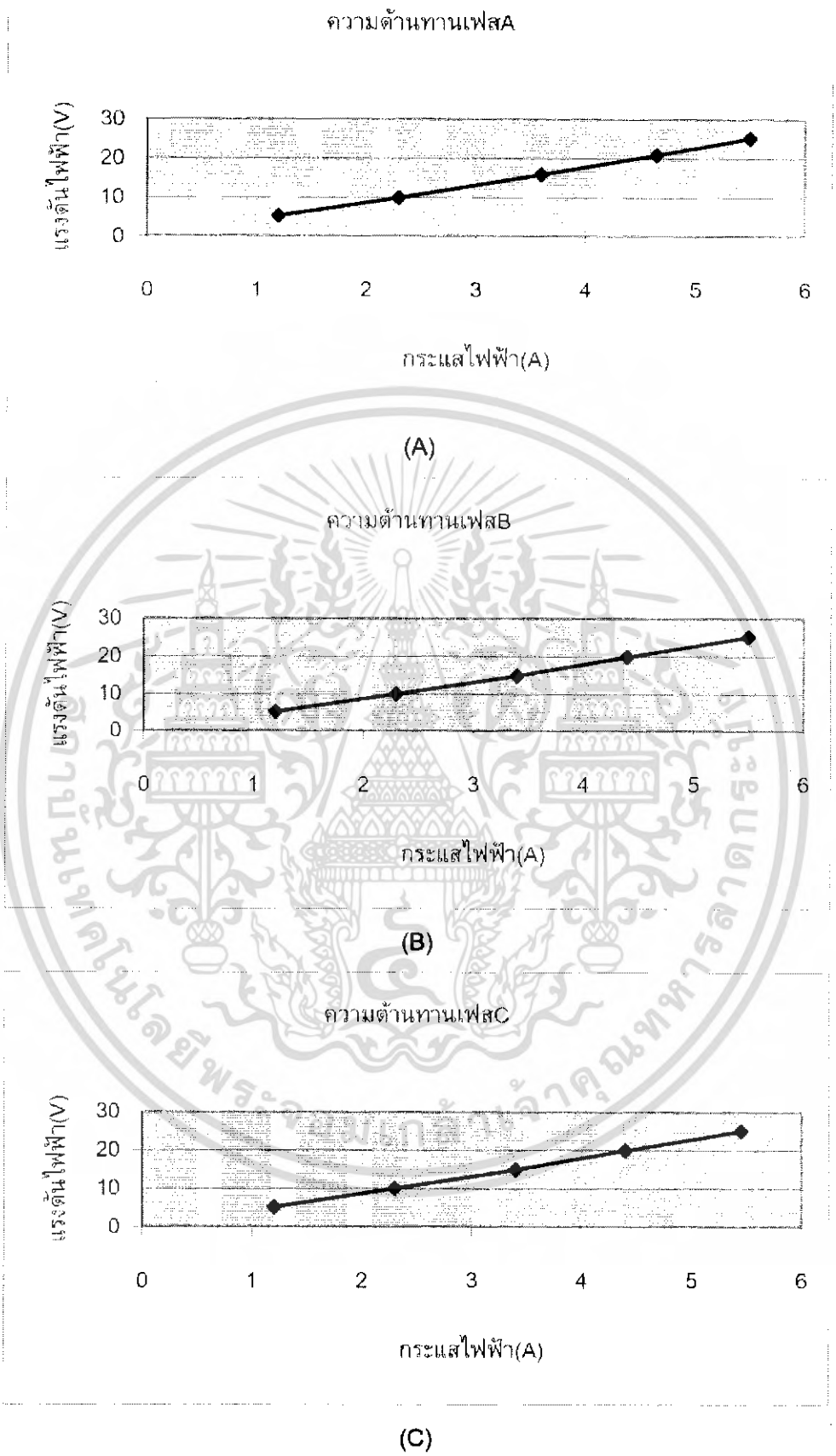
ดังนั้นความต้านทานของโรเตอร์ตัวที่ 1 แต่ละเฟสคือ

ข้อมูล	Phase A	Phase B	Phase C
ความต้านทาน(Ω)	4.68	4.71	4.66

ความต้านทานของโรเตอร์ตัวที่ 2 แต่ละเฟสคือ

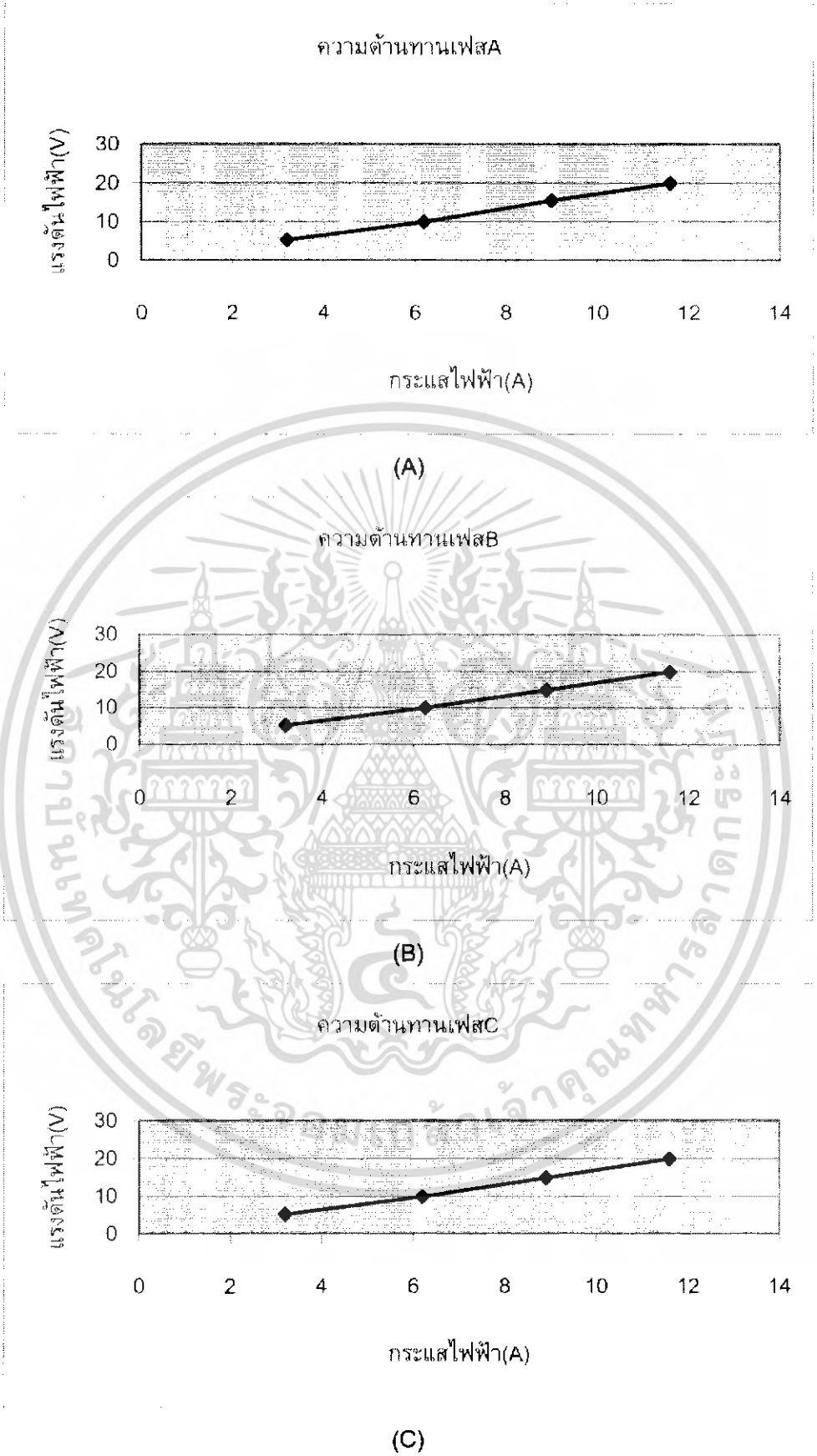
ข้อมูล	Phase A	Phase B	Phase C
ความต้านทาน(Ω)	1.85	1.85	1.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 กราฟการหาความต้านทานด้วย V-I Method ของขดลวดโรเตอร์ตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 กราฟการหาความต้านทานด้วย V-I Method ของขดลวดโรเตอร์ตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่เปลี่ยนแปลงกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

