

การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส
โดยหม้อแปลงไฟฟ้า

THREE PHASE TO SINGLE PHASE CONVERSION
BY TRANSFORMER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาด้านหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. ๒๕๔๓

ISBN 974-622-922-2

การแปลงไฟฟ้ากระแสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสลับหนึ่งเฟส
โดยหม้อแปลงไฟฟ้า

THREE PHASE TO SINGLE PHASE CONVERSION
BY TRANSFORMER



พุทธพร เสวตสกุลานนท์

BUDHAPON SAWETSAKULANOND

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา พ.ศ. 2543

เลขหม.....
เลขทะเบียน... 38039
วัน, เดือน, ปี 20 พ.ย. 2543

ISBN 974-622-922-2

THREE PHASE TO SINGLE PHASE CONVERSION BY TRANSFORMER



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

KING MONKGUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2000

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเป็นงานและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN 974-622-922-2

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสโดย
หม้อแปลงไฟฟ้า

THREE PHASE TO SINGLE PHASE CONVERSION BY
TRANSFORMER

ชื่อผู้แต่ง

นายสุวิทย์ อรรถวิวัฒน์

ชื่ออาจารย์

อ.สุวิทย์

ปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

ชื่อมหาวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชื่อสถาบัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต

ชื่อสาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็น **COPYRIGHT** 2000 ของการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ **SCHOOL OF GRADUATE STUDIES** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ หนึ่งเฟสโดยหม้อแปลงไฟฟ้า
นักศึกษา	นายพุทธรพร เสวดสกุลานนท์
รหัสประจำตัว	40061019
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2543
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.พิชิต ถ้ายอง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นคำแนะนำแนวทางการแปลงจากระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส โดยหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบจะใช้หลักการของสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ในแนวระนาบ สำหรับโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีการวางเรียงแกนเหล็กแบบดับเบิลไซท์ มีขนาดพิกัด 6 กิโลโวลต์แอมป์ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสที่ได้จากทางด้านทุติยภูมินี้สามารถปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 1.88 – 285 โวลต์ ฮาร์มอนิกซ์ของแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิมีค่าตั้งแต่ 2.70 – 16.30 เปอร์เซ็นต์ จากการวิจัยนี้ได้พัฒนาหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อให้กระแสทางด้านปฐมภูมิมีความสมดุลย์ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความสมดุลย์และมีความน่าเชื่อถือในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title Three Phase To Single Phase Conversion by Transformer
Student Mr. Budhapon Sawetsakulanond
Student ID. 40061019
Degree Master of Engineering
Programme Electrical Engineering
Year 2000
Thesis Advisor Assis.Prof.Pichit Lumyoung

ABSTRACT

This thesis presents a conversion method of ac supply from three phase system into single phase system using a design transformer. This is based on the principle of linear travelling magnetic field. The transformer with rating of 6 kVA has a double side magnetic core arrangement. The single phase output voltage obtained from secondary side can vary between 1.88 – 285 volts. Total harmonic distortion of output voltage is within 2.70 – 16.30 %. This research has developed a transformer with fairly balanced primary currents in order to provide the balance and more reliable system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.พิชิต ถ้ายอง ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ นอกจากนี้ยังขอขอบคุณอาจารย์ในภาควิชาไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้แก่ผู้เขียนและขอขอบคุณนางสาวเพ็ญศรี แซ่หลี่ สำหรับการพิมพ์ต้นฉบับวิทยานิพนธ์

ความดีของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอมอบแด่ บิดา มารดา ผู้สนับสนุนผู้เขียนตลอดมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป	X
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีทั่วไป.....	2
2.1 สนามแม่เหล็กหมุนและสนามแม่เหล็กแนวระนาบ.....	2
2.1.1 สนามแม่เหล็กหมุน.....	2
2.1.2 สนามแม่เหล็กแนวระนาบ.....	5
2.2 ลักษณะของการวางขดลวด.....	8
2.2.1 การพันขดลวด.....	8
2.2.1.1 การพันแบบชั้นเดียว.....	8
2.2.1.2 การพันแบบสองชั้น.....	9
2.2.2 แฟคเตอร์ของการพันขดลวด.....	10
2.2.2.1 คิสตรีบิวชันแฟคเตอร์.....	10
2.2.2.2 พิชแฟคเตอร์.....	12
2.2.2.3 แฟคเตอร์การพันขดลวด.....	14
2.3 กำล้างไฟฟ้าสูญเสียในวงจรแม่เหล็ก.....	14
2.3.1 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส.....	14
2.3.2 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน.....	16
2.4 ส่วนประกอบของลิกเกจรีแอกแตนซ์.....	17
2.4.1 ลิกเกจรีแอกแตนซ์ของร่องสล้อททางด้านปฐมภูมิเมื่อร่องสล้อท รูปสี่เหลี่ยม.....	18
2.4.2 ลิกเกจรีแอกแตนซ์ของร่องสล้อททางด้านปฐมภูมิเมื่อร่องสล้อทไม่เป็น รูปสี่เหลี่ยม.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้เฉพาะเพื่อการเรียนเท่านั้น ไม่ควรแจกจ่ายให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.4.3	ลิกเกจรีแอกเตนซ์ของร่องสล้อททางด้านทุติยภูมิเมื่อร่องสล้อทรูปสี่เหลี่ยม	29
2.4.4	ลิกเกจรีแอกเตนซ์ของร่องสล้อททางด้านทุติยภูมิเมื่อร่องสล้อท ไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยม.....	31
2.4.5	ลิกเกจรีแอกเตนซ์ของปลายขดลวด.....	32
2.4.6	ดิฟเฟอเรนเชียลลิกเกจรีแอกเตนซ์.....	34
2.4.7	สกีวลิกเกจรีแอกเตนซ์.....	34
2.5	บทสรุป.....	36
บทที่ 3	การออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า.....	37
3.1	บทนำ.....	37
3.2	การคำนวณ Main Dimension ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	37
3.3	การคำนวณจำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ.....	40
3.4	การคำนวณกระแสทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ.....	41
3.5	การพันขดลวด.....	42
3.6	การคำนวณแฟคเตอร์ของการพันขดลวด.....	43
3.7	การคำนวณขนาดของร่องสล้อท.....	45
3.8	การลงขดลวดในร่องสล้อท.....	46
3.9	บทสรุป.....	47
บทที่ 4	การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า.....	49
4.1	บทนำ.....	49
4.2	การทดสอบแกนเหล็ก.....	49
4.3	การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	53
4.3.1	การทดสอบแบบเบ็ดเตล็ด.....	53
4.3.2	การทดสอบแบบลัดวงจร.....	55
4.3.3	การทดสอบหาค่าความต้านทานของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	57
4.4	การทดสอบผลกระทบของการทำสกีวอิ้งของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	59
4.5	การทดสอบการเกิดความร้อนของเส้นแรงแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	65
4.6	การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	74
4.7	บทสรุป.....	84

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	86
5.1 บทนำ.....	86
5.2 วิเคราะห์การทดสอบแกนเหล็ก.....	86
5.2.1 ลักษณะของ $B - H$ Curve.....	86
5.2.2 ลักษณะของกราฟ P_c กับ B_{max}	86
5.2.3 ลักษณะของกราฟ P_a กับ B_{max}	87
5.2.4 วิเคราะห์การแยกค่าสูญเสียฮิสเทอรีซิสและกระแสไหลวน.....	87
5.2.5 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส	88
5.2.6 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน.....	88
5.3 วิเคราะห์การทดสอบค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	89
5.4 วิเคราะห์การทดสอบผลกระทบของการทำสต็อกของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	90
5.5 วิเคราะห์การทดสอบการเกี่ยวค้ำของเส้นแรงแม่เหล็ก.....	91
5.6 วิเคราะห์การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	99
5.7 วิเคราะห์ผลกระทบของขบที่มีต่อหม้อแปลงไฟฟ้า.....	99
5.8 บทสรุป.....	101
บทที่ 6 บทสรุป	103
6.1 บทสรุปและวิจารณ์.....	103
เอกสารอ้างอิง	106
ประวัติผู้เขียน	108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

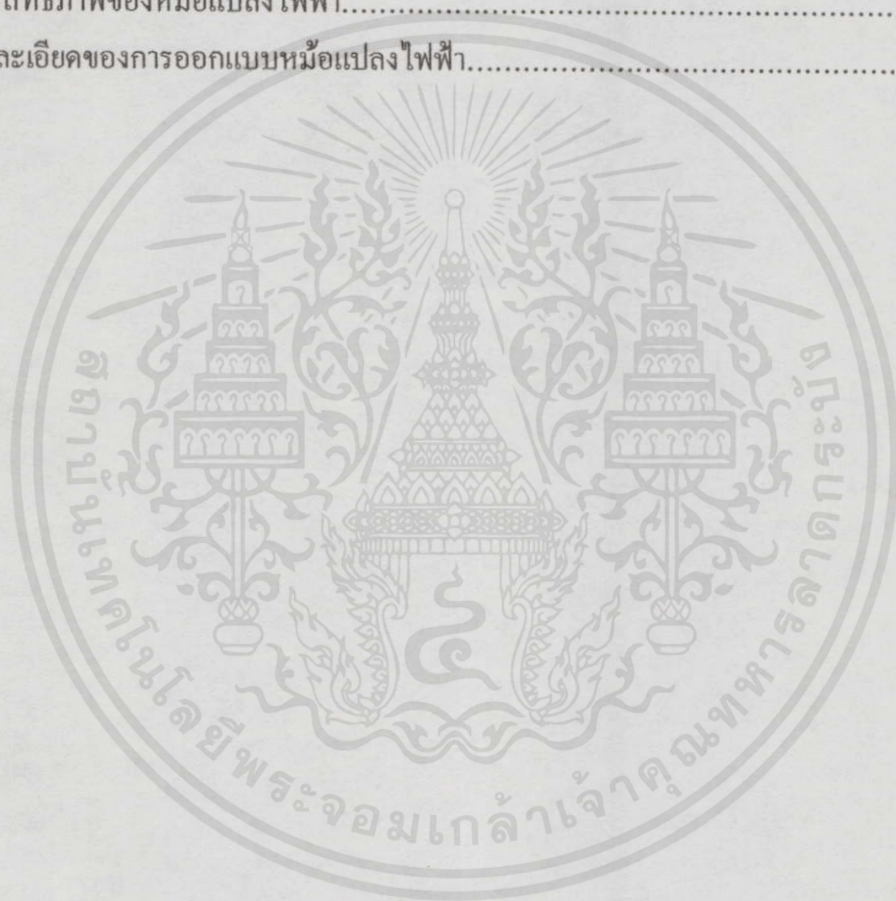
สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.17 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง ที่ระยะ 0 m.....	74
4.18 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง ที่ระยะ 0.03 m.....	74
4.19 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง ที่ระยะ 0.06 m.....	74
4.20 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง ที่ระยะ 0.09 m.....	75
4.21 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง ที่ระยะ 0.12 m.....	75
4.22 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง ที่ระยะ 0.15 m.....	75
4.23 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง ที่ระยะ 0.18 m.....	76
4.24 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง ที่ระยะ 0 m.....	79
4.25 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง ที่ระยะ 0.03 m.....	79
4.26 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง ที่ระยะ 0.06 m.....	79
4.27 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง ที่ระยะ 0.09 m.....	80
4.28 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง ที่ระยะ 0.12 m.....	80
4.29 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง ที่ระยะ 0.15 m.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.30 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง ที่ระยะ 0.18 m.....	81
5.1 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	89
5.2 เฟสชิพระหว่างแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ.....	98
5.3 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	99
6.1 รายละเอียดของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า.....	104



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางการทดสอบกระแสของแต่ละเฟสที่เวลาต่างๆ.....	6
3.1 รายละเอียดของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า.....	48
4.1 ลักษณะวงจรแม่เหล็กที่ออกแบบ.....	50
4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแกนเหล็ก M5 ที่ความถี่ 50 Hz.....	50
4.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแกนเหล็ก M5 ที่ความถี่ 50 Hz.....	51
4.4 ค่า P_e และ P_h ของแกนเหล็ก M5 ที่ความถี่ 50 Hz.....	51
4.5 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร.....	55
4.6 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจร.....	56
4.7 ผลการทดสอบความต้านทานทางค้ำปฐมภูมิ.....	57
4.8 ผลการทดสอบความต้านทานทางค้ำทุติยภูมิ.....	58
4.9 การทดสอบการเกี่ยวค้ำของ Mutual Flux เฟส A ที่กระทำต่อขดลวดทางค้ำทุติยภูมิ ที่ระยะต่างๆเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง.....	68
4.10 การทดสอบการเกี่ยวค้ำของ Mutual Flux เฟส B ที่กระทำต่อขดลวดทางค้ำทุติยภูมิ ที่ระยะต่างๆเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง.....	68
4.11 การทดสอบการเกี่ยวค้ำของ Mutual Flux เฟส C ที่กระทำต่อขดลวดทางค้ำทุติยภูมิ ที่ระยะต่างๆเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง.....	69
4.12 การทดสอบการเกี่ยวค้ำของ Mutual Flux ทั้งสามเฟสที่กระทำต่อขดลวดทางค้ำทุติยภูมิ ที่ระยะต่างๆเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง.....	69
4.13 การทดสอบการเกี่ยวค้ำของ Mutual Flux เฟส A ที่กระทำต่อขดลวดทางค้ำทุติยภูมิ ที่ระยะต่างๆเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง.....	71
4.14 การทดสอบการเกี่ยวค้ำของ Mutual Flux เฟส B ที่กระทำต่อขดลวดทางค้ำทุติยภูมิ ที่ระยะต่างๆเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง.....	71
4.15 การทดสอบการเกี่ยวค้ำของ Mutual Flux เฟส C ที่กระทำต่อขดลวดทางค้ำทุติยภูมิ ที่ระยะต่างๆเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง.....	72
4.16 การทดสอบการเกี่ยวค้ำของ Mutual Flux ทั้งสามเฟสที่กระทำต่อขดลวดทางค้ำทุติยภูมิ ที่ระยะต่างๆเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	2
2.2	3
2.3	3
2.4	5
2.5	6
2.3	7
2.4	7
2.5	7
2.6	7
2.7	8
2.11	8
2.12	9
2.13	9
2.14	10
2.15	12
2.16	15
2.17	17
2.18	17
2.19	18
2.20	18
2.21	19
2.22	25
2.23	27
2.24	28
2.25	30
2.26	31
2.27	32
2.28	34

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 การผ่าสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้า.....	37
3.2 (a) เครื่องจักรกลไฟฟ้า (b) หม้อแปลงไฟฟ้า.....	38
3.3 แกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิ	39
3.4 แกนเหล็กทางด้านทุติยภูมิ	39
3.5 การพันขดลวดทางด้านปฐมภูมิ	42
3.6 การพันขดลวดทางด้านทุติยภูมิ.....	42
3.7 การต่อขดลวดทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	43
3.8 การต่อขดลวดทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	43
3.9 รูปร่างร่องสลักของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	45
3.10 แกนเหล็กและการลงขดลวดทางด้านปฐมภูมิ.....	46
3.11 แกนเหล็กและการลงขดลวดทางด้านทุติยภูมิ.....	47
3.12 หม้อแปลงไฟฟ้า.....	47
4.1 วงจรแม่เหล็กที่ใช้ในการทดสอบ	50
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P_c กับ B_{max} ของแกนเหล็ก M5 ที่ความถี่ 50 Hz และ 60 Hz	52
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P_a กับ B_{max} ของแกนเหล็ก M5 ที่ความถี่ 50 และ 60 Hz	52
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง H กับ B_{max} ของแกนเหล็ก M5 ที่ความถี่ 50 และ 60 Hz.....	52
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P_e กับ B_{max} ของแกนเหล็ก M5 ที่ความถี่ 50 และ 60 Hz.....	53
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P_h กับ B_{max} ของแกนเหล็ก M5 ที่ความถี่ 50 และ 60 Hz	53
4.7 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร.....	54
4.8 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจร	56
4.9 กราฟแสดงผลการทดลอง V-I Method ของความต้านทานทางด้านปฐมภูมิ.....	58
4.10 กราฟแสดงผลการทดลอง V-I Method ของความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ.....	58

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ก) การวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing).....	59
4.11 ข) การวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)	59
4.12 แรงดันไฟฟ้าทางค้ำด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.03 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) 38 V , THD 28.5 %.....	60
4.13 แรงดันไฟฟ้าทางค้ำด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.06 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) 106 V , THD 20.10 %.....	60
4.14 แรงดันไฟฟ้าทางค้ำด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.09 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) 172 V , THD 8.30 %.....	61
4.15 แรงดันไฟฟ้าทางค้ำด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.12 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) 254 V , THD 7.30 %.....	61
4.16 แรงดันไฟฟ้าทางค้ำด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.15 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) 215 V , THD 3.10 %.....	62
4.17 แรงดันไฟฟ้าทางค้ำด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.18 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) 276 V , THD 2.30 %.....	62
4.18 แรงดันไฟฟ้าทางค้ำด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.03 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing) 66 V , THD 16.30 %.....	63
4.19 แรงดันไฟฟ้าทางค้ำด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.06 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing) 153 V , THD 7.40 %.....	63
4.20 แรงดันไฟฟ้าทางค้ำด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.09 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing) 236 V , THD 8.0 %	63
4.21 แรงดันไฟฟ้าทางค้ำด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.12 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing) 285 V , THD 4.0 %	64
4.22 แรงดันไฟฟ้าทางค้ำด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.15 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing) 260 V , THD 2.70 %.....	64
4.23 แรงดันไฟฟ้าทางค้ำด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.18 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing) 244 V , THD 2.90 %	65
4.24 วงจรไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำ.....	65
4.25 วงจรไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	66