5.2.2.1 วิธีทำการทดลอง

1.การทดลองนี้ได้ใช้โครงสร้างของสเตเตอร์ตัวที่ 2 และใช้โครงสร้างของโรเตอร์ตัวที่ 2 เพื่อใช้ในการทดลอง

2.ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่พิกัดที่ต้องการทดสอบเข้าสู่ขดลวดเฟส A ที่พันอยู่บนสเตเตอร์

3.วัดค่าและจดบันทึกแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนขดลวดที่พันอยู่บนโรเตอร์เฟสA

4.เปลี่ยนมุมทางกลของโรเตอร์โดยการหมุนแกนของโรเตอร์เป็นมุม θ_m

5.จดบันทึกแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งต่างๆที่ทำการทดสอบ

สามารถหาความสัมพันธ์ได้จากสมการ

$$\hat{E}_s = \hat{V}_s - \hat{I}_s R_s \tag{5.3}$$

$$\hat{E}_r \approx \hat{V}_r \tag{5.4}$$

5.2.2.2 ผลการทดลอง

ตารางที่ 5.7 ผลการทดลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าทางด้าน สเตเตอร์

θ_m	V_s	I_s	$I_s R_s$	E_s	$E_{r_{ทำนาย}}$	$E_{r_{ทดลอง}}$	%error
0	50.5	0.53	2.597	47.903	0	0.05	0.1
10	50.6	0.54	2.646	47.954	16.40	12.433	8.275
20	50.6	0.54	2.646	47.954	30.824	26.485	9.04
30	50.28	0.53	2.597	47.683	41.294	37.029	8.94
40	50.3	0.53	2.597	47.730	46.978	42.85	8.71
50	50.6	0.52	2.548	48.052	47.321	43.34	8.28
60	50.7	0.52	2.548	48.152	41.700	37.248	9.24
70	50.7	0.53	2.597	48.103	30.920	27.073	7.99
80	50.7	0.54	2.646	48.054	16.435	12.410	8.37
90	50.1	0.52	2.548	47.552	0	0.1	0.21
100	50.5	0.54	2.646	47.854	16.367	12.240	8.29
110	50.5	0.52	2.548	47.952	30.822	26.458	9.10
120	50.6	0.52	2.548	48.052	41.614	37.653	8.24
130	50.6	0.53	2.597	48.003	47.273	43.397	8.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

θ_m	V_s	I_s	I_sR_s	E_s	$E_{r_{ความจริง}}$	$E_{r_{ทฤษฎี}}$	%error
140	50.7	0.53	2.597	48.103	47.372	43.348	8.36
150	50.81	0.53	0.597	48.213	41.753	37.446	8.93
160	50.85	0.54	2.648	48.202	30.983	26.753	8.77
170	50.6	0.54	2.648	47.952	16.400	12.351	8.44
180	50.5	0.53	2.597	47.903	0	0.2	0.41
190	50.45	0.54	2.648	47.802	16.349	12.368	8.32
200	50.42	0.54	0.648	47.772	30.707	26.464	8.88
210	50.35	0.52	2.548	47.802	41.397	37.587	7.97
220	50.4	0.53	2.597	47.805	47.076	42.918	8.69
230	50.6	0.53	2.597	48.003	47.273	43.150	8.58
240	50.75	0.53	2.597	48.153	41.701	37.907	7.87
250	50.82	0.54	2.648	48.172	30.964	26.726	8.79
260	50.75	0.54	2.648	48.102	16.451	12.537	8.14
270	50.29	0.53	2.597	47.697	0	0.09	0.18
280	50.34	0.52	2.548	47.792	16.345	12.411	8.23
290	50.59	0.54	2.648	47.942	30.186	26.547	8.90
300	50.53	0.53	2.597	47.933	41.511	37.663	8.03
310	50.50	0.53	2.597	47.903	47.175	43.319	8.05
320	50.5	0.53	2.597	47.903	47.175	43.237	8.22
330	50.58	0.53	2.597	47.983	41.554	37.842	7.43
340	50.59	0.54	2.648	47.942	30.816	26.330	9.35
350	50.68	0.54	2.648	48.032	16.427	12.627	7.91
360	50.72	0.53	2.597	48.123	0	0.1	0.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 ผลการทดลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าทางด้าน โรเตอร์

θ_m	V_r	I_r	I_rR_r	E_r	$E_{s_{คำนวณ}}$	$E_{s_{ทดลอง}}$	%error
0	50.7	0.52	2.36	48.34	0	0.06	0.12
10	50.6	0.52	2.36	48.24	16.499	12.56	8.16
20	50.6	0.52	2.36	48.24	31.021	27.093	8.14
30	50.7	0.52	2.36	48.34	41.86	37.634	8.74
40	50.83	0.52	2.36	48.47	47.73	43.711	8.29
50	50.8	0.52	2.36	48.44	47.70	43.933	7.78
60	50.8	0.52	2.36	48.44	41.95	38.090	7.96
70	50.8	0.52	2.36	48.44	31.136	27.253	8.02
80	50.91	0.52	2.36	48.55	16.605	12.789	7.86
90	50.93	0.52	2.36	48.57	0	0.4	0.8
100	50.51	0.51	2.31	48.20	16.485	12.433	8.40
110	50.63	0.51	2.31	48.32	31.059	27.234	7.91
120	50.68	0.51	2.31	48.37	41.889	37.970	8.10
130	50.70	0.51	2.31	48.39	47.654	43.938	7.67
140	50.85	0.51	2.31	48.44	47.704	44.074	7.49
150	50.38	0.51	2.31	48.07	41.629	38.013	7.52
160	50.23	0.50	2.27	47.96	30.828	27.058	7.86
170	50.28	0.51	2.31	47.97	16.407	12.773	7.58
180	50.36	0.51	2.31	48.05	0	0.05	0.1
190	50.44	0.51	2.31	48.13	16.461	12.734	7.74
200	50.41	0.51	2.31	48.10	30.918	26.978	8.19
210	50.45	0.51	2.31	48.14	41.690	37.843	7.99
220	50.26	0.51	2.31	47.95	47.221	44.127	6.45
230	50.51	0.51	2.31	48.20	47.467	43.963	7.27
240	50.26	0.51	2.31	47.95	41.525	37.990	7.37
250	50.31	0.1	2.31	48.00	30.853	27.079	7.86
260	50.53	0.51	2.31	48.22	16.492	12.719	7.82
270	50.6	0.51	2.31	48.29	0	0.079	0.16
280	50.62	0.51	2.31	48.31	16.523	13.038	7.21
290	50.72	0.51	2.31	48.41	31.117	26.935	8.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