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 การเกี่ยวข้องของ Mutual Flux ที่ระยะ 0 m.....	67
4.27 การเกี่ยวข้องของ Mutual Flux ที่ระยะ 0.18 m	68
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง Mutual Flux แต่ละเฟสที่กระทำต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิ เมื่อเลื่อนแกนเหล็กที่ระยะต่างๆ โดยมีการวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing).....	70
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง Mutual Flux ทั้งสามเฟสที่กระทำต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิ เมื่อเลื่อนแกนเหล็กที่ระยะต่างๆ โดยมีการวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing).....	70
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง Mutual Flux แต่ละเฟสที่กระทำต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิ เมื่อเลื่อนแกนเหล็กที่ระยะต่างๆ โดยมีการวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)	73
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง Mutual Flux ทั้งสามเฟสที่กระทำต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิ เมื่อเลื่อนแกนเหล็กที่ระยะต่างๆ โดยมีการวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing).....	73
4.32 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะต่างๆเมื่อวางเรียงแกนเหล็ก ในแนวตรง (Unskewing)	76
4.33 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.03 m เมื่อวางเรียง แกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)	77
4.34 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.06 m เมื่อวางเรียง แกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)	77
4.35 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.09 m เมื่อวางเรียง แกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) ..	77
4.36 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.12 m เมื่อวางเรียง แกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)	78
4.37 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.15 m เมื่อวางเรียง แกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)	78
4.38 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.18 m เมื่อวางเรียง แกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) ..	78
4.39 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะต่างๆเมื่อวางเรียงแกนเหล็ก ในแนวเอียง (Skewing)รับกระแสใช้งานเพื่อลดการสั่นพ้องกัน ไม่ยอมลดค่าให้มันไปใช้ประโยชน์ในการค้า	82
4.40 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.03 m เมื่อวางเรียง แกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)	82

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.06 m เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)	83
4.42 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.09 m เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)	83
4.43 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.12 m เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)	83
4.44 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.15 m เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)	84
4.45 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.18 m เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)	84
5.1 วงจรสมมูลย์ต่อเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้า	89
5.2 ก) การวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง	90
5.2 ข) การวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง	90
5.3 ฮาร์มอนิกส์ของแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะต่างๆ	90
5.4 แรงเคลื่อนแม่เหล็กและความเข้มสนามแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้า	92
5.5 แรงเคลื่อนแม่เหล็กและความเข้มสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า	93
5.6 มิวชวลฟลักซ์ทั้งสามเฟสที่กระทำต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิ.....	94
5.7 การต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิ.....	95
5.8 การรวมกันทางเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแต่ละขดลวด.....	95
5.9 แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะต่างๆ.....	96
5.10 เฟสรีฟของแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเฟส A เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.03 m เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ 20 V และแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ 1.07 V (Probe × 10).....	96
5.11 เฟสรีฟของแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเฟส A เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.06 m เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ 20 V และแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ 4.46 V (Probe × 10).....	97

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำเนื้อหาไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยฯ การนำเนื้อหาไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 เฟสรีฟของแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเฟส A เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.09 m เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ 20 V และแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ 13.79V (Probe × 10).....	97
5.13 เฟสรีฟของแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเฟส A เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.12 m เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ 20 V และแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ 21.92V (Probe × 10).....	97
5.14 เฟสรีฟของแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเฟส A เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.15 m เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ 20 V และแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ 27.41V (Probe × 10).....	98
5.15 เฟสรีฟของแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเฟส A เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.18 m เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ 20 V และแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ 25.73V (Probe × 10).....	98
5.16 เส้นแรงแม่เหล็กที่โค้งตัวของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	100
5.17 สนามแม่เหล็กตัดขวางด้านข้างของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	100
5.18 กำลังไฟฟ้าสูญเสียบริเวณขอบที่ระยะต่างๆ	101
6.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Double side.....	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์

θ	:	มุมมองเสาทางไฟฟ้า
ω	:	ความเร็วเชิงมุม
K_w	:	แฟคเตอร์ของการพันขดลวด
K_{w1}	:	แฟคเตอร์ของการพันขดลวดทางด้านปฐมภูมิ
K_{w2}	:	แฟคเตอร์ของการพันขดลวดทางด้านทุติยภูมิ
N_{ph}	:	จำนวนรอบต่อเฟส
P	:	จำนวนขั้วแม่เหล็ก
V_t	:	ความเร็วของสนามแม่เหล็กแนวระนาบ
p	:	ระยะพิชของขั้วแม่เหล็ก
f	:	ความถี่ไฟฟ้า
K_d	:	คิสตริบิวชันแฟคเตอร์
K_{d1}	:	คิสตริบิวชันแฟคเตอร์ทางด้านปฐมภูมิ
K_{d2}	:	คิสตริบิวชันแฟคเตอร์ทางด้านทุติยภูมิ
K_{dn}	:	คิสตริบิวชันแฟคเตอร์อันดับ n
σ	:	spread of phase group (60 หรือ 120 องศาทางไฟฟ้า)
γ	:	ความกว้างร่องสลีต
K_w	:	แฟคเตอร์การพันขดลวด
K_p	:	พิชแฟคเตอร์
K_{p1}	:	พิชแฟคเตอร์ทางด้านปฐมภูมิ
K_{p2}	:	พิชแฟคเตอร์ทางด้านทุติยภูมิ
P_h	:	การสูญเสียเนื่องจากฮีสเทอรีซิส
K_h	:	ค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็กที่ทำการทดสอบ
f	:	ความถี่ไฟฟ้า
B_{max}	:	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด
x	:	ค่าดัชนีสไตน์เมทซ์ (steinmetz 's Index) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.5 โดยทั่วไปจะใช้ค่า x นี้ ประมาณ 1.6
P_e	:	การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน
G	:	สภาพความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็ก
τ	:	ความหนาของวัสดุแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์(ต่อ)

P_c	:	การสูญเสียภายในแกนเหล็ก
$(NI)_y$:	แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่กระทำตามขวางของร่องสล๊อทที่จุด y
w	:	ความยาวของแนวทางการเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกแรงเคลื่อนแม่เหล็กกระทำ
N_c	:	จำนวนรอบต่อขดลวด
I_t	:	กระแสในตัวนำ
$N_c I_t$:	ampere – turns ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สร้างในแต่ละขดลวด
d_1	:	ระยะความลึกของขดลวด
N	:	จำนวนรอบที่เหนี่ยวนำโดยลิกเกจฟลักซ์ (leakage Flux)
I	:	I_t กระแสที่ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กคงที่
dL	:	จำนวนที่เพิ่มขึ้นของลิกเกจฟลักซ์
P_{s1}	:	อัตราส่วนสภาพในการเป็นตัวนำในวงจรมแม่เหล็กทางด้านปฐมภูมิ
P_{s2}	:	อัตราส่วนสภาพในการเป็นตัวนำในวงจรมแม่เหล็กทางด้านทุติยภูมิ
X_{s1}	:	ลิกเกจรีแอกแตนซ์ทางด้านปฐมภูมิ
X_{s2}	:	ลิกเกจรีแอกแตนซ์ทางด้านทุติยภูมิ
X_{ep}	:	ลิกเกจรีแอกแตนซ์ปลายขดลวด
X_{sk}	:	สทิวลิกเกจรีแอกแตนซ์
n_s	:	ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน
C_0	:	output coefficient
D	:	เส้นผ่าศูนย์กลาง
L	:	ความหนาของการเรียงแกนเหล็ก
E	:	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีหน่วยโวลท์
f	:	ความถี่ของระบบไฟฟ้ามีหน่วยเฮิรตซ์
N	:	จำนวนรอบต่อเฟสมีหน่วยรอบ
A	:	พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กมีหน่วยตารางเมตร
B_{max}	:	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเทสลา
sf	:	แฟคเตอร์ของการเรียงแผ่นเหล็กมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8–0.9
β	:	ความยาวคลื่น
K_{dv}	:	Distance Voltage Factor
z	:	ระยะทางที่ Mutual Flux ทั้งสามเฟสเหนี่ยวนำขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าการนำเอกสารทั้งเล่มหรือบางส่วนไปใช้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

หลักการและพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแนวระนาบ (Liner Machine) เป็นที่รู้จักกันมานานแล้ว และเริ่มมีการวิจัยและพัฒนาไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมากขึ้น โดยมากจะเน้นทางด้านรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน จุดที่น่าสนใจคือการนำเอาหลักการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแนวระนาบมาออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า วิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ได้แนวความคิดจากการศึกษาเรื่องเครื่องจักรกลไฟฟ้าแนวระนาบ โดยนำความรู้ที่ศึกษามาออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแปลงจากระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส ขนาดพิกัด 3 กิโลวัตต์ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสที่ได้จากทางด้านทฤษฎียังสามารถปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 1.88 – 285 โวลต์ จากการศึกษาวิจัยนี้ได้พัฒนาหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อให้กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิมีความสมดุลย์ใกล้เคียงกันเพื่อใช้งานกับ โหลดหนึ่งเฟสซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีความสมดุลย์และมีความน่าเชื่อถือในระบบ[1,5,6,8]

สำหรับวิทยานิพนธ์ในเล่มนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในวงการอุตสาหกรรม ซึ่งจะทำให้ประเทศมีการพัฒนาแนวความรู้ทางด้านวิศวกรรมมากขึ้น

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งออกเป็น 6 บทดังสรุปได้ย่อๆดังนี้

บทที่ 1 บทนำ

บทที่ 2 เป็นการศึกษาทฤษฎีของสนามแม่เหล็กหมุนและสนามแม่เหล็กแนวระนาบ ซึ่งเป็นหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้าแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส , ลักษณะของการพันขดลวด , กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในวงจรแม่เหล็กและตึกเกจรีแอกแตนซ์ภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

บทที่ 3 อธิบายถึงการออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า

บทที่ 4 อธิบายถึงการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยแบ่งออก 5 ส่วนด้วยกันคือ การทดสอบแกนเหล็ก , การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า , การทดสอบผลกระทบของการทำสเก็วอิงของหม้อแปลงไฟฟ้า , การทดสอบการเก็ยวคล็องของเส้นแรงแม่เหล็กและการทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

บทที่ 5 เป็นการวิเคราะห์ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในส่วนต่างๆของบทที่ 4

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปและวิจารณ์เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีทั่วไป

2.1 สนามแม่เหล็กหมุนและสนามแม่เหล็กแนวระนาบ

2.1.1 สนามแม่เหล็กหมุน

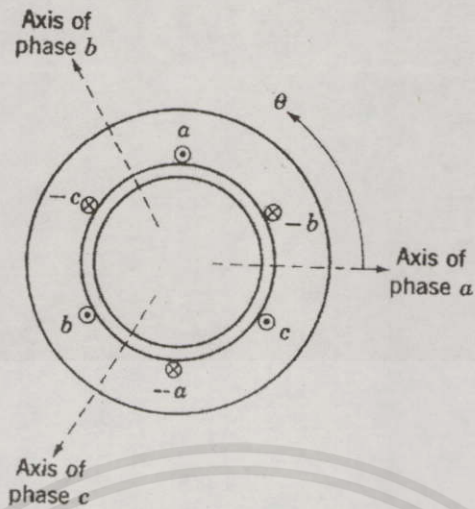
หลักการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนนี้ เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดที่พันอยู่ในเครื่องจักรกลไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลในแต่ละเฟสมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ จึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแปรเปลี่ยนตามไปด้วย ซึ่งทำให้คล้ายกับว่า สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในนั้นเกิดจากการหมุนของแม่เหล็กถาวร แต่ในความเป็นจริงมันเกิดจากตำแหน่งของแรงลัพธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กแปรเปลี่ยนไปตามค่าของกระแสไฟฟ้าที่ได้รับซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จากเครื่องจักรกลนี้ จะเห็นได้ว่าการพันขดลวดอยู่ที่สเตเตอร์ โดยแต่ละเฟสมีมุมต่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้าตามลำดับเฟส A, B, C ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อป้อนไฟ 3 เฟสเข้าที่สเตเตอร์ โดยจะต่อแบบสตาร์ (star) หรือ เดลต้า (delta) ก็ได้จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้น ดังรูปที่ 2.1[1,2,5,6,8]



รูปที่ 2.1 ขั้วแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุน

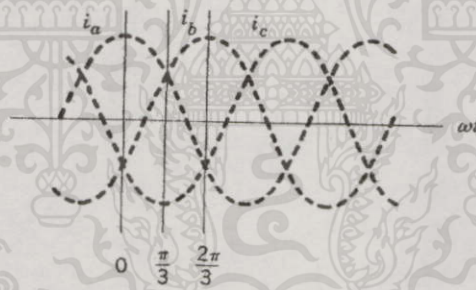
ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสในแต่ละเฟสที่ขดลวดสเตเตอร์นั้น จะทำให้เกิดผลลัพธ์ของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตำแหน่งไปตามสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นนี้ โดยจะพิจารณาภายใต้เงื่อนไขสามเฟสสมดุล ดังรูปที่ 2.2[1,5,6,8,9]

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ลักษณะของการวางขดลวดสามเฟส

ซึ่งจะได้กระแสชั่วขณะในแต่ละเฟส ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระแสชั่วขณะภายใต้เงื่อนไขสามเฟสสมดุลย์

โดยจะทำให้เกิด MMF ในแต่ละเฟสเท่ากับ

$$F_a = F_{max} \cos \omega t \cos \theta \tag{2.1}$$

$$F_b = F_{max} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ) \tag{2.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิได้ตัดทอนหรือแก้ไขเอกสารฉบับนี้ การทุกครั้งที่มีการ (2.3) ใช้

$$F_c = F_{max} \cos(\omega t + 120^\circ) \cos(\theta + 120^\circ)$$

เมื่อ θ : มุมองศาทางไฟฟ้า
 ω : ความเร็วเชิงมุม

โดยที่

$$F_{\max} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_{ph}}{P} I_m \quad (2.4)$$

เมื่อ K_w : แฟคเตอร์ของการพันขดลวด
 N_{ph} : จำนวนรอบต่อเฟส
 P : จำนวนขั้วแม่เหล็ก

จากฟังก์ชัน $\cos a \cos b = \frac{1}{2} (\cos(a-b) + \cos(a+b))$ แทนค่าลงในสมการที่ (2.1)

$$F_a = \frac{1}{2} F_{\max} (\cos(\theta - \omega t) + \cos(\theta + \omega t)) \quad (2.5)$$

$$F_a = F_{a1}^+ + F_{a1}^- \quad (2.6)$$

โดยเทอม F_{a1}^+ คือ Forward Field มีค่าเท่ากับ

$$F_{a1}^+ = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (2.7)$$

และเทอม F_{a1}^- คือ Backward Field มีค่าเท่ากับ

$$F_{a1}^- = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t) \quad (2.8)$$

ในขณะเดียวกัน MMF ในเฟส b และ c จะมีแกนอยู่ที่ $\theta = 120^\circ$ และ $\theta = -120^\circ$

ตามลำดับ ดังนั้นผลรวมของเทอม Backward Field มีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

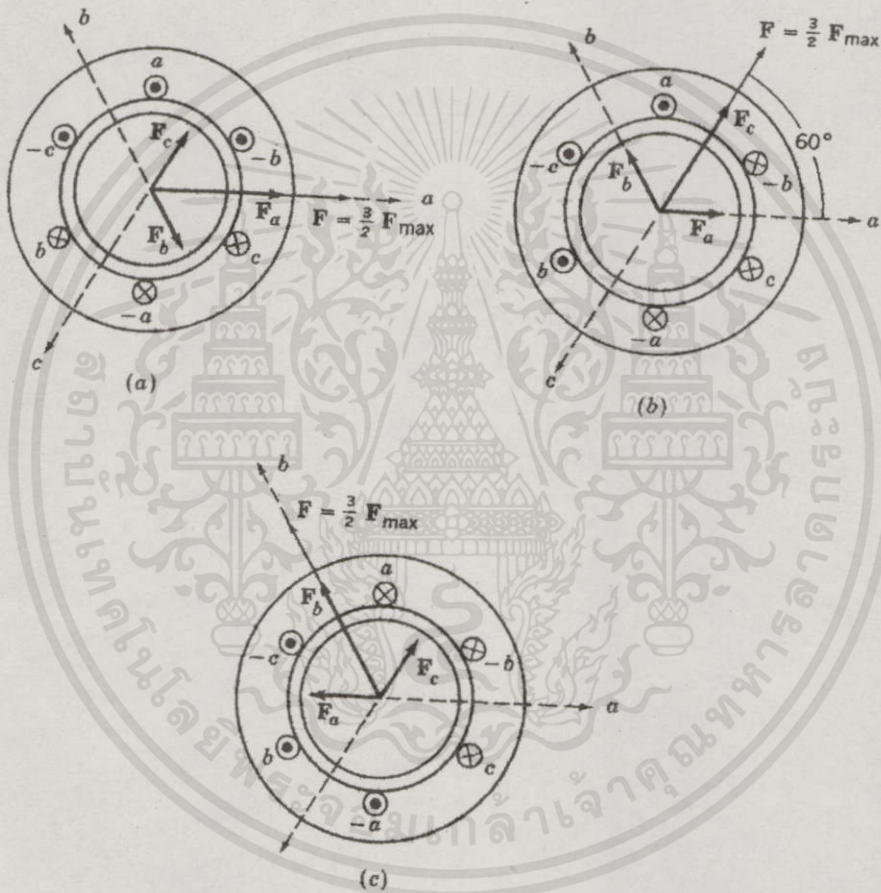
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F^-(\theta, t) = F_{a1}^- + F_{b1}^- + F_{c1}^- = 0 \quad (2.9)$$

ผลรวมของ Forward Field มีค่าเท่ากับ

$$F^+(\theta, t) = F_{a1}^+ + F_{b1}^+ + F_{c1}^+ \quad (2.10)$$

$$F^+(\theta, t) = \frac{3}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (2.11)$$