θ_m	V_r	I_r	I_rR_r	E_r	$E_{s_{คำนวณ}}$	$E_{s_{ทดลอง}}$	%error
300	50.85	0.51	2.31	48.54	42.036	37.955	8.41
310	50.58	0.51	2.31	48.27	47.536	44.450	6.39
320	50.80	0.51	2.31	48.49	47.753	44.468	6.77
330	50.51	0.51	2.31	48.20	41.742	37.313	9.18
340	50.62	0.51	2.31	48.31	31.053	26.689	9.03
350	50.71	0.52	2.36	48.35	16.536	13.037	7.24
360	50.79	0.52	2.36	48.43	0	0.3	0.06

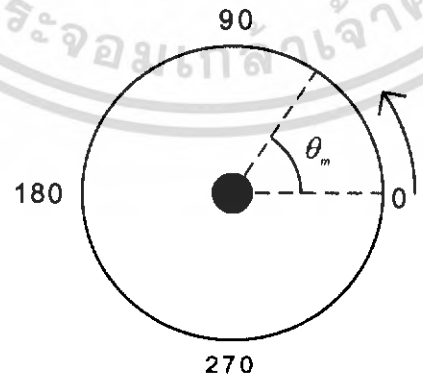
5.2.2.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองจะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนมุมทางกลเป็นมุมใดๆ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีการเปลี่ยนค่าซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ขดลวดที่โรเตอร์อยู่ ณ เวลานั้นๆซึ่งเมื่อนำค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆมาเขียนกราฟเพื่อดูแนวโน้มจะพบว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงคล้ายรูปคลื่นไซน์

เมื่อหมุนแกนโรเตอร์ไปตำแหน่งต่างๆค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์จะไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์

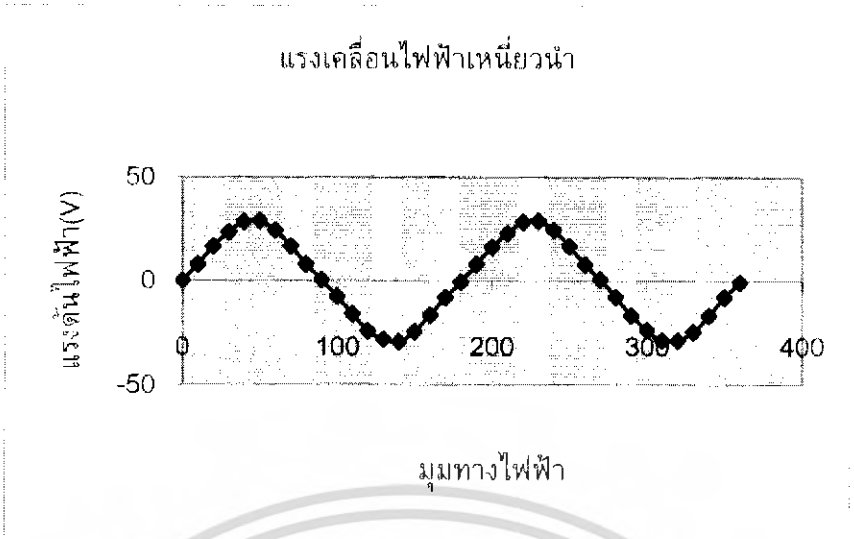
$$\frac{E_s}{E_r} = \frac{N_s}{N_r \sin\theta_e} \tag{5.5}$$

และค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์จะมีค่าน้อยกว่าค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สเตเตอร์



รูปที่ 5.9 แสดงวิธีการทดสอบหาแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลอง

5.2.2.4 สรุปผลการทดลอง

การที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีลักษณะเหนี่ยวนำเป็นรูปคลื่นไซน์ เนื่องมาจากการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กเป็นรูปคลื่นไซน์จึงทำให้การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นรูปคลื่นไซน์

เมื่อหมุนแกนโรเตอร์แล้วแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์

$$\frac{E_s}{E_r} = \frac{N_s}{N_r \sin\theta_e} \qquad (5.6)$$

เนื่องมาจากเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทั้งหมดไม่ได้ข้ามผ่านช่องว่างอากาศไปตัดขดลวดที่อยู่บนโรเตอร์ทั้งหมดทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นไม่เป็นไปตามทฤษฎี

เส้นแรงแม่เหล็กที่เดินทางไปเกี่ยวคล้องขดลวดเรียกว่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง เส้นแรงแม่เหล็กที่ไม่ได้เดินทางไปเกี่ยวคล้องขดลวดที่อยู่บนโรเตอร์เรียกว่า **เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage Flux) ซึ่งค่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลขึ้นอยู่กับค่ารีลักแตนซ์ (Reluctance) ของวงจรแม่เหล็ก**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การทดลองเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (Flux Linkage)

5.3.1 การทดลองเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (ป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ด้านสเตเตอร์)

5.3.1.1 วิธีทำการทดลอง

1. การทดลองนี้ได้ใช้โครงสร้างของสเตเตอร์ตัวที่ 2 และใช้โครงสร้างของโรเตอร์ตัวที่ 2 เพื่อใช้ในการทดลอง
2. ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่พิกัดที่ต้องการทดสอบเข้าสู่ขดลวดเฟส A ที่พันอยู่บนสเตเตอร์
3. วัดค่าและจดบันทึกแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนขดลวดที่พันอยู่บนโรเตอร์เฟส A
4. เปลี่ยนมุมทางกลของโรเตอร์โดยการหมุนแกนของโรเตอร์เป็นมุม θ_m
5. จดบันทึกแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งต่างๆที่ทำการทดสอบ
6. นำค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาคำนวณหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องดังสมการ

$$\lambda_s = \frac{E_s}{4.44f}, \quad \lambda_r = \frac{E_r}{4.44f \sin\theta_e} \tag{5.7}$$

7. คำนวนเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลดังสมการ

$$\lambda_{leakage} = \lambda_s - \lambda_r \tag{5.8}$$

5.3.1.2 ผลการทดลอง

ตารางที่ 5.9 ผลการทดลองเรื่องเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (Flux Linkage) โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าทางด้านสเตเตอร์

θ_m	E_s	$E_{r_{คำนวณ}}$	$E_{r_{ทดลอง}}$	λ_s	$\lambda_{r_{คำนวณ}}$	$\lambda_{r_{ทดลอง}}$	%error
0	47.903	0	0.05	0.2157	0	0.0002	0.090
10	47.954	16.40	12.433	0.2160	0.07387	0.05600	8.27
20	47.954	30.824	26.485	0.2160	0.13793	0.11930	9.08
30	47.683	41.294	37.029	0.2148	0.18601	0.16680	8.94
40	47.703	46.978	42.85	0.2149	0.21161	0.19302	8.66
50	48.052	47.321	43.34	0.2164	0.21316	0.19523	8.28
60	48.152	41.7	37.248	0.2169	0.18784	0.16778	9.24
70	48.103	30.900	27.073	0.2168	0.13928	0.12195	7.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

θ_m	E_s	$E_{r_{ความเข้ม}}$	$E_{r_{เฉลี่ย}}$	λ_s	$\lambda_{r_{ความเข้ม}}$	$\lambda_{r_{เฉลี่ย}}$	%error
80	48.054	163435	12.41	0.2165	0.07403	0.05590	8.37
90	47.552	0	0.1	0.2142	0	0.00045	-0.21
100	47.854	16.367	12.24	0.2155	0.07373	0.05514	8.62
110	47.952	30.822	26.458	0.2160	0.13884	0.11918	9.10
120	48.052	41.614	37.653	0.2164	0.18745	0.16961	8.24
130	48.003	47.273	43.397	0.2162	0.21294	0.19548	8.07
140	48.103	47.372	43.348	0.2167	0.21339	0.19526	8.36
150	48.213	41.753	37.446	0.2172	0.18808	0.16868	8.93
160	48.202	30.983	26.753	0.2171	0.13956	0.12051	8.77
170	47.952	16.4	12.341	0.2160	0.07387	0.05564	8.43
180	47.903	0	0.2	0.2158	0	0.00090	-0.41
190	47.802	16.349	12.368	0.2153	0.0736	0.0571	8.30
200	47.772	30.707	26.464	0.2152	0.13832	0.11921	8.8
210	47.802	41.397	37.587	0.2153	0.18647	0.16931	7.97
220	47.803	47.076	42.917	0.2153	0.21205	0.19332	8.69
230	48.003	47.273	43.150	0.2162	0.2194	0.19437	8.58
240	48.153	41.701	37.907	0.2169	0.18784	0.17075	7.87
250	48.172	30.964	26.726	0.2169	0.13948	0.12039	8.80
260	48.102	16.451	12.537	0.2167	0.07410	0.05647	8.13
270	47.697	0	0.09	0.2148	0	0	0.18
280	47.792	16.345	121.411	0.2153	0.07363	0.00040	8.23
290	47.942	30.816	26.547	0.2159	0.13881	0.05591	8.90
300	47.933	41.511	37.663	0.2159	0.18699	0.11958	8.03
310	47.903	47.175	43.319	0.2158	0.21250	0.16965	8.05
320	47.903	47.175	43.237	0.2158	0.21250	0.19513	8.22
330	47.983	41.554	37.843	0.2161	0.18718	0.17046	7.73
340	47.942	30.816	26.330	0.2159	0.13881	0.11850	9.36
350	48.032	16.427	12.627	0.2164	0.07399	0.05688	7.90
360	48.123	0	0.1	0.2168	0	0.00045	0.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 การทดลองเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (ป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ด้านโรเตอร์)

5.3.2.1 วิธีทำการทดลอง

1. การทดลองนี้ได้ใช้โครงสร้างของสเตเตอร์ตัวที่ 2 และใช้โครงสร้างของโรเตอร์ตัวที่ 2 เพื่อใช้ในการทดลอง
2. ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่พิกัดที่ต้องการทดสอบเข้าสู่ขดลวดเฟส A ที่พันอยู่บนโรเตอร์
3. วัดค่าและจดบันทึกแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนขดลวดที่พันอยู่บนสเตเตอร์เฟส A
4. เปลี่ยนมุมทางกลของโรเตอร์โดยการหมุนแกนของโรเตอร์เป็นมุม θ_m
5. จดบันทึกแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งต่างๆที่ทำการทดสอบ
6. นำค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาคำนวณหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องดังสมการ

$$\lambda_s = \frac{E_s}{4.44 f \sin\theta_e}, \quad \lambda_r = \frac{E_r}{4.44 f} \tag{5.9}$$

7. คำนวณเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลดังสมการ

$$\lambda_{leakage} = \lambda_r - \lambda_s \tag{5.10}$$

5.3.2.2 ผลการทดลอง

ตารางที่ 5.10 ผลการทดลองเรื่องเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (Flux Linkage) โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าทางด้านโรเตอร์

θ_m	E_r	$E_{s_{คำนวณ}}$	$E_{s_{ทดลอง}}$	λ_r	$\lambda_{s_{คำนวณ}}$	$\lambda_{s_{ทดลอง}}$	%error
0	48.34	0	0.06	0.2177	0	0.00027	-0.12
10	48.24	16.499	12.56	0.2173	0.07432	0.05658	8.16
20	48.24	31.023	27.093	0.2173	0.13973	0.12204	8.14
30	48.34	41.86	37.634	0.2177	0.18856	0.16952	8.74
40	48.47	47.73	43.711	0.2183	0.21500	0.19689	8.29
50	48.44	47.70	43.933	0.2182	0.21486	0.19790	7.77
60	48.44	41.95	38.090	0.2182	0.18896	0.17158	7.96
70	48.44	31.136	27.253	0.2182	0.14025	0.12276	8.02
80	48.55	16.605	12.789	0.2187	0.07480	0.05761	7.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