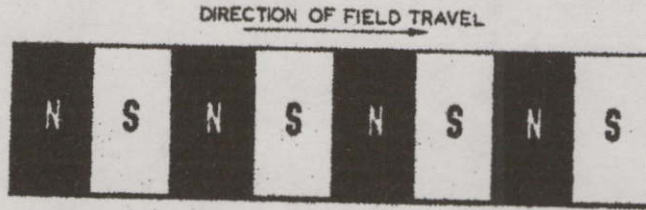


รูปที่ 2.4 MMF รวมที่เกิดขึ้นในสเตเตอร์ที่เวลาต่าง ๆ

2.1.2 สนามแม่เหล็กแนวระนาบ

ในกรณีที่ เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าแนวระนาบจะเหมือนกับสนามแม่เหล็กหมุน เพียงแต่สนามแม่เหล็กแนวระนาบจะเหมือนกับการผ่าสนามแม่เหล็กหมุนแล้วเคลื่อนออกไปใช้

โดยความเร็วของสนามแม่เหล็กแนวระนาบสามารถทราบได้จากสมการที่ (2.12)[1,6,8,15]



รูปที่ 2.5 ขั้วแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแนวระนาบ

$$V_t = 2pf \quad (2.12)$$

- เมื่อ V_t : ความเร็วของสนามแม่เหล็กแนวระนาบ
 p : ระยะพิซของขั้วแม่เหล็ก
 f : ความถี่ไฟฟ้า

การเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กจะพิจารณาจากกระแสไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่างๆ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของขั้วสนามแม่เหล็กที่ช่วงเวลาต่าง ๆ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขดลวดแต่ละเฟสตามตาราง โดยกำหนดค่าของ I_m และ ωt เมื่อ $I_m = 1$ A แทนลงในสมการ (2.13) – (2.15)

$$i_a = I_m \cos \omega t \quad (2.13)$$

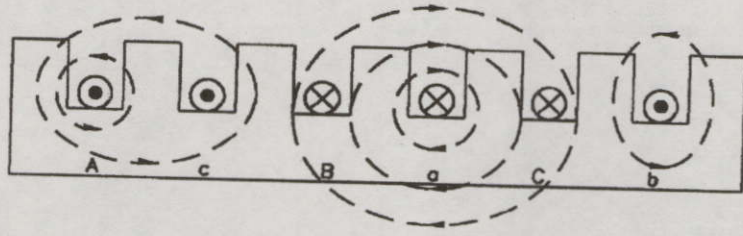
$$i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2.14)$$

$$i_c = I_m \cos(\omega t + 120^\circ) \quad (2.15)$$

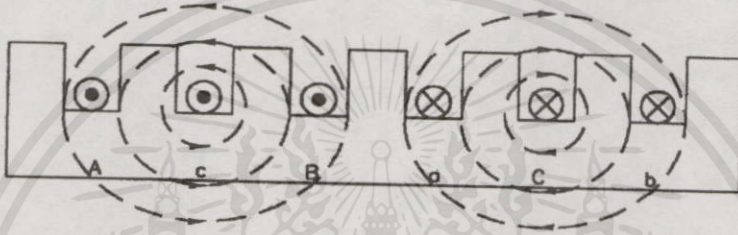
ตารางที่ 2.1 ตารางการทดสอบกระแสของแต่ละเฟสที่เวลาต่างๆ

Time	มุม	i_a	i_b	i_c
t_0	0	1	-0.5	-0.5
t_1	60	0.5	0.5	-1
t_2	120	-0.5	1	-0.5
t_3	180	-1	0.5	0.5
t_4	240	0.5	-0.5	1

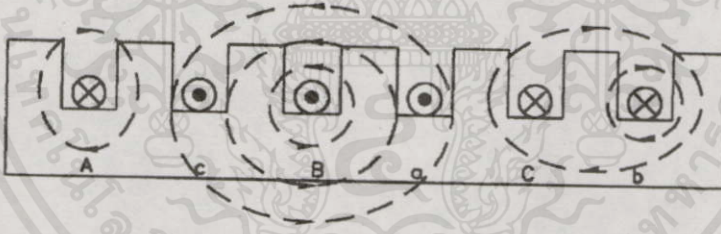
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัย เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



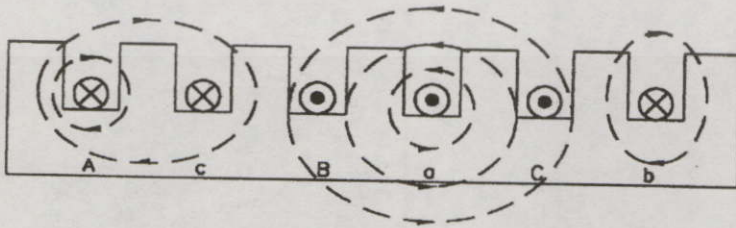
รูปที่ 2.6 สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แนวระนาบที่เวลา t_0



รูปที่ 2.7 สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แนวระนาบที่เวลา t_1

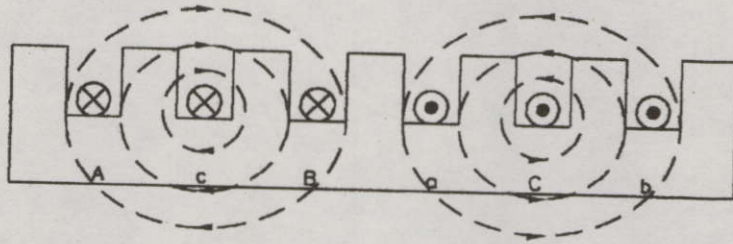


รูปที่ 2.8 สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แนวระนาบที่เวลา t_2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 2.9 สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แนวระนาบที่เวลา t_3 อย่างไรก็ตามเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แนวระนาบที่เวลา t_4

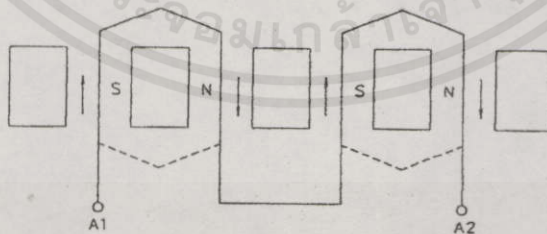
2.2 ลักษณะของการวางขดลวด

2.2.1 การพันขดลวด

ในการพันขดลวดเพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กนั้นในแต่ละเฟสจะวางห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า โดยการพันขดลวดต้องมีหลักการพันเพื่อให้ผลของความสมดุลของระบบเฟส, การลดฮาร์มอนิกส์, การประหยัดทางด้านการลงทุนและแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าที่พุด (output voltage) มีรูปร่างใกล้เคียงรูปคลื่น Sinusoidal wave มากที่สุด การพันขดลวดแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ [1,5,]

2.2.1.1 การพันแบบชั้นเดียว

ในการพันขดลวดแบบชั้นเดียวนั้นในหนึ่งร่องสล๊อทจะมีหนึ่ง Coil side โดยเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า การพันครึ่งขด (Half-coil winding) จำนวน coil group ต่อเฟสเท่ากับครึ่งหนึ่งของขั้วแม่เหล็กและกำหนดให้ความกว้างของขดลวด (coil pitch) จะเท่ากับการต่อขดลวดของแต่ละกลุ่มขดลวดเข้าด้วยกัน โดยต่อแบบปลายต่อต้นดังรูปที่ 2.11

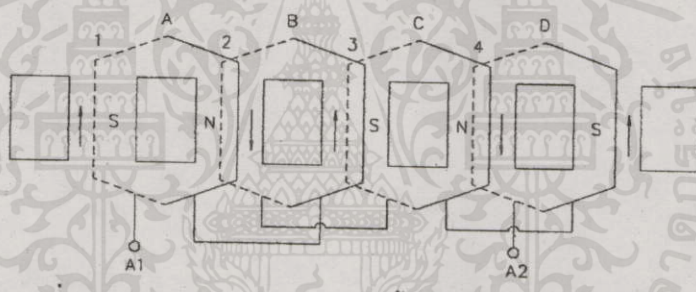


รูปที่ 2.11 การพันขดลวดแบบชั้นเดียว

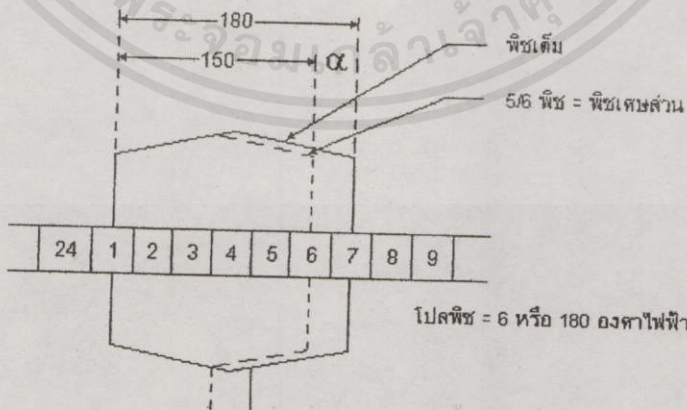
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 การพันแบบสองชั้น

ในการพันขดลวดแบบสองชั้นนี้ในหนึ่งร่องสล๊อทจะมี 2 coil side ซึ่งเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Whole - coil winding การต่อปลายของขดลวดนี้จะเห็นได้ว่าจำนวนขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมาทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ 1 Slot/Pole/Phase ฉะนั้นเมื่อมองตามลักษณะการพันแล้วคล้ายกับว่ามีการต่อขนานกัน เพราะนำปลายของขดหนึ่งและขดที่สองมาต่อเข้าด้วยกันและนำขดที่สองต่อกับขดที่สาม ทำเช่นนี้จนกว่าจะหมดเฟสแล้วจะเหลือสายออกมา 2 เส้นของแต่ละเฟสเช่นเดียวกับแบบชั้นเดียวดังรูปที่ 2.12 นอกจากนี้การลงขดลวดยังแบ่งออกเป็น 2 แบบด้วยกันคือแบบเต็มช่วง (Full Pitch) และพิชเศษส่วน (Fractional Pitch) ซึ่งทั้งสองแบบมีความแตกต่างคือ แบบเต็มช่วง (Full Pitch) ระยะห่างระหว่าง coil side ทั้งสองของขดลวด (coil pitch) จะมีระยะห่างเท่ากับ 1 Pole Pitch หรือเท่ากับ 180 องศาทางไฟฟ้าและแบบพิชเศษส่วน (Fractional Pitch) ระยะห่างระหว่าง coil side ทั้งสองของขดลวดมีระยะห่างน้อยกว่า 1 Pole Pitch หรือน้อยกว่า 180 องศาทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถดูความแตกต่างของแบบเต็มช่วงและแบบพิชเศษส่วนจากรูป 2.13



รูปที่ 2.12 การพันขดลวดแบบสองชั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าจะโดยตั้งใจหรือไม่ตั้งใจก็ตามให้ดูแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.13 การวางขดลวดแบบเต็มช่วงและแบบพิชเศษส่วน

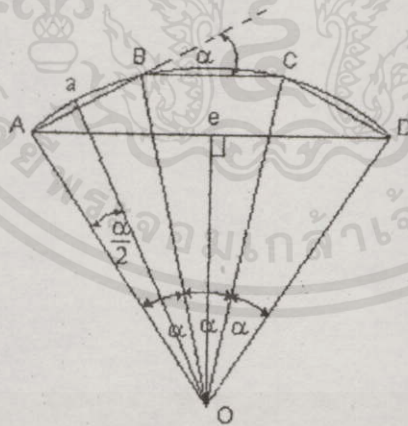
โดยการพันขดลวดแบบพิชเศษส่วน (Fractional Pitch) นอกจาก
 ประหยัดขดลวดทองแดงกว่าแบบเต็มช่วง (Full Pitch) แล้ว ลักษณะของรูปคลื่น (wave form)
 ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากที่สุดและยังลดปริมาณฮาร์มอนิกส์ลงได้
 เกือบหมด

2.2.2 แฟกเตอร์ของการพันขดลวด

2.2.2.1 ดิสทริบิวชันแฟกเตอร์

กำหนดให้เครื่องจักรกลไฟฟ้ามีขดลวด 3 ขดลวด เพราะฉะนั้นขดลวด
 แต่ละขดจะสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำออกมาเท่ากันนั่นคือในแต่ละขดลวดจะสร้างแรงเคลื่อน
 ไฟฟ้าเหนี่ยวนำออกมาแต่ละแวกเตอร์เท่ากับมุม α เพราะมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน ดังรูป 2.14[1,5,9]

เมื่อ AB คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวด a
 BC คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวด b
 CD คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวด c
 แบ่งครึ่ง AB ที่ a จาก oa เพราะฉะนั้น ao ตั้งฉาก
 กับ AB
 แบ่งครึ่ง AD ที่ e จาก oe เพราะฉะนั้น oe ตั้งฉาก
 กับ AD



รูปที่ 2.14 การหาแฟกเตอร์การพันแบบกระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{Aa}{Ao} \tag{2.16}$$
 ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหากันและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Aa = \frac{Aa}{\sin \frac{\alpha}{2}} \quad (2.17)$$

$$\sin \frac{3\alpha}{2} = \frac{Ae}{Aa} \quad (2.18)$$

$$Aa = \frac{Ae}{\sin \frac{3\alpha}{2}} \quad (2.19)$$

เพราะฉะนั้นสมการ (2.17) เท่ากับสมการ (2.19)

$$\frac{Aa}{\sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{Ae}{\sin \frac{3\alpha}{2}} \quad (2.20)$$

$$Aa = \frac{1}{2} AB \quad (2.21)$$

$$Ae = \frac{1}{2} AD \quad (2.22)$$

$$AD = \frac{AB \sin \left(\frac{3\alpha}{2} \right)}{\sin \frac{\alpha}{2}} \quad (2.23)$$

$$K_d = \frac{\text{ผลรวมทางเวกเตอร์}}{\text{ผลรวมทางพีชคณิต}} \quad (2.24)$$

$$K_d = \frac{AD}{3AB} = \frac{\sin \left(\frac{3\alpha}{2} \right)}{3 \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)} \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ได้
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_d = \frac{\sin\left(\frac{\sigma}{2}\right)}{\frac{\sigma}{\gamma} \sin \frac{\gamma}{2}} \quad (2.26)$$

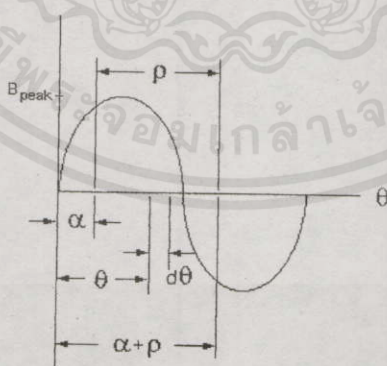
สำหรับฮาร์มอนิกอันดับ n

$$K_{d,n} = \frac{\sin\left(\frac{n\sigma}{2}\right)}{\frac{\sigma}{\gamma} \sin\left(\frac{n\gamma}{2}\right)} \quad (2.27)$$

- เมื่อ K_d : ดิสทริบิวชันแฟกเตอร์
 $K_{d,n}$: ดิสทริบิวชันแฟกเตอร์อันดับ n
 σ : spread of phase group (60 หรือ 120 องศาทางไฟฟ้า)
 γ : ความกว้างร่องสลีต

2.2.2.2 พิกซ์แฟกเตอร์

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา จึงกำหนดผลของเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหล ซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าของขดลวด เราจะพิจารณาถึงเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลที่พื้นแบบเต็มช่วงและแบบพิเศษส่วน โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.15[1,5,9]



รูปที่ 2.15 การหาพิกซ์แฟกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ ผู้จัดทำหนังสือได้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 เมื่อเรากำหนดให้

B_{max} : ค่าสูงสุดของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

- l : ความยาวตามขั้วแม่เหล็ก
 r : รัศมีจากจุดศูนย์กลางของเครื่องจักรกลไฟฟ้าถึงช่องอากาศ
 N : จำนวนรอบของขดลวด
 λ : ความกว้างของขดลวด
 P : จำนวนขั้วแม่เหล็ก

ดังนั้น

$$d\lambda = NB_{peak} \sin \theta \left(\frac{lrd\theta}{\frac{P}{2}} \right) \quad (2.28)$$

ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กรั้วไหลที่คล้องขดลวด (λ)

$$\lambda = \int_{\alpha}^{\alpha+\rho} NB_{peak} \sin \theta r \frac{2}{P} d\theta \quad (2.29)$$

$$\lambda = NB_{peak} lr \frac{2}{P} (\cos \alpha - \cos(\alpha + \rho)) \quad (2.30)$$

แทนค่า α ด้วย ωt เมื่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω

$$\lambda = NB_{peak} lr \frac{2}{P} (\cos \omega t - \cos(\omega t + \rho)) \quad (2.31)$$

$$\text{จาก } \cos \omega t - \cos(\omega t + \rho) = 2 \cos \frac{\pi - \rho}{2} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi - \rho}{2}\right) \quad (2.32)$$

ดังนั้น

$$\lambda = NB_{peak} lr \frac{4}{P} \cos \frac{\pi - \rho}{2} \cos\left(\omega t - \frac{\pi - \rho}{2}\right) \quad (2.33)$$