θ_m	E_r	$E_{s_{\text{ทางทฤษฎี}}}$	$E_{s_{\text{ทดลอง}}}$	λ_r	$\lambda_{s_{\text{ทางทฤษฎี}}}$	$\lambda_{s_{\text{ทดลอง}}}$	%error
90	48.57	0	0.4	0.2188	0	0.00180	-0.82
100	48.20	16.485	12.433	0.2171	0.07426	0.05600	8.41
110	48.32	31.059	27.234	0.2177	0.13991	0.12268	7.91
120	48.37	41.889	37.970	0.2179	0.18869	0.17104	8.10
130	48.39	47.654	43.938	0.2180	0.21466	0.19792	7.67
140	48.44	47.704	44.074	0.2182	0.21488	0.19853	7.49
150	48.07	41.629	38.013	0.2165	0.18752	0.17122	7.53
160	47.96	30.828	27.058	0.2160	0.13886	0.12188	7.86
170	47.97	16.407	12.773	0.2161	0.07391	0.05754	7.58
180	48.05	0	0.05	0.2164	0	0.00022	-0.1
190	48.13	16.461	12.734	0.2168	0.07415	0.05736	7.74
200	48.10	30.918	26.978	0.2167	0.13927	0.12152	8.19
210	48.14	41.690	37.843	0.2168	0.18779	0.17046	7.99
220	47.95	47.221	44.127	0.2160	0.21271	0.19877	6.45
230	48.20	47.467	43.963	0.2171	0.21382	0.19803	7.27
240	47.95	41.525	37.990	0.2160	0.18705	0.17113	7.37
250	48.00	30.853	27.079	0.2162	0.13898	0.12200	7.85
260	48.22	16.492	12.719	0.2172	0.07429	0.05729	7.83
270	48.29	0	0.079	0.2175	0	0.00036	-0.16
280	48.31	16.523	13.038	0.2176	0.07443	0.05873	7.21
290	48.41	31.117	26.935	0.2181	0.14017	0.12133	8.64
300	48.54	42.036	37.955	0.2186	0.18935	0.17096	8.41
310	48.27	47.536	44.450	0.2174	0.21413	0.20023	6.39
320	48.49	47.753	44.468	0.2184	0.21510	0.20031	6.77
330	48.20	41.742	37.313	0.2171	0.18803	0.16808	9.19
340	48.31	31.053	26.689	0.2176	0.13988	0.12022	9.03
350	48.35	16.536	13.037	0.2178	0.07449	0.05873	7.24
360	48.43	0	0.3	0.2182	0	0.00135	0.61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองแบบป้อนแรงดันเข้าสู่ขดลวดสเตเตอร์และแบบป้อนแรงดันเข้าสู่ขดลวดโรเตอร์เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งของโรเตอร์จะมีผลทำให้จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องเปลี่ยนแปลงและมีผลทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลง

5.3.2.4 สรุปผลการทดลอง

เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กยุบและขยายตัวเส้นแรงแม่เหล็กจะตัดกับขดลวดทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเมื่อทำการต่อครบวงจรจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหล

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดหากเส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านได้มากก็จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้มากและถ้าเส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านได้น้อยก็จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้น้อย

เมื่อทำการป้อนแรงดันจากสเตเตอร์ไปสู่โรเตอร์และป้อนจากโรเตอร์ไปสู่สเตเตอร์พบว่าจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลมีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นแสดงว่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลเป็นค่าคงตัวใดๆ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

5.4 การทดลองแรงบิด

5.4.1 วิธีทำการทดลอง

1. เปิดวงจรของขดลวดที่พันบนโรเตอร์และทำการลัดวงจรเพียง 1 เฟส
2. ป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขอลวดสเตเตอร์เฟสใดเพียงเฟสหนึ่งแล้วทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนขดลวดโรเตอร์ที่ได้ลัดวงจรไว้
3. หมุนโรเตอร์ที่ได้ลัดวงจรไว้แล้วโดยการดึงผ่านดาซั่งสปริงโดยใช้มู่เล่ช่วยผ่อนแรง(รัศมี=5.73 cm) บันทึกค่ากระแสขณะเริ่มหมุน มุมที่เริ่มหมุน และแรงที่ใช้ในการเริ่มหมุน

5.4.2 ผลการทดลอง

- การทดลองใช้สเตเตอร์ตัวที่2 และโรเตอร์ตัวที่2

ตารางที่ 5.11 ผลการทดลองเรื่องแรงบิด

ครั้งที่	θ_m	V_s	I_s	I_r	$F(kg)$	$T_{r,คำนวณ}$	$T_{r,ทดลอง}$	%error
1	45	49.02	3.52	3.24	2.4	1.5271	1.3480	11.73
2	45	71.7	5.17	4.7	5.0	3.2336	2.8077	13.17
3	45	86.1	6.17	5.83	7.4	4.81	4.1550	13.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

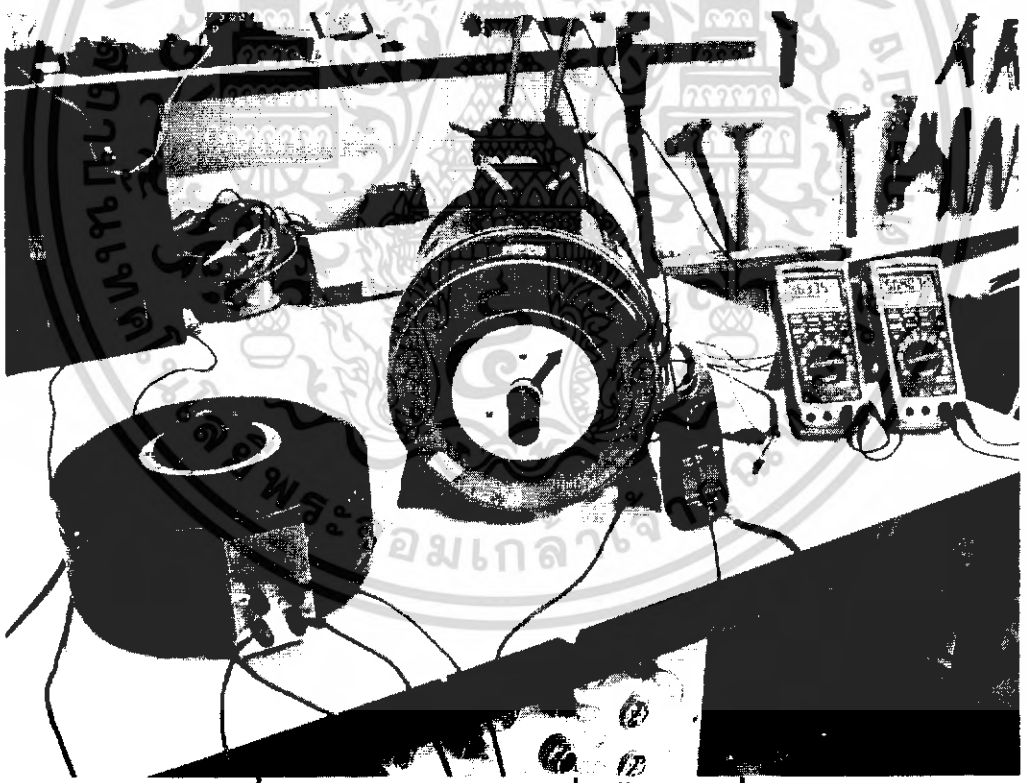
5.4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าค่าแรงบิดที่ทำการทดลองมีน้อยกว่าค่าแรงบิดที่คำนวณได้ มุมที่สภาวะพร้อมหมุนมีค่า 45 องศาทางกล