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = -\omega NB_{max} lr \frac{4}{P} \cos \frac{\pi - \rho}{2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi - \rho}{2}\right) \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งเมื่ออีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi = \int_0^{\pi} B_{peak} \sin \theta r \frac{2}{P} d\theta = B_{peak} lr \frac{4}{P} \quad (2.35)$$

$$e = -\omega N \phi \cos \frac{\pi - \rho}{2} \sin \left(\omega t - \frac{\pi - \rho}{2} \right) \quad (2.36)$$

$$E_{rms} = \frac{\omega}{\sqrt{2}} N \phi \cos \frac{\pi - \rho}{2} \quad (2.37)$$

$$E_{rms} = 4.44 f N \phi K_p \quad (2.38)$$

เมื่อ $K_p = \cos \frac{\pi - \rho}{2} = \sin \frac{\rho}{2} \quad (2.39)$

2.2.2.3 แฟกเตอร์การพันขดลวด

กำหนดให้

$$K_w = K_d \times K_p \quad (2.40)$$

เมื่อ

K_w : แฟกเตอร์การพันขดลวด

K_d : ดิสทริบิวชันแฟกเตอร์

K_p : พิซแฟกเตอร์

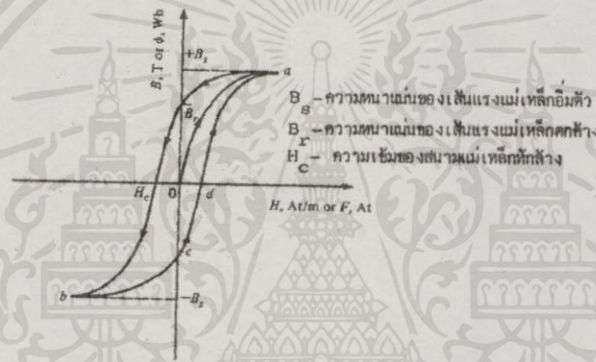
2.3 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรแม่เหล็ก

ในปัจจุบันวงจรแม่เหล็กเป็นตัวกลางสำคัญในการแปลงรูปพลังงานหรือส่งผ่านพลังงาน โดยอาศัยสนามแม่เหล็ก แต่พลังงานที่ส่งผ่านบางส่วนจะสูญเสียไปในวงจรแม่เหล็กโดยการสูญเสียในวงจรแม่เหล็กสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ [4,7,12,13,16]

2.3.1 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส

เส้นโค้งการเกิดอำนาจแม่เหล็กดังรูปที่ 2.16 ได้จากการเพิ่มความเข้มแม่เหล็กขึ้นตลอดเวลา ถ้าทำการลดความเข้มสนามแม่เหล็กลงพบว่าแกนเหล็กจะมีความต้านทานลดลงอำนาจแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจะไม่ลดลงในแนวเดียวกับที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณารูปที่ 2.16 ถ้า H เพิ่มจากศูนย์ เป็น H_a จะทำให้ B เพิ่มตามแนว oa และเมื่อลด H จาก H_a เป็นศูนย์ B จะไม่ลดลงตามแนว oa แต่จะลดลงมาตามแนว ab และ B จะไม่เป็นศูนย์ทั้งที่ H เป็นศูนย์ ทั้งนี้สาเหตุเพราะ โดเมนส่วนใหญ่ของวัสดุแม่เหล็กยังคงเรียงตัวกันในแนวเดียวกับ H ที่เคยป้อนทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กอ่อนขึ้น ค่า B ที่เหลือเมื่อ H เป็นศูนย์เรียกว่า ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (Residual Flux Density) ซึ่งมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอำนาจแม่

เหล็ก โดยความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างสูงสุดเรียกว่าสถานะดำรงสภาพ (Retentivity) และสถานะนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ H ทำให้เกิดการอิ่มตัวของวัสดุแม่เหล็ก ความเข้มสนามแม่เหล็กที่สามารถทำให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างมีค่าเท่ากับศูนย์เรียกว่าแรง โคเออซิฟ (Coercive Force) ซึ่งแรงโคเออซิฟที่มีค่าสูงสุดเรียกว่า โคเออซิวิตี (Coercivity) โดยสถานะดำรงสภาพและ โคเออซิวิตีมีความสำคัญสำหรับแม่เหล็กถาวรอย่างมากในวงจรแม่เหล็กที่มีการป้อนความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีฟังก์ชันรายคาบ (Periodic Function) โดย H เปลี่ยนค่าอยู่ระหว่างบวกและลบตลอด ในกรณีนี้ความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H จะได้ดังรูป 2.16 ซึ่งเรียกว่า วงฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loop) โดยในการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กในแต่ละรอบจะมีค่าเท่ากับพื้นที่ภายในลูป (loop) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าของ B และชนิดของสารแม่เหล็ก



รูปที่ 2.16 วงฮิสเทอรีซิส

ดังนั้นค่าของการสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กที่ความถี่ f รอบต่อวินาที ค่าความสูญเสียฮิสเทอรีซิสต่อหน่วยปริมาตร P_h จะมีค่าเท่ากับ

$$P_h = f \oint H \cdot dB \tag{2.41}$$

นอกจากนี้ยังมีสมการเอ็มไพริคัล (Empiric Equation) ที่ใช้ในการคำนวณค่าความสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิสต่อหน่วยปริมาตรได้อีก

$$P_h = K_h f (B_{max})^x \tag{2.42}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ P_h : การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส

K_h : ค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็กที่ทำการทดสอบ

- f : ความถี่ไฟฟ้า
 B_{\max} : ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด
 x : ค่าดัชนีสไตน์เมทซ์ (steinmetz 's Index) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.5 โดยทั่วไปจะใช้ค่า x นี้ ประมาณ 1.6

2.3.2 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

ในวัสดุแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความเข้มสนามแม่เหล็กโดยกฎของฟาราเดย์จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวัสดุแม่เหล็กนั้น ซึ่งจะเกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ในวัสดุแม่เหล็กทำให้เกิดการสูญเสียในรูปของความร้อน โดยสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.17 ดังนั้นการสูญเสียกระแสไหลวนต่อปริมาตร[12,13,16]

$$P_e = \frac{\pi^2 \tau^2 f^2 B_{\max}^2}{6G} \quad (2.43)$$

- เมื่อ P_e : การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน
 G : สภาพความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็ก
 τ : ความหนาของวัสดุแม่เหล็ก
 กำหนด $K_e = \frac{\pi^2}{6G}$: ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับเนื้อสารที่นำมาทำแกนเหล็ก
 ดังนั้น

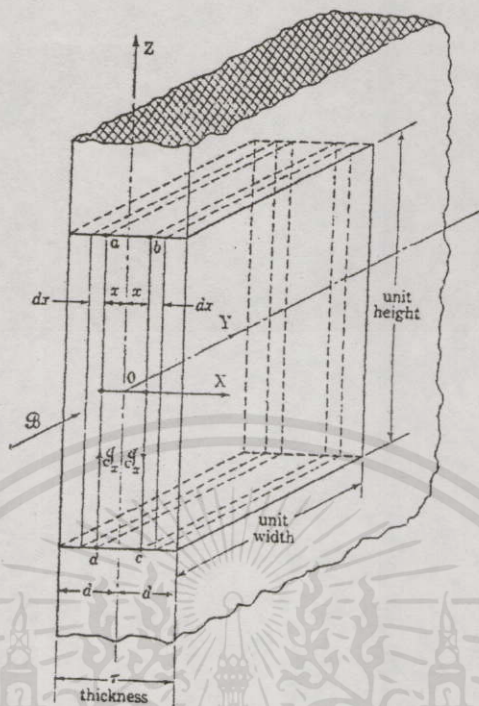
$$P_e = K_e f^2 \tau^2 B_{\max}^2 \quad (2.44)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2.42) และ (2.44) สามารถทราบค่าโดยประมาณของการสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในแกนเหล็กได้จากสมการที่ (2.45)

$$P_c = P_h + P_e \quad (2.45)$$

- เมื่อ P_c : การสูญเสียภายในแกนเหล็ก

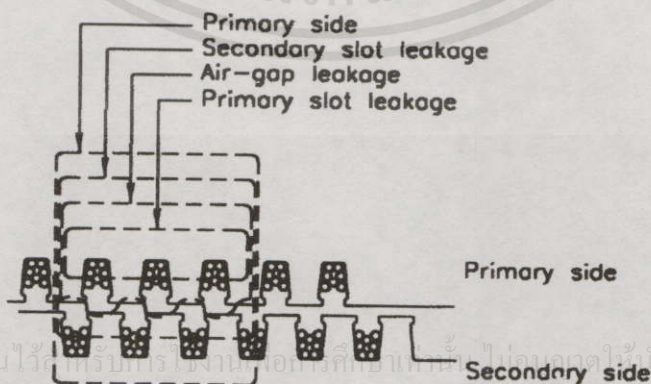
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 กระแสไหลวนภายในแกนเหล็ก

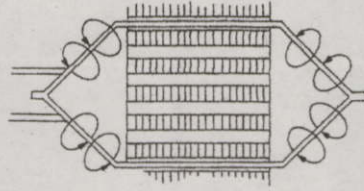
2.4 ส่วนประกอบของลิกเกจรีแอกเตนซ์

เนื่องจากหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้าจากระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสนั้นอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ในแนวระนาบ เมื่อพิจารณาโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.18 , 2.19 ลิกเกจรีแอกเตนซ์ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบด้วย[11,12]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้รับบริการเฉพาะเอกสารที่ขอไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.18 ลิกเกจฟลักซ์ภายในหม้อแปลงไฟฟ้า



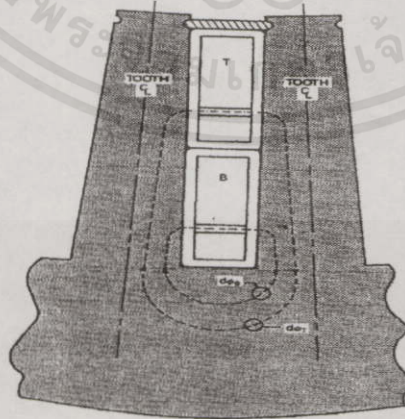
รูปที่ 2.19 ลีตเกจฟลักซ์ส่วนปลายของขดลวด

1. ลีตเกจรีแอกแตนซ์ของร่องสลีตทางด้านปฐมภูมิ (primary – slot leakage reactance)
2. ลีตเกจรีแอกแตนซ์ของร่องสลีตทางด้านทุติยภูมิ (secondary – slot leakage reactance)
3. ลีตเกจรีแอกแตนซ์ส่วนปลายของขดลวด (End turn leakage reactance)
4. ดิฟเฟอเรนเชียลลีตเกจรีแอกแตนซ์ (Differential leakage reactance) หรือ ลีตเกจรีแอกแตนซ์ของช่องอากาศ (Air – gap leakage reactance)

โดยส่วนประกอบของรีแอกแตนซ์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

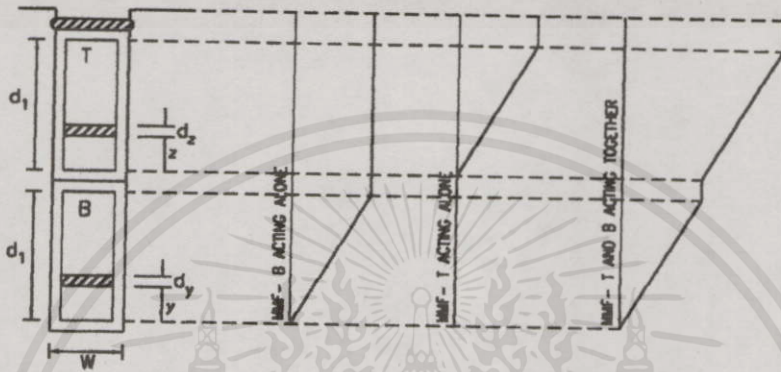
2.4.1 ลีตเกจรีแอกแตนซ์ของร่องสลีตทางด้านปฐมภูมิ เมื่อร่องสลีตรูปสี่เหลี่ยม (primary – slot leakage reactance of a rectangular slot)

ในการพิจารณาลีตเกจรีแอกแตนซ์ของร่องสลีตนั้นจะพิจารณาจากรูปที่ 2.20 โดยในร่องสลีตจะประกอบด้วยขดลวด T และ B ทางเดินของลีตเกจฟลักซ์จะผ่านทั้งสองส่วนคือด้านข้างและด้านบน ลีตเกจรีแอกแตนซ์ของร่องสลีตทางด้านปฐมภูมิสามารถพิจารณาได้จาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ารูปที่ 2.20 ลีตเกจฟลักซ์ของร่องสลีต

ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กตามขวางของร่องสลีท ซึ่งมีการเหนี่ยวนำกับร่องสลีทดังในรูปที่ 2.20 และรูปที่ 2.21 ซึ่งแสดงลักษณะความลึกและความกว้างโดยทั่วไปของร่องสลีท สำหรับการพิจารณาขดลวด B ที่อยู่ด้านล่างดังรูปที่ 2.21 ความกว้าง dy และวางในแนว y ในหน่วยความยาวของร่องสลีทที่พิจารณาจากพื้นที่หน้าตัดตามขวางโดยการเพิ่มขึ้นของแนวทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่จุด y ดังสมการที่ (2.46)[12]



รูปที่ 2.21 การกระจายตามขวางของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวดในร่องสลีท

$$dA = dy \tag{2.46}$$

ค่าความซึมซาบแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับวัสดุในร่องสลีท โดยสมมติอัตราส่วนที่ไม่มีขอบเขต (infimite) ความยาวของแนวทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำกับร่องสลีทเท่ากับ ความกว้างของร่องสลีท (w) ดังนั้นความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นจากลิกเกจฟลักซ์ที่จุด y

$$dB = \mu H = \frac{4\pi(NI)_y}{10^7 w} \tag{2.47}$$

เมื่อ

$(NI)_y$: แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่กระทำตามขวางของร่องสลีทที่จุด y

w : ความยาวของแนวทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกแรงเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับแม่เหล็กกระทำ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คั้งนั้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่จุด y

$$(NI)_y = \frac{(N_c I_t)_y}{d_1} \quad (2.48)$$

- เมื่อ N_c : จำนวนรอบต่อขดลวด
 I_t : กระแสในตัวนำ
 $N_c I_t$: ampere - turns ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สร้างในแต่ละขดลวด
 d_1 : ระยะความลึกของขดลวด

แทนสมการ (2.48) ลงในสมการ (2.47) จะได้

$$dB = \frac{4\pi}{10^7} \frac{y}{w d_1} (N_c I_t) \quad (2.49)$$

นำสมการ (2.49) คูณกับสมการ (2.46) ทำให้ทราบถึงเส้นแรงแม่เหล็ก ($d\phi$) ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับลวดตัวนำเส้นเล็ก ๆ

$$d\phi = \frac{4\pi}{10^7} \frac{y}{w d_1} (N_c I_t) dy \quad (2.50)$$

ในรูปแบบทั่ว ๆ ไปของลิกเกจรีแอกแตนซ์

$$L = \frac{N\phi}{I} \quad (2.51)$$

- เมื่อ N : จำนวนรอบที่เหนี่ยวนำโดยลิกเกจฟลักซ์ (leakage Flux)
 I : I_t กระแสที่ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กคงที่

จำนวนที่เพิ่มขึ้นของลิกเกจอินดักแตนซ์ (leakage inductance) มีความเกี่ยวข้องกับจำนวนที่เพิ่มขึ้นของลิกเกจฟลักซ์ (leakage Flux) ดังในสมการ 2.52 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$dL = N \frac{4\pi}{10^7} \frac{y}{w d_1} N_c dy \quad (2.52)$$

เมื่อ dL : จำนวนที่เพิ่มขึ้นของลิกเกจฟลักซ์

กำหนดความหนาแน่นกระแสที่กระจายในตัวนำมีรูปแบบเดียวกัน จำนวนรอบของตัวนำที่ถูกเหนี่ยวนำโดยจำนวนที่เพิ่มขึ้นของลิกเกจฟลักซ์ ($d\phi$) ที่จุด y

$$N = \frac{y}{d_1} N_c \quad (2.53)$$

แทนสมการ (2.53) ลงในสมการ (2.52) จำนวนที่เพิ่มขึ้นของลิกเกจอินดักแตนซ์ของขดลวด B

$$dL_B = \frac{4\pi}{10^7 w} \left(\frac{y}{d_1} \right)^2 N_c^2 dy \quad (2.54)$$

อินทิเกรตจาก $y=0$ ถึง $y=d_1$ จะได้

$$L_B = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w d_1^2} \int_0^{d_1} y^2 dy = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w d_1^2} \frac{d_1^3}{3} \quad (2.55)$$

จัดรูปแบบสมการ (2.55) ใหม่ จะได้

$$L_B = \frac{4\pi N_c^2}{10^7} \frac{d_1}{3w} \quad (2.56)$$

เส้นแรงแม่เหล็กจะมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจากด้านข้างขดลวด B จะคงที่สำหรับระยะห่างจากด้านบนของตัวนำด้านซ้ายของขดลวด B ถึงด้านบนของร่องสล๊อท (พิจารณาได้จากรูปที่ 2.21) ดังนั้น dL เป็นฟังก์ชันของ dy เพียงอย่างเดียว

$$dL_B' = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w} dy \quad (2.57)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

อินทิเกรตจาก $y=d_1$ ถึง $y=2d_1+d_2+d_3=$ จะได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องนอกที่มิได้ระบุดังกล่าว เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_B' = \frac{4\pi N_c^2 B}{10^7 w} \int_{d_1}^B dy = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w} (d_1 + d_2 + d_3) \quad (2.58)$$

ดังนั้นผลรวมของ self leakage inductance (total self – leakage inductance) ของด้านข้างของขดลวด B เท่ากับผลรวมของสมการ (2.56) และ (2.58) หรือ

$$L_{BS} = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w} \left(\frac{4}{3} d_1 + d_2 + d_3 \right) \quad (2.59)$$

ผลรวมของ self – leakage inductance (total self – leakage inductance) ด้านบนของขดลวด T ดังรูปที่ 2.21 สามารถสรุปโดยใช้วิธีที่คล้ายคลึงกัน เพราะฉะนั้นอินทิกรัลที่เพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง dz ที่ระยะห่าง z ของส่วนที่อยู่ด้านล่างของตัวนำขดลวด T

$$dL_T = \frac{4\pi}{10^7 w} \left(\frac{z}{d_1} \right)^2 N_c^2 dz \quad (2.60)$$

อินทิเกรตจาก $z = 0$ ถึง $z = d_1$

$$L_T = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w d_1^2} \int_0^{d_1} z^2 dz = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w d_1^2} \frac{d_1^3}{3} \quad (2.61)$$

หรือ

$$L_T = \frac{4\pi N_c^2 d_1}{10^7 \cdot 3w} \quad (2.62)$$

เส้นแรงแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวด T จะลงที่จากด้านบนของตัวนำขดลวด T ถึงด้านบนของร่องสลีท (พิจารณาจากรูปที่ 2.21) สำหรับ dL เป็นฟังก์ชัน dz เพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$dL_T = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w} dz \quad (2.63)$$

อินทิเกรตจาก $z = d_1$ ถึง $z = d_1 + d_3$ จะได้

$$L_T' = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w} \int_{d_1}^{d_1+d_3} dz = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w} (d_3) \quad (2.64)$$

ผลรวมของ self - leakage inductance (total self - leakage inductance) ด้านบนของขดลวด T เท่ากับผลรวมของสมการ (2.62) และ (2.64) หรือ

$$L_{TS} = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w} \left(\frac{d_1}{3} + d_3 \right) \quad (2.65)$$

เป็นธรรมดาเมื่อวงจรทั้งสองมีการเหนี่ยวนำกัน มีขบวนการอินดักแตนซ์ (M_c) ระหว่างขดลวดด้านล่างและด้านบนของขดลวด เมื่อพิจารณาเส้นแรงแม่เหล็กข้างในที่เพิ่มขึ้นโดยลวดตัวนำเส้นเล็กๆ (filament, dz) ที่อยู่ด้านบนของขดลวด T โดยกระแสจากขดลวด B ด้านล่าง โดยเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ

$$d\phi_m = \frac{4\pi N_c I_t}{10^7 w} dz \quad (2.66)$$

และเหนี่ยวนำ $(z/d_1)N_c$ ตัวนำของขดลวด T ดังนั้นมีขบวนการอินดักแตนซ์

$$dM_c = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w d_1} z dz \quad (2.67)$$

อินทิเกรตจาก $z = 0$ ถึง $z = d_1$ จะได้

$$M_c = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w d_1} \int_0^{d_1} z dz = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w d_1} \frac{d_1^2}{2} \quad (2.68)$$

หรือ

$$M_c = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w} \frac{d_1}{2} \quad (2.69)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น เส้นแรงแม่เหล็กจากด้านบนของขดลวด T ถึงด้านบนของร่องสล็อต โดยกระแสในขดลวด B ที่อยู่ด้านล่างจะคงที่และเป็นความสัมพันธ์กันกับฟังก์ชัน dz เพียงอย่างเดียว

$$dM_c' = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w} dz \quad (2.70)$$

อินทิเกรตจาก $z = d_1$ ถึง $z = d_1 + d_3$ จะได้

$$M_c' = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w} \int_{d_1}^{d_1+d_3} dz = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w} d_3 \quad (2.71)$$

และผลรวมของมิวชวลอินดักแตนซ์ (L_M) ด้านบนของขดลวด T จากกระแสของขดลวด B ซึ่งอยู่ด้านล่างมีค่าเท่ากับผลรวมของสมการ (2.69) และ (2.71) สำหรับแบบ Full - Pitched หรือ

$$L_M = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w} \left(\frac{d_1}{2} + d_3 \right) \quad (2.72)$$

มิวชวลอินดักแตนซ์ด้านล่างของขดลวด B โดยกระแสที่อยู่ด้านบนของขดลวด T เท่ากับ L_M ซึ่งสามารถแสดงได้จากการพิจารณาผลรวมของมิวชวลอินดักแตนซ์ทั้งหมดในร่องสลีทเท่ากับ $2L_M$ สำหรับการพันขดลวดแบบ Full - Pitched และโดยทั่วไปการพันขดลวดแบบ Fractional - Pitched มีการแทนขดลวดในแต่ละเฟสระหว่างกระแสที่อยู่ด้านล่างของขดลวดและกระแสที่อยู่ด้านบนของขดลวด ผลรวมของมิวชวลรีแอกแตนซ์ระหว่างขดลวด 2 ชุดในร่องสลีท L_{MT} มีค่าเท่ากับ

$$L_{MT} = \frac{4\pi N_c^2}{10^7 w} \left(\frac{d_1}{2} + d_3 \right) \cdot 2 \cos \theta_c \quad (2.73)$$

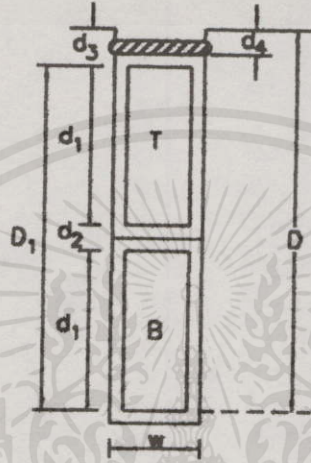
ผลรวมของ self - inductance ของหนึ่งสลีทเท่ากับผลรวมของ self - inductance ด้านบนของขดลวด (L_{BS}), self - inductance ด้านบนของขดลวด (L_{TS}) และผลรวมของมิวชวลอินดักแตนซ์ (total mutual inductance) ระหว่างขดลวดทั้ง 2 ชุด หรือ

$$L = L_{BS} + L_{TS} + L_{MT} \quad (2.74)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยและสงวนสิทธิ์ในตัวเอง ขอสงวนสิทธิ์ในการนำไปใช้แทนสมการ (2.59), (2.65) และ (2.73) ลงในสมการ (2.74) และจัดสมการใหม่จะได้

$$L = \frac{4\pi N_c^2}{10^7} \left[\frac{4d_1}{3w} + \frac{d_2}{w} + \frac{d_3}{w} + \frac{d_1}{3w} + \frac{d_3}{w} + 2 \left(\frac{d_1}{2w} + \frac{d_3}{w} \right) \cos \theta_c \right] \quad (2.75)$$

ระยะห่างของแนวตั้งร่องสลีท d_1 แสดงดังรูป 2.21 แม้ว่าสมการในการคำนวณรีแอกแตนซ์ (Reactance) สามารถเข้าใจได้ง่ายโดยในตัวอย่างได้มีการเปลี่ยนสัญลักษณ์ $2d_1 + d_2$ ดังแสดงในรูป 2.22



รูปที่ 2.22 รูปร่างสี่เหลี่ยมของร่องสลีท

ที่เป็นเช่นนี้ การเปลี่ยนสัญลักษณ์จะพิจารณาจาก D_1 ลบด้วยลักษณะร่องสลีท d_4 และแนวตั้งของฉนวนมาเป็นข้อเท็จจริงในการพิจารณาจากลักษณะของร่องสลีทโดยแทนค่าของ D_1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$D_1 = 2d_1 + d_2 \quad (2.76)$$

นำค่า D_1 แทนลงในสมการ (2.75) ทำให้สามารถเข้าใจได้ง่ายดังสมการที่ (2.77)

$$L = \frac{4\pi N_c^2}{10^7} \left[\frac{2d_3}{w} (1 + \cos \theta_c) + \frac{D_1 - d_2}{w} \frac{5 + 3 \cos \theta_c}{6} + \frac{d_2}{w} \right] \quad (2.77)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ (2.78) ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ (2.78) ลงในสมการ (2.77) จะได้

$$L = \frac{4\pi N_c^2}{10^7} \left[4K_M \left(\frac{d_3}{w} + \frac{D_1}{w} \right) + \frac{D_1}{3w} (1 - K_M) - \frac{d_2}{w} \left(K_M - \frac{2}{3} \right) \right] \quad (2.79)$$

สมการ (2.79) แสดงผลรวมของอินดักแตนซ์ของหน่วยความยาวร่องสลิตและจำนวนรอบต่อขดลวด (N_c) ดังนั้นการแปลงสมการลิกเกจรีแอกแตนซ์ของร่องสลิตทสเตเตอร์ต่อเฟส สามารถทำได้โดย

- 1) คูณด้วยจำนวนร่องสลิตต่อเฟส (N_1 / cq)
- 2) จำนวนรอบต่อขดลวด (N_c) และจำนวนรอบต่อเฟส (N_{st}) เมื่อ $N_c = N_{st} qc / N_1$
- 3) คูณด้วย $\omega = 2\pi f$ เมื่อต้องการแปลงอินดักแตนซ์ (inductance, L) เป็นรีแอกแตนซ์
- 4) คูณด้วยจำนวนวงจรไฟฟ้าที่ขนานกัน ($1/c$)
- 5) คูณด้วยความยาวร่องสลิตหรือความยาวแกนเหล็ก (l_c)

ซึ่งเป็นหลัก 5 ข้อที่ใช้ปฏิบัติ ดังนั้นแฟคเตอร์ในสมการ (2.79) สามารถหาได้จาก

$$X_{sl} = \frac{4\pi}{10^7} l_c \frac{N_1}{cq} \left(\frac{N_{st} qc}{N_1} \right)^2 2\pi f \frac{1}{c} = \frac{8\pi^2 f l_c N_{st}^2 q}{10^7 N_1} \quad (2.80)$$

และสมการสำหรับลิกเกจรีแอกแตนซ์ของร่องสลิตทางด้านปฐมภูมิสามารถหาได้จาก

$$X_{sl} = \frac{8\pi^2 f l_c N_{st}^2 q}{10^7 N_1} \left[4K_M \left(\frac{d_3}{w} + \frac{D_1}{3w} \right) + \frac{D_1}{3w} (1 - K_M) - \frac{d_2}{w} \left(K_M - \frac{2}{3} \right) \right] \quad (2.81)$$

จากสมการที่ (2.81) สามารถเขียนได้

$$X_{sl} = \frac{32\pi^2 f l_c N_{st}^2 q}{10^7 N_1} \left[K_M \left(\frac{d_3}{w} + \frac{D_1}{w} \right) + \frac{D_1}{12w} (1 - K_M) - \frac{d_2}{4w} \left(K_M - \frac{2}{3} \right) \right] \quad (2.82)$$

สิ่งที่มีผล คือ อัตราส่วนของ D_1 , d_2 และ d_3 ไปจนถึง w ซึ่งประกอบใน (2.82) เรียกว่า อัตราส่วนของสภาพในการเป็นดำน้าของแม่เหล็ก (permeance ratios) เพราะว่อัตราส่วนของความลึกของร่องสลิต (slot dept) ต่อความกว้างของร่องสลิต (slot width) ของหน่วยความยาวของร่องสลิตเท่ากับอัตราส่วนของพื้นที่ตามขวาง (cross-sectional area) ที่เป็นทางเดินของ

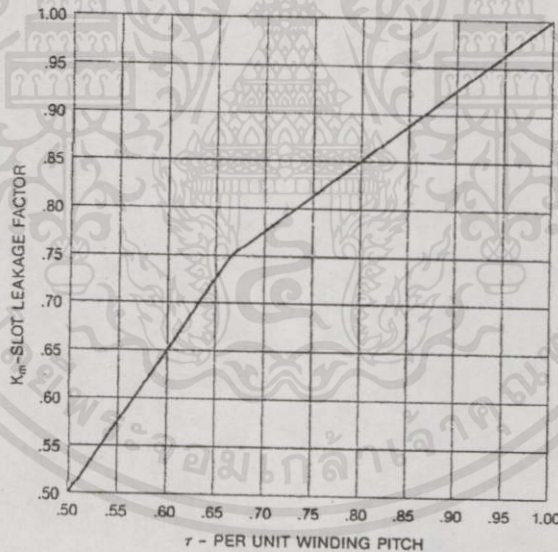
ลิกเกจแฟกซ์ ซึ่งจะเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมของสภาพในการเป็นตัวนำของแม่เหล็ก โดยสรุปอัตราส่วนของสภาพในการเป็นตัวนำของแม่เหล็ก (Permeance ratios) ในสมการที่ (2.83) เพียง 2 ส่วน และผลลัพธ์แสดงออกมาเป็นอัตราส่วนของสภาพในการเป็นตัวนำของแม่เหล็ก(Permeance ratios) ของร่องสล็อดรูปสี่เหลี่ยมคังรูปที่ 2.22

$$P_{sl} = K_M \left(\frac{d_3}{w} + \frac{D_1}{3w} \right) \tag{2.83}$$

และลิกเกจรี แอกแตนซ์ของร่องสล็อดมีค่า

$$X_{sl} = \frac{32\pi^2 f_l N_{sl}^2 q}{10^7 N_1} \left[K_M \left(\frac{d_3}{w} + \frac{D_1}{3w} \right) \right] \tag{2.84}$$

สำหรับค่าของ K_M สามารถพิจารณาจากรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะพิชของการพันขดลวดและสล็อดลิกเกจแฟคเตอร์

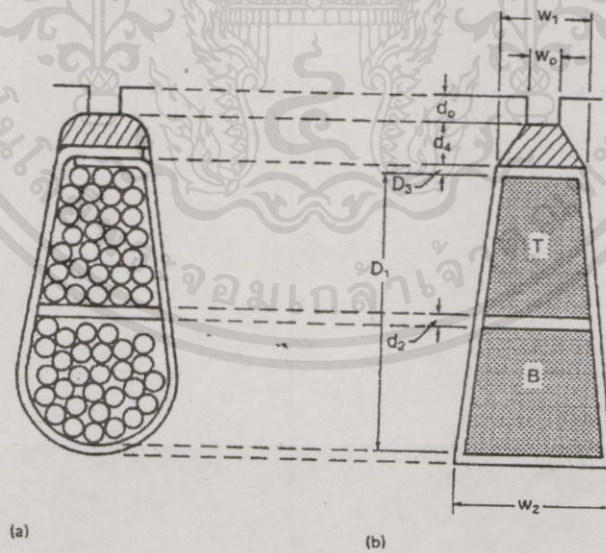
สมการที่ (2.85) ได้มาจากระบบ MKS โดยการแปลงให้อยู่ในหน่วยนิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีแบบและเผยแพร่เอกสารทุกครั้งที่มีการใช้ (2.85) ไปใช้

$$X_{sl} = \frac{8.02 f_l N_{sl}^2 q}{10^7 N_1} \left[K_M \left(\frac{d_3}{w} + \frac{D_1}{3w_1} \right) \right]$$

2.4.2 ลีเกจรีแอกแตนซ์ของร่องสล้อททางด้านปฐมภูมิเมื่อร่องสล้อทไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยม (primary – slot leakage reactance of a nonrectangular slot)

ลีเกจรีแอกแตนซ์ของร่องสล้อทรูปสี่เหลี่ยมสามารถใช้สมการทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์ได้ถูกต้อง โดยพิจารณาจากการวางสุมขดลวดในร่องสล้อท สิ่งที่เห็นได้ชัดคือโดยทั่วไปจะใช้ร่องสล้อทแบบกึ่งปิด โดยรูปร่างของร่องสล้อทได้มาจากการพยายามให้กระแสในช่องว่างร่องสล้อทสูงสุด (maximize current – carrying space) และพื้นที่ตัดขวาง (cross-sectional area) เป็นซี่ ๆ ซึ่งเป็นทางเดินของมิววลฟลักซ์ ดังนั้นแต่ละร่องสล้อทไม่จำเป็นต้องขนานกันและเอียงเข้าหากัน และรัศมีที่ใช้ในขอบนอกของร่องสล้อทไม่มีผลต่อตัวนำซึ่งแทรกเข้าไปในร่องสล้อทระหว่างการพันขดลวด สิ่งที่ยากลำบากคือไม่สามารถบอกถึงการใช้สมการ differential แสดงค่าให้ชัดเจนเหมือนของร่องสล้อทในสมการ (2.54) , (2.60) , (2.67) และ (2.70) สำหรับร่องสล้อทแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในการวิเคราะห์ได้หาค่าของลีเกจรีแอกแตนซ์ของร่องสล้อทโดยหาได้จากสมมติรูปร่างของร่องสล้อทเป็นรูปสามเหลี่ยมที่ไม่มียอด (truncated triangle) โดยทั้ง ๆ ที่ในความเป็นจริงอาจไม่มีความจำเป็นที่ต้องถูกต้องกับการสมมติรูปร่างร่องสล้อท วิธีการที่เหมาะสมในการสมมติร่องสล้อทนั้น โดยทั่วไปจะใช้ร่องสล้อทรูปสี่เหลี่ยมสำหรับการนำพากระแส (current – carrying) ส่วนหนึ่งของร่องสล้อทซึ่งเป็นไปตามความกว้าง (w_1) ทั้งนี้ต้องมีความเข้าใจในการวิเคราะห์รูปร่างร่องสล้อทรูปสี่เหลี่ยมเพื่อหาลีเกจรีแอกแตนซ์ของร่องสล้อทดังแสดงในรูป 2.24b



รูปที่ 2.24 a) รูปแบบของร่องสล้อท b) รูปแบบของร่องสล้อทจากการสุมเพื่อคำนวณรีแอกแตนซ์ง่ายขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ เช่น การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถพิจารณาค่าโดยประมาณของอัตราส่วนสภาพในการเป็นตัวนำวงจรแม่เหล็กของร่องสล๊อทแบบเปิดเท่ากับ d_0/w_0 อัตราส่วนสภาพในการเป็นตัวนำของวงจรแม่เหล็กของร่องสล๊อทส่วนหนึ่งที่มีลักษณะเป็นลิ้ม (wedge) มีค่าเท่ากับ $2d_4/(w_0+w_1)$ โดยค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ $(w_0+w_1)/2$ ซึ่งลึกลงไปผ่านตามความยาวอัตราส่วนสภาพในการเป็นตัวนำของวงจรแม่เหล็กในแนวตั้งของระยะห่างร่องสล๊อท D_3 จะเท่ากับ D_3/w_1 อัตราส่วนสภาพในการเป็นตัวนำของวงจรแม่เหล็กในแนวตั้งของระยะห่างร่องสล๊อท D_1 มีค่าโดยประมาณเท่ากับ $D_1/3w_1$ โดยพิจารณาจาก w_1 ซึ่งเป็นความกว้างของร่องสล๊อทตลอดระยะห่างร่องสล๊อท D_1 ความกว้างร่องสล๊อทที่มีประสิทธิภาพสามารถหาได้จาก $\sqrt{w_1 w_2}$ จากการพิจารณาอัตราส่วนสภาพในการเป็นตัวนำของวงจรแม่เหล็กของร่องสล๊อทแสดงดังรูป 2.24 b โดยมีค่าโดยประมาณเท่ากับ [12]

$$P_{sl} = K_M \left(\frac{d_0}{w_0} + \frac{2d_4}{w_0+w_1} + \frac{D_3}{w_1} + \frac{D_1}{3w_1} \right) \quad (2.86)$$