5.4.4 สรุปผลการทดลอง

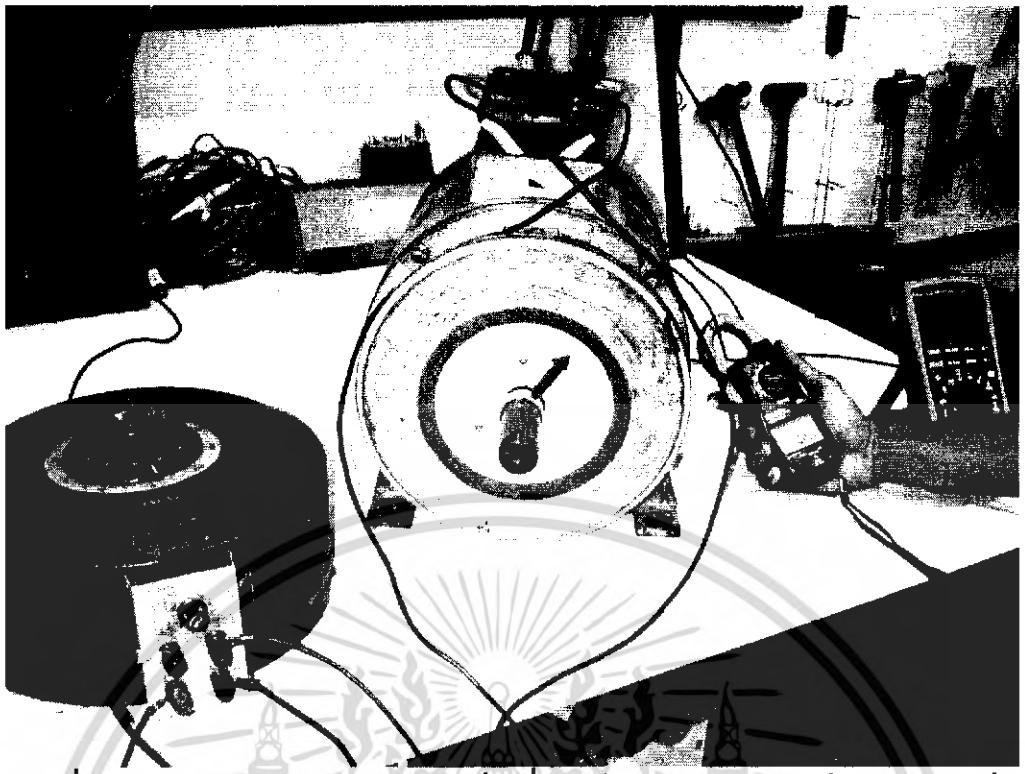
จากการทดลองการที่ค่าแรงบิดของการทดลองน้อยกว่าแรงบิดที่ได้จากการคำนวณเป็นผลเนื่องมาจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงบิดจากการทดลองมีค่าน้อยกว่าแรงบิดที่คำนวณประมาณ13%ซึ่งมีค่าใกล้เคียงจากความสัมพันธ์$\tau\alpha v^2$ เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณประมาณ7%และเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลก็มีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณประมาณ7%ดังนั้นจะพบว่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลที่ได้จากมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีผลกระทบต่อค่าแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วย