และลึกลงไปแกนแกนของร่องสล๊อท (slot-leakage reactance) เท่ากับ

$$X_{sl} = \frac{32\pi^2 f_c N_{st}^2 q}{10^7 N_1} \left[K_M \left(\frac{d_0}{w_0} + \frac{2d_4}{w_0+w_1} + \frac{D_3}{w_1} + \frac{D_1}{3w_1} \right) \right] \quad (2.87)$$

เมื่อใช้หน่วย MKS มีค่าเท่ากับ

$$X_{sl} = \frac{8.06 f_c N_{st}^2 q}{10^7 N_1} \left[K_M \left(\frac{d_0}{w_0} + \frac{2d_4}{w_0+w_1} + \frac{D_3}{w_1} + \frac{D_1}{3w_1} \right) \right] \quad (2.88)$$

เมื่อความกว้าง, ยาว และสูงของร่องสล๊อท อยู่ในหน่วยนิ้ว

2.4.3 ลึกลงไปแกนแกนของร่องสล๊อททางด้านทุติยภูมิเมื่อร่องสล๊อทรูปสี่เหลี่ยม

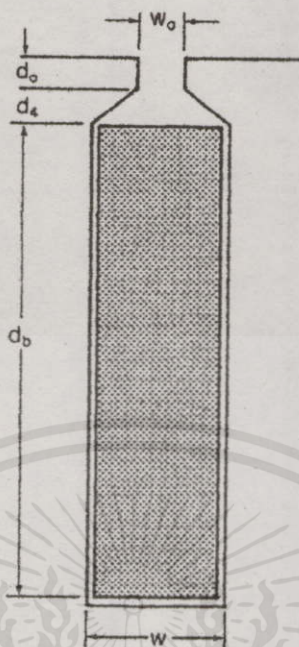
(secondary-slot leakage reactance of a rectangular slot)

ขดลวดที่อยู่ในร่องสล๊อทจะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (magnetomotive force)

ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดลึกลงไปผ่านตามแนวขวางของร่องสล๊อท เมื่อพิจารณารูปที่ 2.25 อัตรา

ส่วนสภาพในการเป็นตัวนำของวงจรแม่เหล็กของกระแสที่ไหลในแต่ละร่องสล๊อทเท่ากับ $d_0/3w$

และอีกส่วนหนึ่งในแนว d_0 และ d_4 เท่ากับ d_0/w_0 และ $2d_4/(w_0+w)$ ดังนั้น อัตราส่วนสภาพในการเป็นตัวนำของวงจรแม่เหล็ก [12]



รูปที่ 2.25 ลักษณะของสล้อททางด้านทฤษฎีรูปสี่เหลี่ยม

$$P_{s2} = \frac{d_b}{3w} + \frac{d_0}{w_0} + \frac{2d_4}{w_0 + w} \quad (2.89)$$

ในส่วนของลักษณะแอกแตนซ์ของร่องสล้อททางด้านทฤษฎีจะอ้างอิงจากทางด้าน
ปฐมภูมิดังรูปที่ 2.25

$$X_{s2} = \frac{32\pi^2 f_1 l_c N_s^2 q K_{p1}^2 K_{d1}^2}{10^7 N_2} \left(\frac{d_0}{w_0} + \frac{2d_4}{w_0 + w} + \frac{d_b}{3w} \right) \quad (2.90)$$

เมื่อร่องสล้อทใช้หน่วย MKS มีค่าเท่ากับ

$$X_{s2} = \frac{8.02 f_1 l_c N_s^2 q K_{p1}^2 K_{d1}^2}{10^7 N_2} \left(\frac{d_0}{w_0} + \frac{2d_4}{w_0 + w} + \frac{d_b}{3w} \right) \quad (2.91)$$

เมื่อความกว้าง, ยาว และสูง ของร่องสล้อท อยู่ในหน่วยนี้ นั่น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

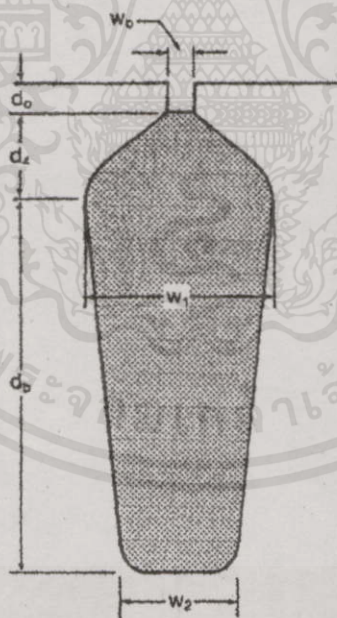
2.4.4 ลีทเกจแอกแตนซ์ของร่องสล๊อททางค้ำานทุคยภูมิเมื่อร่องสล๊อทไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยม (secondary – slot leakage reactance of a nonrectangular slot)

รูปร่างของสล๊อทดังรูป 2.26 จะเห็นว่าสามารถคำนวณอัตราส่วนสภาพในการเป็นตัวนำของวงจรแม่เหล็กได้อย่างชัดเจนโดยเฉพาะในส่วนของ d_b ของร่องสล๊อท ซึ่งสมมติส่วนของ d_b ในร่องสล๊อทรูปสี่เหลี่ยม โดยใช้ w_2 มีผลต่อความกว้าง d_b อัตราส่วนสภาพในการเป็นตัวนำของวงจรแม่เหล็กสำหรับร่องสล๊อทในรูปที่ 2.26 มีค่าเท่ากับ[12]

$$P_{s2} = \frac{d_0}{w_0} + \frac{2d_4}{w_0 + w_1} + \frac{d_b}{3w_2} \tag{2.92}$$

และลีทเกจแอกแตนซ์ของร่องสล๊อท (slot leakage reactance) เท่ากับ

$$X_{s2} = \frac{32\pi^2 f_l I_c N_{st}^2 q K_{p1}^2 K_{d1}^2 \left(\frac{d_0}{w_0} + \frac{2d_4}{w_0 + w_1} + \frac{d_b}{3w_2} \right)}{10^7 N_2} \tag{2.93}$$



รูปที่ 2.26 ลักษณะร่องสล๊อททางค้ำานทุคยภูมิเมื่อร่องสล๊อทไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยม

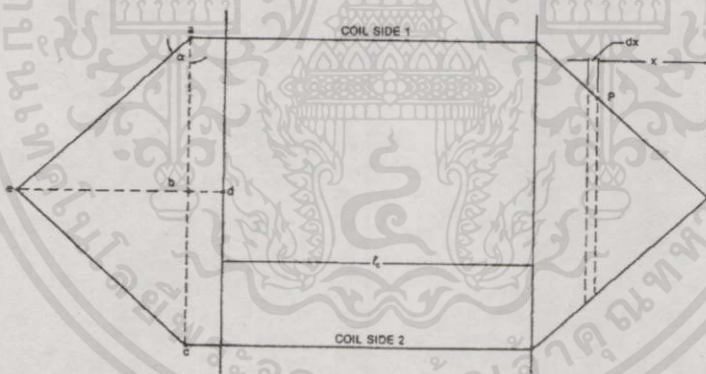
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 เมื่อร่องสล๊อทใช้หน่วย MKS มีค่าเท่ากับ
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_{s2} = \frac{8.02 f_l l_c N_{st}^2 q K_{pl}^2 K_{dl}^2}{10^7 N_2} \left(\frac{d_0}{w_0} + \frac{2d_4}{w_0 + w_1} + \frac{d_b}{3w_2} \right) \quad (2.96)$$

เมื่อความกว้าง , ยาวและสูงของร่องสลีทอยู่ในหน่วยนิ้ว

2.4.5 ลีทเกจรีแอกแตนซ์ของปลายขดลวด (End – turn leakage reactance)

สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงส่วนหนึ่งของขดลวดที่วางในร่องสลีท ซึ่งอยู่ภายนอกของแกนเหล็ก โดยเห็นได้จากภาพวาดดังแสดงในรูปที่ 2.27 ปลายสุดของขดลวดซึ่งยึดออกไปทั้งสองด้านจะคิดเป็น 50 % ของความยาวลวดทั้งหมด เส้นแรงแม่เหล็กที่หนีขดลวดไปบางส่วนที่ไม่ใช่มีวชวลฟลักซ์จะเรียกว่า end – turn leakage flux ทางเดินของลี้ทเกจฟลักซ์ (leakage flux) โดยรอบของตัวนำในส่วนปลายของขดลวดทำให้รีลักแตนซ์ (reluctance) ในอากาศสูง ด้านหนึ่งของขดลวดจะวางอยู่ด้านล่างของร่องสลีทและขดลวดอีกส่วนหนึ่งจะวางอยู่ด้านบนของร่องสลีท รัศมีของการเปลี่ยนแปลงจากด้านล่างถึงด้านบนปลายสุดส่วนด้านบนของขดลวดและขอบรอบจากร่องสลีทจนไปถึงด้านหนึ่งของขดลวดจะทำให้เกิดจุดตัดของขดลวดเป็นมุม α ส่วนประกอบของกระแส end – turn ที่สร้างสนามแม่เหล็กที่ไหลในส่วนขอบนอก (peripheral end – turn leakage field) การพิจารณาส่วนปลายทางด้านซ้ายมือจากรูปที่ 2.27 ระยะห่าง ac



รูปที่ 2.27 ลีทเกจรีแอกแตนซ์ปลายขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า

$$ac = \frac{\pi d r}{P} \quad (2.95)$$

โดยกำหนดให้จุด b แบ่งเส้น ac ระยะห่าง ab เท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$ab = \frac{ac}{2} = \frac{\pi d r}{2P} \quad (2.96)$$

และระยะ bc เท่ากับ

$$bc = \frac{\pi d \tau}{2P} \tan \alpha \quad (2.97)$$

ในการวิเคราะห์ Alger ได้สมมติระยะห่างของ dc โดยประมาณเท่ากับระยะ bc ผลรวมตามความยาวของส่วนปลาย (total axial length of the end – turn extension)

$$\text{ผลรวมของส่วนปลายซึ่งยื่นออก (total end - turn extension)} = \frac{\tau \pi d}{P} \tan \alpha \quad (2.98)$$

ดังนั้นรีแอกแตนซ์ส่วนปลายลวด (end – turn reactance) สามารถหาได้จาก

$$X_{ep} = \frac{32\pi^2 f l_c N_{si}^2 q}{10^7 N_1} \frac{\tau d N_1 K_d^2 \tan \alpha}{2P^2 l_c} \left[(0.317)\pi K_p^2 \right] \quad (2.99)$$

แฟคเตอร์การกระจาย K_d มีลักษณะเหมือนกับ end – turn ในการพันขดลวดในแกนเหล็กเนื่องจากกลุ่มขดลวดมีความกว้างเหมือนกัน โดย Alger สรุปการเปรียบเทียบตึกเกจของแกนเหล็ก ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับฮาร์โมนิกส์ (harmonic) โดย K_d มีค่าเท่ากับ 1 ระยะพิชแฟคเตอร์ (K_p) ตามความยาวของส่วนปลาย (end – turn) จะเปลี่ยนแปลงจากศูนย์ที่ปลายสุดโดยส่วนหนึ่งของแกนเหล็ก ดังนั้นลักษณะสำคัญของพิชแฟคเตอร์ที่มีคอรียแอกแตนซ์ของส่วนปลายจะเป็นค่าประเมินโดยแฟคเตอร์ $0.317\pi K_p^2$ เท่ากับ K_p^2 และในการประเมินค่าของฟังก์ชัน K_p^2 โดยอินทิเกรตไปตามความยาวส่วนปลายโดยพิชแฟคเตอร์ [12]

$$K_p = \sin \frac{\tau \pi}{2} \quad (2.100)$$

ถ้า x เป็นระยะห่างเล็ก ๆ ของจุด P ตามความยาวของส่วนปลายที่ไหลออกมาดังในรูป 2.27 พิชแฟคเตอร์ที่จุด P เท่ากับ

$$K_p' = \sin \frac{\tau \pi x}{2} \quad (2.101)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้การประเมินค่า K_p โดยอินทิเกรตไปตามส่วนปลายที่ไหลออกมา

$$\begin{aligned}
 F(\tau) &= \int_0^1 \sin^2 \frac{\tau\pi x}{2} dx = \frac{1}{2\pi\tau} \left[\tau\pi x - 2 \sin \frac{\tau\pi x}{2} \cos \frac{\tau\pi x}{2} \right]_0^1 \\
 &= \frac{1}{2\pi\tau} (\tau\pi - \sin \tau\pi)
 \end{aligned} \tag{2.102}$$

และจากสมการ (2.99) สามารถเขียนได้

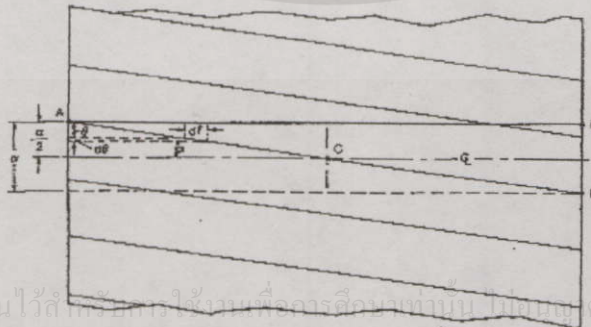
$$X_{ep} = \frac{32\pi^2 f l_c N_{st}^2 q}{10^7 N_1} \frac{\tau d N_1 \tan \alpha}{2 P^2 l_c} [F(\tau)] \tag{2.103}$$

2.4.6 ดิฟเฟอเรนเชียลลิกเกจรีแอกแตนซ์ (Differential leakage reactance)

ฮาร์โมนิกที่อยู่ในช่องว่างอากาศ (space - harmonic) ซึ่งมีการกระเพื่อมขึ้นลงตามช่วงเวลาของจำนวนขั้วแม่เหล็กโดยคลื่นมูลฐาน (fundamental wave) ซึ่งความถี่มูลฐานของแรงดันไฟฟ้า (fundamental frequency voltage) ในแต่ละฮาร์โมนิกที่เหนี่ยวนำขดลวดจะสร้างลิกเกจรีแอกแตนซ์เรียกว่าดิฟเฟอเรนเชียลลิกเกจรีแอกแตนซ์หรือลิกเกจรีแอกแตนซ์ของช่องว่างอากาศ ดังนั้นการลดผลของดิฟเฟอเรนเชียลลิกเกจรีแอกแตนซ์จะทำให้ฮาร์โมนิกในช่องว่างอากาศลดลง โดยทั่วไปจะนิยมพันขดลวดแบบพิเศษส่วน[11,12,]

2.4.7 สกิวลิกเกจรีแอกแตนซ์

จากรูปที่ 2.28 เส้นเฉียง AB แสดงให้เห็นถึงการวางเรียงแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิในแนวเอียง (Skewing) และที่จุด C คือจุดกึ่งกลางของแกนเหล็ก ที่จุด B จะมีมุม α เมื่อเทียบกับจุด A และที่จุด C จะมีมุม $\alpha/2$ เมื่อเทียบกับจุด A ถ้าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (E_b) ตลอดความยาวเมื่อไม่มีการทำสกิวอิงจากจุด A ถึงจุด D จำนวนแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้น (dE) ตลอดความยาว dl จะสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของมุม $d\theta$ ดังสมการที่ (2.104)[12]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษายานยนต์ ไม่แนะนำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.28 การทำสกิวอิงของหม้อแปลงไฟฟ้า

$$dE = \frac{E_b d\theta}{\alpha} \quad (2.104)$$

กำหนดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ในทิศทาง θ จำนวนแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (dE) จะมีมุม θ ซึ่งสอดคล้องกับจุด A ดังนั้นในการคำนวณผลรวมของแรงดันไฟฟ้าตามการทำสกีวอิ่งของแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิที่จุด C สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.105)

$$dE = \frac{E_b}{\alpha} \cos\left(\theta - \frac{\alpha}{2}\right) d\theta \quad (2.105)$$

และผลรวมของแรงดันไฟฟ้าจากจุด A ไปยังจุด B มีค่าดังสมการที่ (2.106) ถึง (2.108)

$$E = 2 \int_0^{\alpha/2} \frac{E_b}{\alpha} \cos\left(\theta - \frac{\alpha}{2}\right) d\theta \quad (2.106)$$

$$E = \frac{2E_b}{\alpha} \int_0^{\alpha/2} \left(\cos\theta \cos\frac{\alpha}{2} + \sin\theta \sin\frac{\alpha}{2} \right) d\theta \quad (2.107)$$

$$E = \frac{2E_b}{\alpha} \sin\frac{\alpha}{2} \quad (2.108)$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อไม่มีการทำสกีวอิ่ง เมื่อพิจารณาที่จุด AD จะเท่ากับ E_b Volts และเมื่อทำสกีวอิ่งที่จุด AB จะมีค่าเท่ากับ E / E_b ดังนั้นสกีวแฟกเตอร์สามารถทราบได้จากสมการที่ (2.109)

$$K_s = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\alpha/2} \quad (2.109)$$

สกีวลีกเกจรีแอกแตนซ์นั้นเกิดจากการเอียงแกนเหล็กซึ่งขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ของการวางเอียง (Skew Factor, K_s) โดยมีค่าเท่ากับสมการที่ (2.110)

$$X_{sk} = X_m (1 - K_s^2) \quad (2.110)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ X_{sk} : สกีวลีกเกจรีแอกแตนซ์

2.5 บทสรุป

สำหรับการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแปลงจากระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ในแนวระนาบ (Travelling Wave) สิ่งที่สำคัญที่สุดก่อนที่จะทำการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าคือการศึกษาทางด้านทฤษฎีซึ่งเนื้อหาของบทที่ 2 ประกอบด้วยทฤษฎีของสนามแม่เหล็กหมุนและสนามแม่เหล็กในแนวระนาบ, ลักษณะของการวางขดลวด, กำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรแม่เหล็ก, ส่วนประกอบของตึกเกอร์แอกแตนต์ ดังนั้นหากมีความรู้ทางด้านทฤษฎีที่เพียงพอจะทำให้สามารถออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม



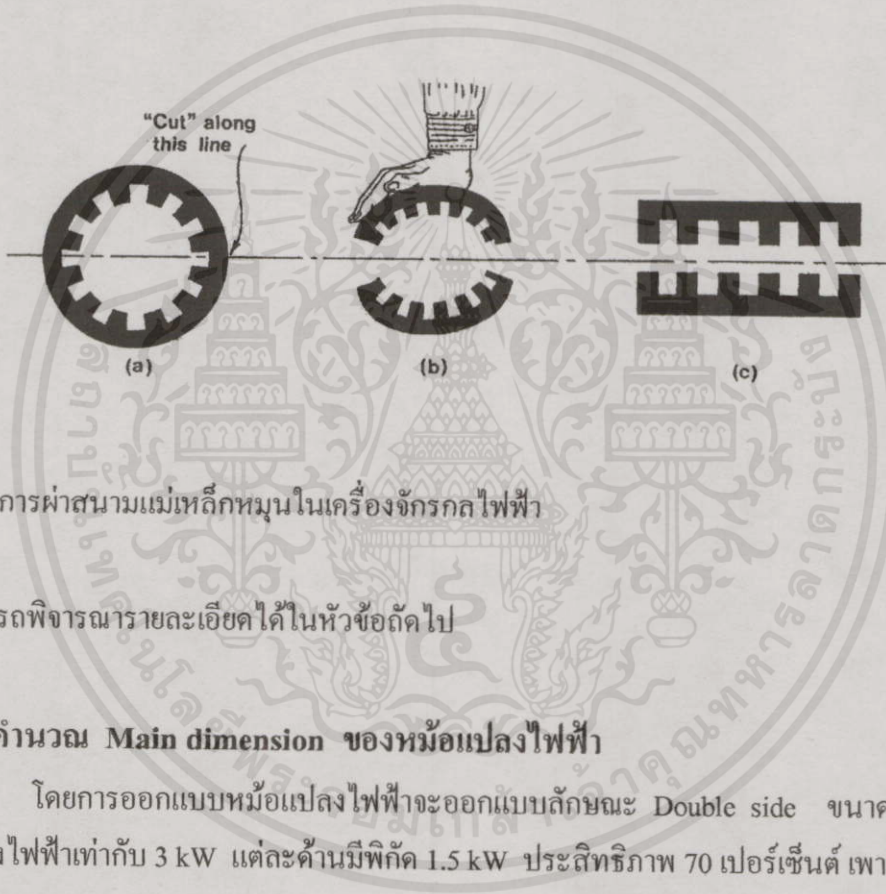
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า

3.1 บทนำ

สำหรับการออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสนั้น อาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แนวระนาบ (Travelling wave) ซึ่งได้มาจากการผ่าสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแล้วคลี่ออกมาดังรูป 3.1[1,15]



รูปที่ 3.1 การผ่าสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

โดยสามารถพิจารณารายละเอียดได้ในหัวข้อถัดไป

3.2 การคำนวณ Main dimension ของหม้อแปลงไฟฟ้า

โดยการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจะออกแบบลักษณะ Double side ขนาดพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าเท่ากับ 3 kW แต่ละด้านมีพิกัด 1.5 kW ประสิทธิภาพ 70 เปอร์เซ็นต์ เพาเวอร์แฟคเตอร์ 0.7

$$\begin{aligned} \text{ขนาดพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า (S)} &= \frac{P_o (kW)}{\eta \cdot \cos \theta} \\ &= \frac{3}{0.7 \times 0.7} \end{aligned} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในนามของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และต้องอ้างถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจะออกแบบโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Double side มีขนาดพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละด้าน 3.06 kVA สำหรับการคำนวณเพื่อหา Main dimension ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะอ้างอิงตามการคำนวณของเครื่องจักรกลไฟฟ้า[3,12,14]

$$D^2 L = \frac{kVA}{C_0 n_s} \quad (3.2)$$

- เมื่อ n_s : ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน
 C_0 : output coefficient
 D : เส้นผ่าศูนย์กลาง
 L : ความหนาของการเรียงแกนเหล็ก

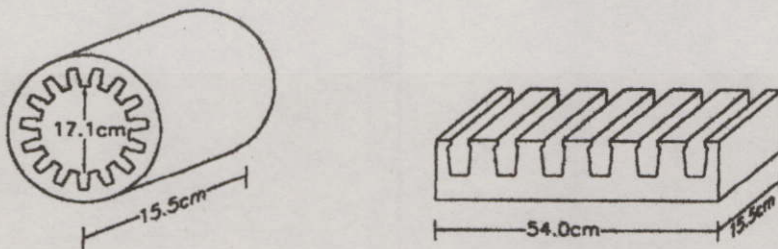
กำหนดความหนาของการเรียงแกนเหล็ก (L) = 15.5 cm = 0.155 m , เส้นผ่าศูนย์กลาง (D) = 0.171 m , $n_s = 50$ rev.s จากสมการ (3.2) สามารถคำนวณได้

$$C_0 = \frac{kVA}{D^2 L n_s}$$

$$= \frac{3.06}{(0.171)^2 \times 0.155 \times 50}$$

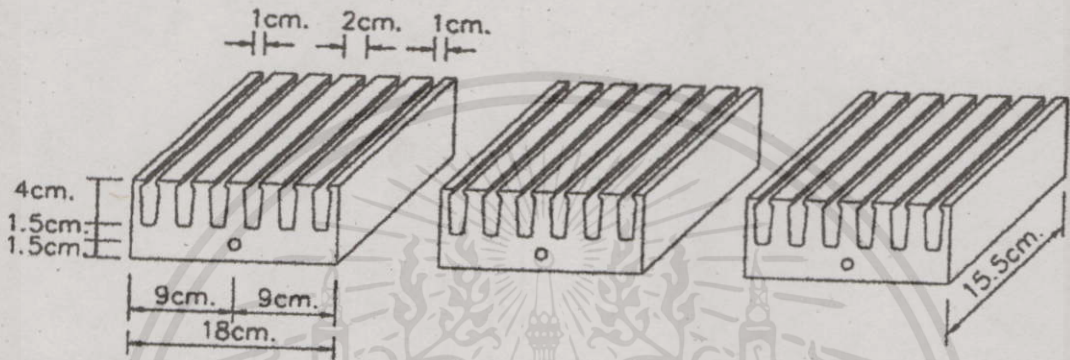
$$C_0 = 0.95$$

ดังนั้นเมื่อผ่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าแล้วคลี่ออกมาจะได้ดังรูป 3.2 (a) และ (b)



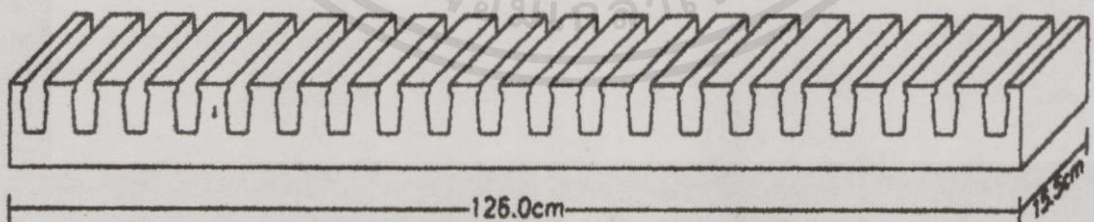
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ารูปที่ 3.2 (a) เครื่องจักรกลไฟฟ้า (b) หม้อแปลงไฟฟ้า อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 3.2 (b) จะได้แกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า แต่เนื่องจากการทำวิจัยที่ผ่านมาระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าไม่สมดุลเนื่องจากตำแหน่งของการวางขดลวด สำหรับแนวทางในการแก้ปัญหาจึงแบ่งแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าออกเป็น 3 ส่วน โดยมี Dimension โดยแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิในแต่ละส่วนมีจำนวนร่องสลีต 6 ร่องสลีต ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิ

ในส่วนของแกนเหล็กทางด้านทุติยภูมิจะมีรูปร่างเหมือนกับแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิ เพียงแต่มีความยาวของแกนเหล็กเท่ากับ 126 cm มีจำนวนร่องสลีต 42 ร่องสลีต ทั้งนี้ เนื่องจากเมื่อปรับเลื่อนแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมินั้น วงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีพื้นที่เท่ากันตลอดเมื่อมีการปรับแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แกนเหล็กทางด้านทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การคำนวณจำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ

จากสมการของ Faraday 's law สามารถหาการเหนี่ยวนำของแรงดันไฟฟ้าตามการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่เป็นแบบรูปคลื่นไซน์ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำจะเท่ากับ

$$E = 4.44 fNB_{\max} A.sfK_w \quad (3.3)$$

เมื่อ

E	:	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีหน่วยโวลต์
f	:	ความถี่ของระบบไฟฟ้ามีหน่วยเฮิรตซ์
N	:	จำนวนรอบต่อเฟสมีหน่วยรอบ
A	:	พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กมีหน่วยตารางเมตร
B_{\max}	:	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเทสลา
sf	:	แฟคเตอร์ของการเรียงแผ่นเหล็กมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8– 0.9
K_w	:	แฟคเตอร์ของการพันขดลวด

จากสมการที่ (3.3) สามารถคำนวณจำนวนรอบทางด้านปฐมภูมิ

$$N_1 = \frac{E}{4.44 fB_{\max} A.sfK_w} \quad (3.4)$$

จำนวนร่องสลิตทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ 6 ร่องสลิต

ความยาวของขั้วแม่เหล็กเท่ากับ 0.09 เมตร

ความหนาของการเรียงแผ่นเหล็กเท่ากับ 0.155 เมตร

พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กเท่ากับ $0.09 \times 0.155 = 0.01395$ ตารางเมตร

ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ 0.6 เทสลา

แฟคเตอร์ของการเรียงแผ่นเหล็กเท่ากับ 0.9

แฟคเตอร์ของการพันขดลวดเท่ากับ 1

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการ (3.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา 220v ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงแหล่งที่มาทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_1 = \frac{220}{4.44 \times 50 \times 0.6 \times 0.01395 \times 0.9 \times 1}$$

$$= 132 \text{ รอบต่อเฟส}$$

จำนวนรอบทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ 132 รอบต่อเฟส กำหนดจำนวนรอบทางด้านปฐมภูมิเท่ากับจำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิ ดังนั้นจำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิเท่ากับ 132 รอบ

3.4 การคำนวณกระแสทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ

สำหรับทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า จะต่อกับระบบแรงดันกระแสสลับสามเฟส ดังนั้นกระแสทางด้านปฐมภูมิต่อเฟสสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.5)

$$\text{กระแสทางด้านปฐมภูมิ } (I_p) = \frac{S}{3 \times V} \quad (3.5)$$

$$= \frac{3.06 \times 10^3}{3 \times 220}$$

$$\text{กระแสทางด้านปฐมภูมิ } (I_p) = 4.63 \text{ A/Ph}$$

จากการคำนวณสามารถคำนวณขนาดของกระแสทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ 4.63 A แต่เนื่องจากการทำวิจัยที่ผ่านมากกระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าไม่สมดุลเนื่องจากตำแหน่งของการวางขดลวด สำหรับแนวทางในการแก้ปัญหาจึงแบ่งแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าออกเป็น 3 ส่วน ดังนั้นกระแสทางด้านปฐมภูมิในแต่ละขดเท่ากับ 1.54 A เลือกใช้ลวดเบอร์ 21 SWG ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 0.84 ตารางมิลลิเมตร ในขณะที่เดียวกันสามารถคำนวณกระแสทางด้านทุติยภูมิได้จากสมการที่ (3.6)

$$\text{กระแสทางด้านทุติยภูมิ } (I_s) = \frac{S}{V} \quad (3.6)$$

$$= \frac{3.06 \times 10^3}{220}$$

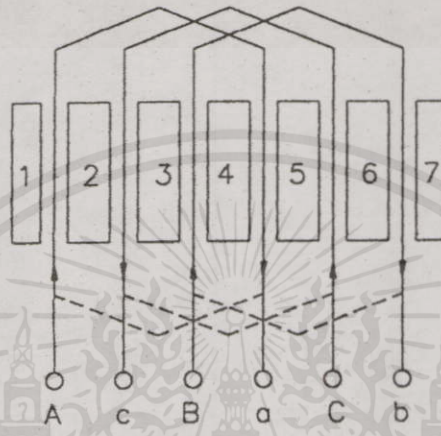
$$\text{กระแสทางด้านทุติยภูมิ } (I_s) = 13.9 \text{ A/Ph}$$

จากการคำนวณสามารถคำนวณขนาดของกระแสทางด้านทุติยภูมิเท่ากับ 13.9 A เลือกใช้ลวดเบอร์ 17 SWG ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 1.7 ตารางมิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การพันขดลวด

ในส่วนของการพันขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้านั้น จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจะพันสามเฟสแบบ Full Pitch ขดลวดทั้งสามชุดจะวางห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.5 ส่วนที่สองทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจะพันแบบหนึ่งเฟสดังรูปที่ 3.6[1,5,6,8,9]

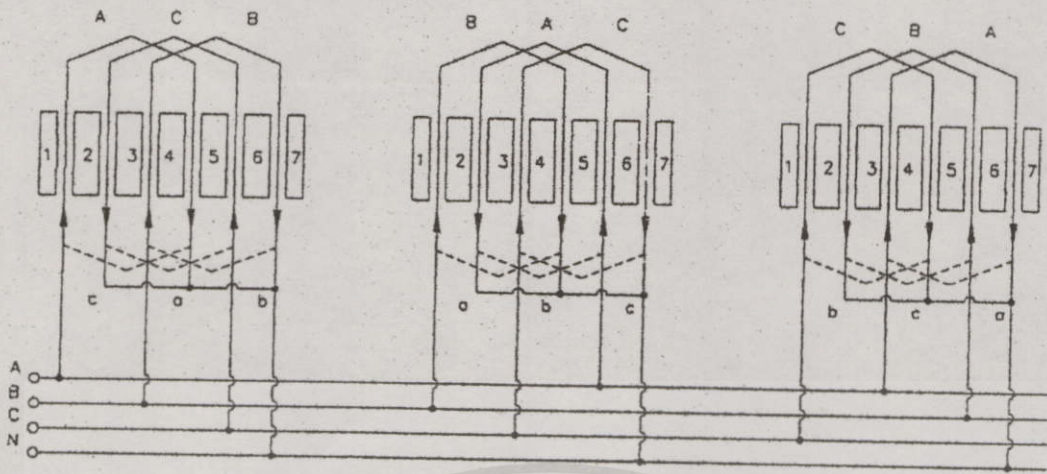


รูปที่ 3.5 การพันขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

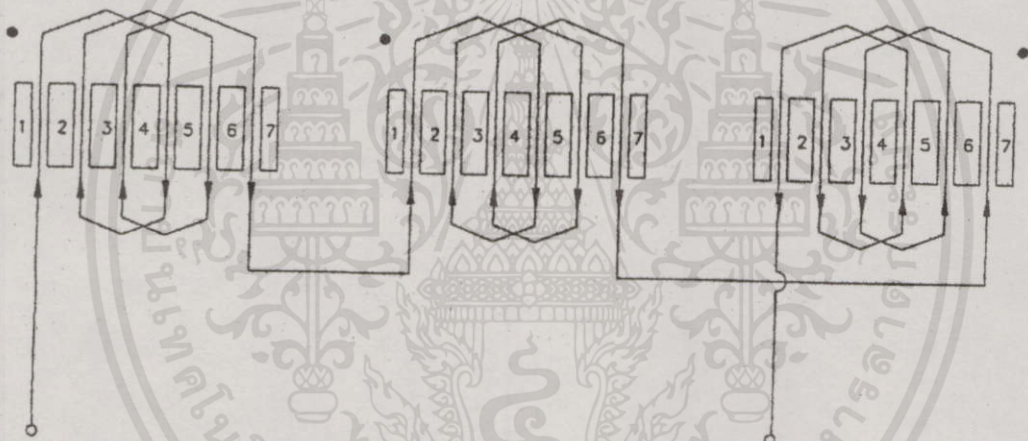


รูปที่ 3.6 การพันขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

โดยขดลวดทางด้านปฐมภูมิจะมีลักษณะการต่อดังรูปที่ 3.7 และขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะต่อดังรูปที่ 3.8 นี้ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 การต่อขดลวดทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 3.8 การต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

3.6 การคำนวณแฟกเตอร์ของการพันขดลวด

การพันขดลวดทางด้านปฐมภูมิจะพันขดลวดแบบ Full - Pitch มีจำนวนร่องสล๊อต 6 ร่องสล๊อต 2 ขั้วแม่เหล็ก ระยะ coil span (Y_s) เท่ากับ 3 ร่องสล๊อต , spread of phase group (σ) เท่ากับ 60 องศาทางไฟฟ้า

$$V = \text{Slot / Pole} = \frac{6}{2} = 3 \text{ Slot / Pole}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก $V' = \frac{\text{Slot / Pole}}{\text{Phase}} = \frac{6}{2 \times 3} = 1 \text{ Slot / Pole / Phase}$ ไปใช้

$$\gamma = \frac{180}{3} = 60 \quad \text{องศาทางไฟฟ้า}$$

$$\rho = 180 \times \frac{Y_s}{Y_p} = 180 \times \frac{3}{3} = 180 \quad \text{องศาทางไฟฟ้า}$$

$$K_{p1} = \sin \frac{\rho}{2} = \sin \frac{180}{2} = 1$$

$$K_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{60}{2}\right)}{\frac{60}{60} \sin\left(\frac{60}{2}\right)} = 1$$

$$K_{w1} = K_{d1} \times K_{p1} = 1 \times 1 = 1$$

จากการคำนวณสามารถคำนวณพิชแฟคเตอร์ (Pitch Factor) ทางด้านปฐมภูมิได้โดยมีค่าเท่ากับ 1 , คิสตริบิวชันแฟคเตอร์ (Distribution Factor) ทางด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นแฟคเตอร์การพันขดลวด (Winding Factor) ทางด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ 1