5.5 รูปภาพประกอบการทดลอง

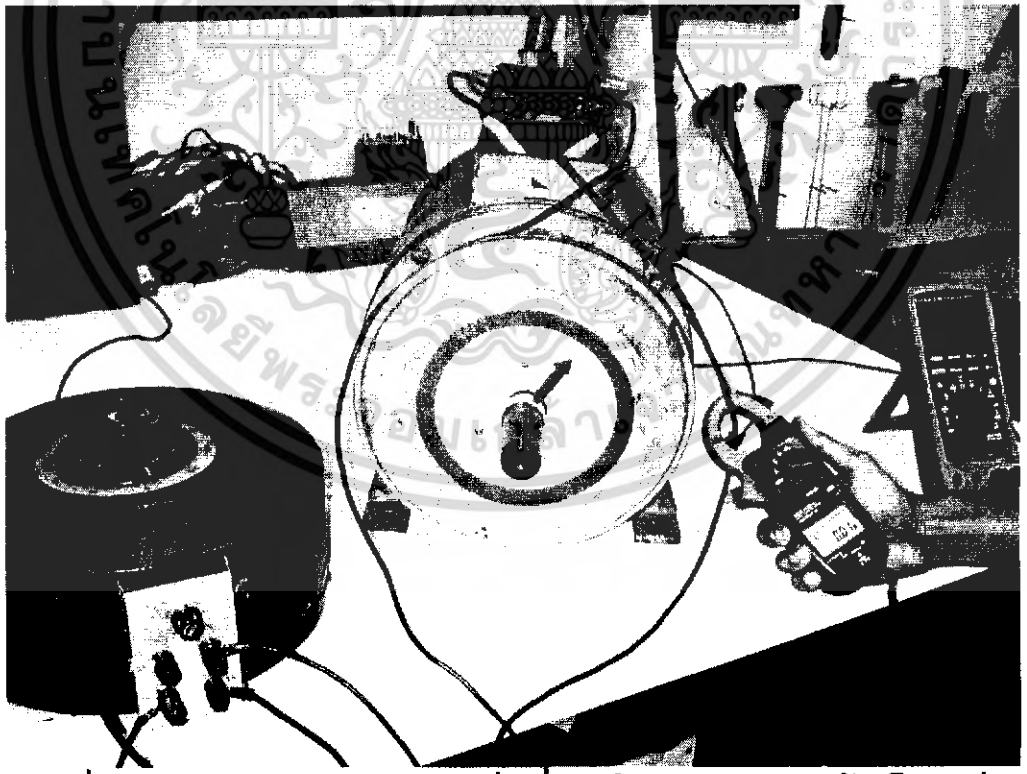


รูปที่ 5.11 การทดลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

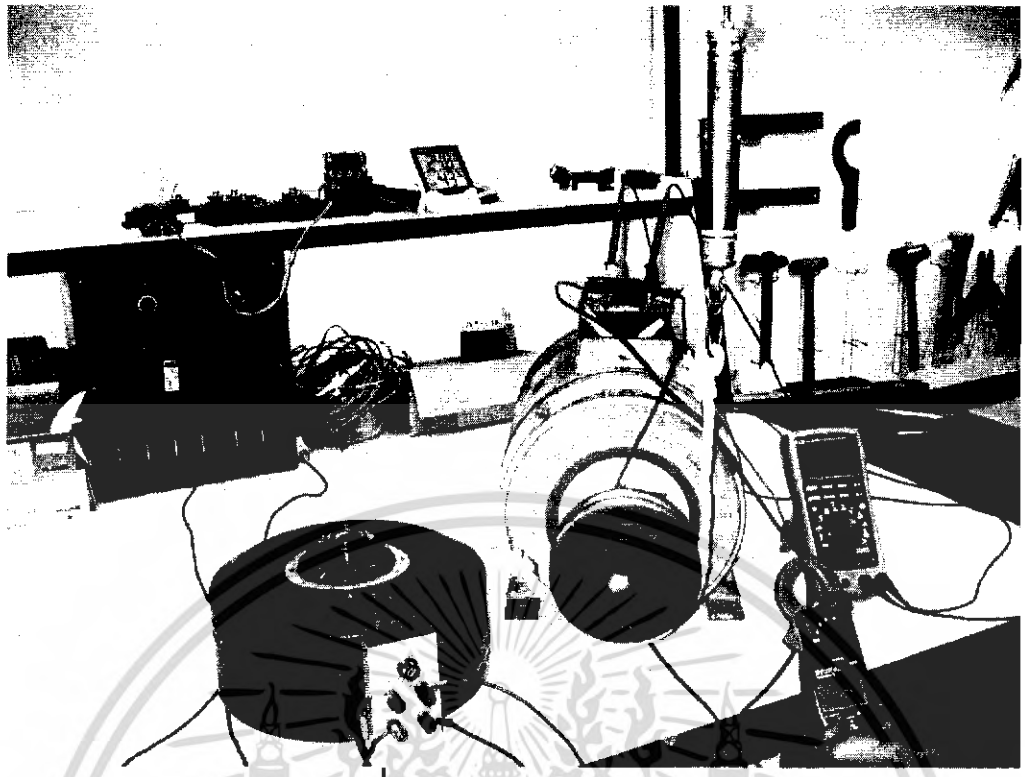


รูปที่ 5.12 การทดลองเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (ป้อนแรงดันด้านสเตเตอร์)



รูปที่ 5.13 การทดลองเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (ป้อนแรงดันด้านโรเตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 การทดลองแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
การหาวงจรสมมูลของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การหาวงจรสมมูลของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE โดยทำการทดสอบ 3 ส่วน คือการใช้วิธีโวลต์แอมป์, การทดสอบตรึงโรเตอร์ และการทดสอบขณะไม่มีภาระ

6.1 การทดสอบตรึงโรเตอร์(Block Rotor Test)

การทำการทดสอบโดยการตรึงโรเตอร์เพื่อหาค่า X_1 และ X_2 และเมื่อนำข้อมูลที่ได้รวมกับข้อมูลจากการทดสอบโดยวิธีโวลต์แอมป์ หาความต้านทานที่สเตเตอร์ จะสามารถหาความต้านทานที่โรเตอร์(R_2)ได้ การทดสอบจะเริ่มจากการยึดโรเตอร์ไว้ไม่ให้หมุน ดังนั้นขณะนี้ค่าของสลิป(s) จึงมีค่าเท่ากับหนึ่ง และทำการวัดค่ากระแส และแรงดันในสาย ตลอดจนกำลังงานทางไฟฟ้าที่ไหลเข้าทางด้านสเตเตอร์ เราจะใช้การต่อแบบสตาร์ ดังนั้นค่าที่ได้จึงเป็นค่าต่อเฟส ในการทดสอบจะปรับแรงดันอินพุทให้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนได้กระแสเท่ากับกระแสพิกัด จากนั้นจึงทำการบันทึกผลการทดสอบ

ขณะนี้กระแสกระตุ้นเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กจะถูกพิจารณาว่ามีค่าน้อยมาก ทั้งนี้เพราะแรงดันจะมีค่าต่ำมาก ดังนั้นวงจรสมมูลในการทดสอบตรึงโรเตอร์จะแสดงได้ดังรูป โดยในส่วนที่เป็นเส้นประจะไม่ถูกนำมาพิจารณา

จากนั้นเราสามารถหาค่าต่างๆต่อเฟสได้ดังนี้

$$R_1 + R_2 = R_{BR} \tag{6.1}$$

$$Z_{BR} = \frac{V_{BR}}{I_{BR}} \tag{6.2}$$

$$R_{BR} = \frac{P_{BR}}{I_{BR}^2} \tag{6.3}$$

เราทราบค่า R_1 จากการทดลองหาค่าความต้านทานด้านสเตเตอร์ เพราะฉะนั้นสามารถหาค่า $R_2^{'}$ ได้จาก

$$R_2 = R_{BR} - R_1 \tag{6.4}$$

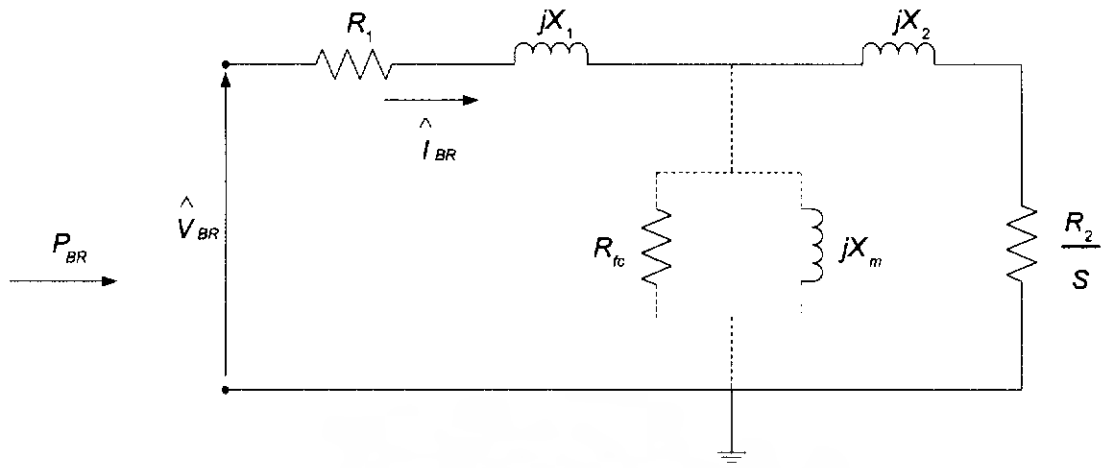
$$Z_{BR} = \sqrt{R_{BR}^2 + X_{BR}^2} \tag{6.5}$$

$$X_{BR} = \sqrt{Z_{BR}^2 - R_{BR}^2} \tag{6.6}$$

เมื่อ

$$X_{BR} = X_1 + X_2 \tag{6.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1 แสดงวงจรสมมูล 1 เฟสของการทดสอบดรึงโรเตอร์

ถ้าเราทราบ NEMA design letter ของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ก็จะสามารถแยกค่า X_1 และ X_2 โดยดูจากตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงค่าอัตราส่วนระหว่าง X_1 กับ X_2 ตามชนิดของเครื่องจักรไฟฟ้าแต่ละชนิด

Type of IMC	A,D	B	C	Wound Rotor
X_1	$0.5X_{BR}$	$0.4X_{BR}$	$0.3X_{BR}$	$0.5X_{BR}$
X_2	$0.5X_{BR}$	$0.6X_{BR}$	$0.7X_{BR}$	$0.5X_{BR}$

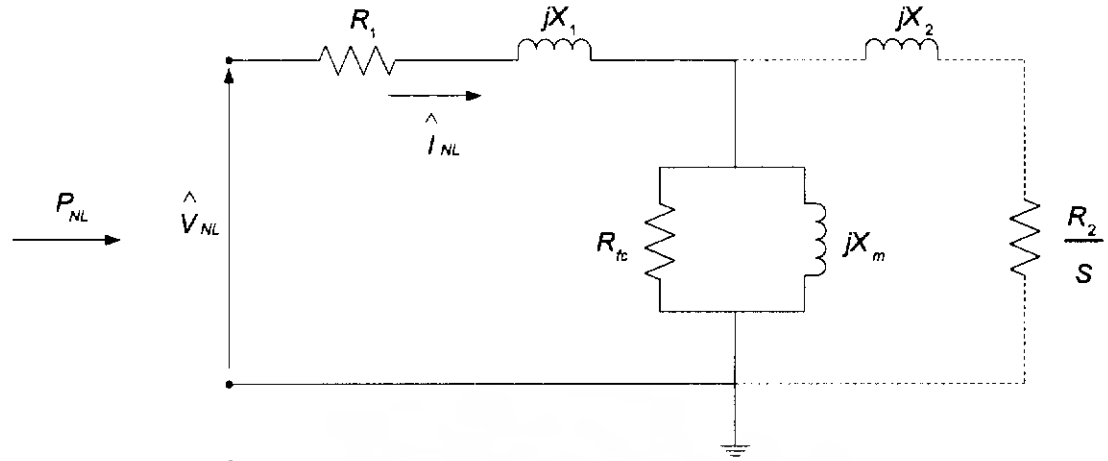
6.2 การทดสอบขณะไม่มีภาระ(No Load Test)

การทดสอบขณะไม่มีภาระเพื่อหาค่า X_m และค่าองค์ประกอบของแกนเหล็ก และค่าความสูญเสียทางกลอันเนื่องจากความฝืด และลมที่ใช้ในการระบายความร้อน ค่าความสูญเสียทุกอย่างในที่นี้จะต้องมีค่าคงที่ทุกสภาวะโหลด

ในส่วนการทดสอบจะทำการบันทึกค่าเช่นเดียวกับการทดสอบดรึงโรเตอร์ เพียงแต่ปล่อยให้เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำหมุนโดยอิสระที่พิกัดแรงดัน และพิกัดความถี่

ที่สภาวะไม่มีภาระนี้ ความเร็วของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส ค่าสลิปจึงมีค่าเกือบเป็นศูนย์ เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านในส่วนของ R'2/S มีค่าน้อยมาก ด้วยเหตุนี้ในส่วนของเส้นประจึงไม่นำมาพิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 6.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 แสดงวงจรสมมูล 1 เฟสของการทดสอบขณะไม่มีภาระ

จากรูปเราสามารถคำนวณหาค่าต่างๆได้ดังนี้

$$S_{NL} = V_{NL} I_{NL} \tag{6.8}$$

$$S_{NL} = \sqrt{P_{NL}^2 - Q_{NL}^2} \tag{6.9}$$

$$Q_{NL} = \sqrt{S_{NL}^2 - P_{NL}^2} \tag{6.10}$$

สามารถหาค่า X_{NL} ได้โดย

$$X_{NL} = \frac{Q_{NL}}{I_{NL}^2} \tag{6.11}$$

เมื่อ

$$X_{NL} = X_1 + X_m \tag{6.12}$$

เมื่อแทนค่า X_1 ที่ได้จากการทดสอบการดรึงโรเตอร์ เราก็จะสามารถหาค่า X_m ได้

6.3 ผลการทดสอบเพื่อหาวงจรสมมูลของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการทดสอบดรึงโรเตอร์ (Block Rotor Test)

ครั้งที่	แรงดัน(V)	กระแส(A)	*PF*	พลังงาน(*kw*)
1	52.17	8.784	0.8512	0.3900
2	52.07	8.736	0.8524	0.3878
3	52.16	8.754	0.8533	0.3896

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 แสดงผลการทดสอบขณะไร้ภาระทางไฟฟ้า(No Load Test)

N_s	N_r	V_{line}	I_{line}	PF
1500	1494	380	8.7	0.0724

จากการทดสอบทั้งหมดได้แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 แสดงค่าตัวแปรของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำของมอเตอร์ที่นำมาทดสอบ

R_1	X_1	R_2'	X_2'	X_m
1.5	2.873	0.31	2.873	25.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
บทสรุป และข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ตลอดจนการทดลองต่าง ๆ กับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งในที่นี้ได้มุ่งเน้นไปที่การทดลองเพื่อพิสูจน์ทฤษฎีที่เกี่ยวเนื่องกับปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ พบว่าผลการทดลองที่ได้ในแต่ละหัวข้อนั้นมีแนวโน้มที่เป็นไปตามทฤษฎี แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ยังมีความผิดพลาดคลาดเคลื่อนอยู่บ้างในบางการทดลอง ซึ่งสาเหตุหลักของความผิดพลาดเหล่านี้น่าจะอยู่ที่ขั้นตอนการออกแบบและพันขดลวดขึ้นใหม่เพื่อใช้ในการทดลองแต่ละครั้ง เพราะเป็นขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อน และด้วยความที่ผู้ทำการทดลองอาจยังไม่มีความเชี่ยวชาญเพียงพอในการพันขดลวด และการคำนวณจำนวนรอบต่าง ๆ ตลอดจนการกำหนดวงจรการพันและเบอร์ของลวดทองแดงที่ใช้เพื่อให้มอเตอร์มีพิกัดเป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณในส่วนนี้ยังคงเป็นปัญหาอยู่มาก โดยจะพบว่าในหลาย ๆ ครั้ง ที่พันขดลวดเสร็จเรียบร้อยแล้วนำมาทดสอบ กลับไม่ได้ค่าที่เป็นไปตามที่คำนวณไว้ ทำให้ต้องมีการรื้อพันใหม่อยู่หลายครั้ง

ในการที่จะทำงานวิจัยชิ้นนี้ให้เสร็จลุล่วงไปได้ จำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ทำการทดลองควรจะมีความพร้อมในด้านเนื้อหาทฤษฎี ตลอดจนการฝึกฝนปฏิบัติ เนื่องด้วยงานวิจัยนี้ต้องใช้ความเข้าใจในหลายด้านในการคิดวิเคราะห์เพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จด้วยดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] A.E. Fitzgerald,Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, *Electric Machinery*, Fifth Edition, London: McGraw-Hill, 1990.

[2] Sawhney A.K, *A course in Electrical Machine Design*, Third Editon, Dhanpat Rai&Sons, New Delhi, 1974.

[3] David Bradley, *Basic Electrical Power And Machines*, Chapman & Hall, London, 1994.

[4] พิชิต ลำยอง,*Electrical Machine 1 (เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1)*, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[5] ทวาย สำเร็จ, *คู่มือซ่อมมอเตอร์ไฟฟ้า*, พิมพ์ครั้งที่ 3, สุณีย์การพิมพ์, กรุงเทพฯ, 1977.

[6] ณรงค์ ชอนตะวัน, *มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ*, เอราวัณการพิมพ์, กรุงเทพฯ, 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้