ในส่วนของแฟคเตอร์การพันขดลวดทางด้านทุติยภูมิสามารถคำนวณได้เช่นกัน โดยการคำนวณคิสตริบิวชันแฟคเตอร์สามารถพิจารณาจากรูปที่ 2.14 ดังนี้

$$K_{d2} = \frac{AD}{3AB} = \frac{2AB}{3AB} = 0.66$$

$$\rho = 180 \times \frac{Y_s}{Y_p} = 180 \times \frac{3}{3} = 180 \quad \text{องศาทางไฟฟ้า}$$

$$K_{p2} = \sin \frac{\rho}{2} = \sin \frac{180}{2} = 1$$

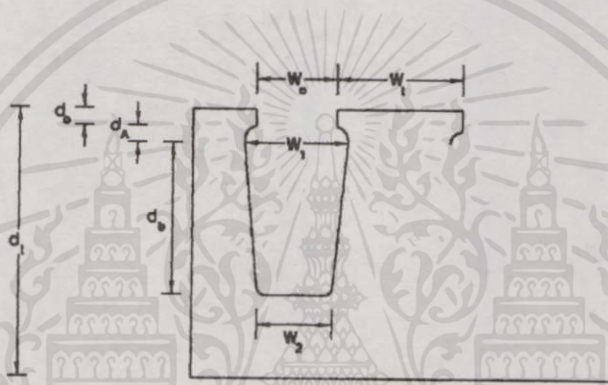
$$K_{w2} = K_{d2} \times K_{p2} = 0.66 \times 1 = 0.66$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
จากการคำนวณสามารถคำนวณพิชแฟคเตอร์ (Pitch Factor) ทางด้านทุติยภูมิได้โดยมี
ไม่จำกัดโดยทั้งสามอีกขั้วจะมีให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ค่าเท่ากับ 1 , คิสตริบิวชันแฟคเตอร์ (Distribution Factor) ทางด้านทุติยภูมิมีค่าเท่ากับ 0.66 ดังนั้น
แฟคเตอร์การพันขดลวด (Winding Factor) ทางด้านทุติยภูมิมีค่าเท่ากับ 0.66

3.7 การคำนวณขนาดของร่องสล้อท

ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจะออกแบบรูปร่างของร่องสล้อทดังรูปที่ 3.9 โดยมีลักษณะของร่องสล้อทแบบกึ่งปิดทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ทั้งนี้เพื่อลดผลของ space - harmonic ในช่องว่างอากาศโดยมีรายละเอียดดังนี้

ระยะ $W_0 = 6$	mm	ระยะ $d_0 = 2$	mm
ระยะ $W_1 = 14$	mm	ระยะ $d_4 = 3$	mm
ระยะ $W_2 = 10$	mm	ระยะ $d_b = 36$	mm
ระยะ $W_l = 25$	mm	ระยะ $d_l = 70$	mm



รูปที่ 3.9 รูปร่างร่องสล้อทของหม้อแปลงไฟฟ้า

$$\text{พื้นที่ร่องสล้อทโดยประมาณ} = 10 \times 38 = 380 \text{ mm}^2$$

$$\text{พื้นที่ขดลวดทางด้านปฐมภูมิในหนึ่งร่องสล้อท} = 132 \times 0.84 = 106.92 \text{ mm}^2$$

$$\text{พื้นที่ขดลวดทางด้านทุติยภูมิในหนึ่งร่องสล้อท} = 44 \times 1.7 = 74.8 \text{ mm}^2$$

$$\text{พื้นที่ขดลวดทางด้านปฐมภูมิต่อพื้นที่ร่องสล้อท} = 106.92/380 = 0.28$$

$$\text{พื้นที่ขดลวดทางด้านทุติยภูมิต่อพื้นที่ร่องสล้อท} = 74.8/380 = 0.19$$

จากการคำนวณสามารถลงขดลวดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิในร่องสล้อทที่ออกแบบได้และเลือกเกจรีแอกแตนซ์ของร่องสล้อททางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิมีค่าเท่ากับ

$$X_{sl} = \frac{32 \times (\pi)^2 \times 50 \times 0.45 \times (132)^2 \times 3}{6 \times 10^7} \left[1 \left(\frac{0.002}{0.006} + \frac{(2 \times 0.003)}{0.006 + 0.014} + \frac{0.036}{3 \times 0.01} \right) \right]$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 26.16 \text{ โอห์มต่อเฟส}$$

$$X_{s2} = \frac{32 \times (\pi)^2 \times 50 \times 0.45 \times (132)^2 \times 1 \times (1)^2 \times (1)^2}{6 \times 10^7} \left(\frac{0.002}{0.006} + \frac{(2 \times 0.003)}{0.006 + 0.014} + \frac{0.036}{3 \times 0.01} \right)$$

$$= 8.86 \quad \text{โอห์มต่อเฟส}$$

3.8 การลงขดลวดในร่องสล๊อท

การพันขดลวดทางด้านปฐมภูมิเริ่มจากการทำฟอร์มคอยล์ให้ได้ระยะห่างและความกว้างของร่องสล๊อทที่จะลงในขดลวดในแต่ละชุดให้ดูเรียบร้อยและสวยงาม หลังจากนั้นทำการพันขดลวดให้ได้จำนวนรอบตามที่คำนวณไว้คือ 132 รอบต่อเฟส หลังจากนั้นนำขดลวดออกจากฟอร์มคอยล์มาบรรจุลงในร่องสล๊อทที่มีการรองกระดาษฉนวนเพื่อป้องกันขดลวดสัมผัสกับแกนเหล็ก ซึ่งอาจทำให้ฉนวนที่เคลือบขดลวดเสียหายได้ ทำการผูกเชือกให้เรียบร้อยเพื่อความสวยงามและความแข็งแรงดังรูปที่ 3.10 สำหรับการพันขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะมีขั้นตอนเหมือนกับด้านปฐมภูมิแต่จะแตกต่างกันที่ขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะมีการพันขดลวดแบบ 1 เฟสเท่านั้น ดังรูปที่ 3.11 จากรูปแบบการพันขดลวดจะเห็นว่าลงขดลวดเพียง 18 ร่องสล๊อทจากทั้งหมด 42 ร่องสล๊อททั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสทางด้านทุติยภูมิโดยการปรับเลื่อนแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิเพื่อให้มีขดลวดฟลักซ์เกี่ยวคล้องขดลวดทางด้านทุติยภูมิโดยมีวงจรแม่เหล็กเท่ากันตลอดในการเลื่อนแกนเหล็ก



รูปที่ 3.10 แกนเหล็กและการลงขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แกนเหล็กและการลงขดลวดทางค้ำนทุติยภูมิ



รูปที่ 3.12 หม้อแปลงไฟฟ้า

3.9 บทสรุป

สำหรับการออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าจะแบ่งแกนเหล็กทางค้ำนปฐมภูมิออก เป็น 3 จุดทั้งนี้เพื่อแก้ปัญหาเนื่องจากกระแสไฟฟ้าทางค้ำนปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าไม่สมดุลกันเนื่องจากตำแหน่งของการวางขดลวดและมีโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Double side เพื่อแก้ปัญหาในส่วนองแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถปรับขนาด

ของแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิได้อย่างสะดวก สำหรับรายละเอียดของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

ขนาดพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า	6 kVA
แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ(ต่อเฟส)	220 V
แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ	1.8 - 285 V
จำนวนร่องสล๊อททางด้านปฐมภูมิ	6 สล๊อท (6ชุด)
จำนวนร่องสล๊อททางด้านทุติยภูมิ	42 สล๊อท (2ชุด)
จำนวนขดลวดทางด้านปฐมภูมิ	132 รอบ
จำนวนขดลวดทางด้านทุติยภูมิ	132 รอบ
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ออกแบบ	0.6 Tesla
จำนวนขั้วแม่เหล็ก	2 ขั้วแม่เหล็ก
ฟิชแฟลคเตอร์ทางด้านปฐมภูมิ	1
คิสตริบิวชันแฟลคเตอร์ทางด้านปฐมภูมิ	1
แฟลคเตอร์การพันขดลวดทางด้านปฐมภูมิ	1
ฟิชแฟลคเตอร์ทางด้านทุติยภูมิ	1
คิสตริบิวชันแฟลคเตอร์ทางด้านทุติยภูมิ	0.66
แฟลคเตอร์การพันขดลวดทางด้านทุติยภูมิ	0.66

อย่างไรก็ตามสิ่งที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งคือการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำการออกแบบ โดยสามารถพิจารณาได้ในบทที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

4.1 บทนำ

จากที่กล่าวมาในบทที่ 3 ของวิทยานิพนธ์ถึงการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้านั้น สิ่งที่จะต้องทำคือการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ออกแบบ โดยจะแบ่งการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 5 ส่วนด้วยกัน ประกอบด้วย

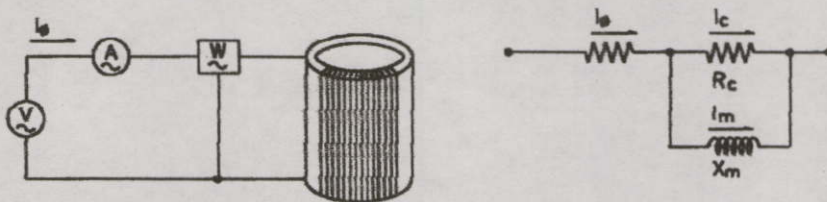
1. การทดสอบแกนเหล็ก
2. การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า
3. การทดสอบผลกระทบของการทำสกีวอิ้งของหม้อแปลงไฟฟ้า
4. การทดสอบการเกี่ยวค้องของเส้นแรงแม่เหล็ก
5. การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

ซึ่งสามารถพิจารณารายละเอียดได้ในหัวข้อถัดไป

4.2 การทดสอบแกนเหล็ก

ปัญหาเรื่องการสูญเสียของแกนเหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า, หม้อแปลงไฟฟ้า ได้มีความสำคัญมากในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เนื่องจากมีผลกระทบกับค่าใช้จ่ายที่ต้องสูญเสียไปจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งสิ้น โดยเฉพาะวงจรแม่เหล็กเป็นตัวกลางในการแปลงรูปพลังงานหรือส่งผ่านพลังงาน โดยอาศัยสนามแม่เหล็ก แต่พลังงานที่ส่งผ่านไปบางส่วนจะสูญเสียไปในวงจรแม่เหล็ก การสูญเสียที่เกิดขึ้นมาภายในแกนเหล็กของวงจรแม่เหล็กทุกชนิด พลังงานที่สูญเสียไปจะถูกจ่ายออกมาในรูปของความร้อน สารแม่เหล็กที่ใช้ทำแกนเหล็กของวงจรแม่เหล็ก จึงพยายามทำให้มีคุณสมบัติในการสูญเสียภายในให้น้อยที่สุด โดยมีคุณสมบัติในการซึมซาบแม่เหล็ก (μ_r) สูง แต่อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นค่าความซึมซาบจึงไม่คงที่ การที่จะกำหนดคุณสมบัติของสารแม่เหล็กแต่ละชนิดเพื่อออกแบบจำเป็นต้องอาศัยเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรค่าต่าง ๆ เช่น ความหนาแน่นของแผ่นแกนเหล็ก, ความถี่, ชนิดของสารและแนวของการรีดแผ่นเหล็กเป็นต้น ในส่วนของการออกแบบวงจรแม่เหล็กจะใช้แกนเหล็ก M5 ซึ่งเป็นแกนเหล็กที่ใช้สร้างหม้อแปลงไฟฟ้า ลักษณะโดยทั่วไปมีผิวเรียบเกลี้ยงและไม่มีการฉนวนลักษณะวงจรแม่เหล็กจะม้วนเป็นรูปเทอร์รอยด์ ดังรูปที่ 4.1 (ก) และวงจรสมมูลย์ของวงจรแม่เหล็ก ดังรูปที่ 4.2 (ข) และมีรายละเอียดของวงจรแม่เหล็ก ดังตารางที่ 4.1[4,13,16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยและเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) วงจรแม่เหล็กกรุปเทอร์รอยด์ ข) วงจรสมมูลย์ของวงจรแม่เหล็ก

รูปที่ 4.1 วงจรแม่เหล็กที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ลักษณะวงจรมแม่เหล็กที่ออกแบบ

ชนิดของแกนเหล็ก	พื้นที่หน้าตัด (m^2)	ความยาวเฉลี่ย (m)	จำนวนรอบ (รอบ)	ความหนา (m)	ความสูง (m)	น้ำหนัก (kg)
M5	4.145×10^{-3}	0.328	110	0.023	0.18	10

ในส่วนของการทดสอบแกนเหล็กนี้ จะทดสอบแกนเหล็กอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบแกนเหล็ก IEEE STD 393 - 1991 ซึ่งกำหนดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่ใช้ในการทดสอบไม่ควรมีค่าความผิดเพี้ยน (Voltage Distortion, Frequency Variation) เกิน 10 % และ 1 % ตามลำดับ โดยจะแบ่งการทดสอบแกนเหล็กที่ความถี่ 50 Hz และ 60 Hz ที่อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียสและใช้สมการเอ็มไพริคัลในการวิเคราะห์หาค่าการสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิสและการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนดังตารางที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 [4,13,17]

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแกนเหล็ก M5 ที่ความถี่ 50 Hz

V	B	I	H	μ_r	P.F.	W	W/kg	VA/kg
61	0.6	0.11	36.89	12984.15	0.41	2.74	0.274	0.37
81	0.8	0.19	63.72	9981.78	0.26	3.97	0.397	1.54
102	1.0	0.41	150.91	5307.18	0.16	6.58	0.658	4.59
122	1.2	1.17	452.74	2115.94	0.08	10.07	1.007	16.47
152	1.5	3.53	1317.99	905.58	0.07	25.11	2.511	59.74
173	1.7	5.25	1398.17	715.66	0.04	45.11	4.511	112.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

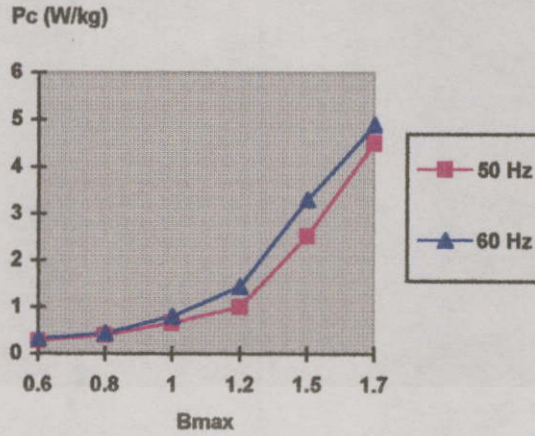
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแกนเหล็ก M5 ที่ความถี่ 60 Hz

V	B	I	H	μ_r	P.F.	W	W/kg	VA/kg
73	0.6	0.11	36.89	12948.68	0.41	3.28	0.328	0.8
98	0.8	0.21	70.43	9105.46	0.21	4.44	0.444	2.06
122	1.0	0.42	154.27	5174.84	0.16	8.08	0.808	5.61
146	1.2	1.21	462.80	3064.28	0.08	14.45	1.445	20.15
183	1.5	3.57	1314.63	910.88	0.06	32.97	3.297	71.74
207	1.7	5.37	1925	703.65	0.04	48.97	4.897	122.42

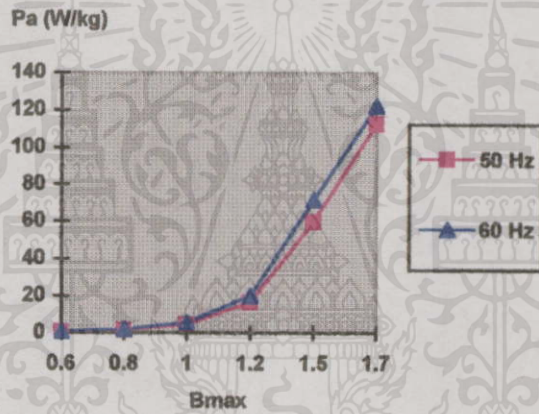
ตารางที่ 4.4 ค่า P_e และ P_h ของแกนเหล็ก M₅ ที่ความถี่ 50 และ 60 Hz

V	f	B	K_e	K_h	J	I	P_e (W)	P_h (W)	P_e (W/kg)	P_h (W/kg)
61	50	0.6	0.00175	0.052716	0.0006	0.0233	1.575	1.164	0.1575	0.1164
73	60	0.6	0.00175	0.052716	0.0006	0.0233	2.268	1.397	0.2268	0.13968
81	50	0.8	0.001795	0.031205	0.0011	0.0218	2.874	1.092	0.28735	0.10918
98	60	0.8	0.001795	0.031205	0.0011	0.0218	3.138	1.31	0.31378	0.13102
102	50	1.0	0.001509	0.054997	0.0015	0.055	3.773	2.75	0.37733	0.27499
122	60	1.0	0.001509	0.054997	0.0015	0.055	5.434	3.3	0.54335	0.32998
122	50	1.2	0.001449	0.072235	0.0021	0.0967	5.215	4.835	0.52152	0.48351
146	60	1.2	0.001449	0.072235	0.0021	0.0967	7.51	5.802	0.75098	0.58022
152	50	1.5	0.002167	0.134951	0.0049	0.2582	12.19	12.91	1.2189	1.2908
183	60	1.5	0.002167	0.134951	0.0049	0.2582	17.55	15.49	1.7552	1.54908
173	50	1.7	0.003138	0.019189	0.0091	0.4485	22.67	22.43	2.26725	2.2425
207	60	1.7	0.003138	0.019189	0.0091	0.4485	32.65	26.91	3.26484	2.691

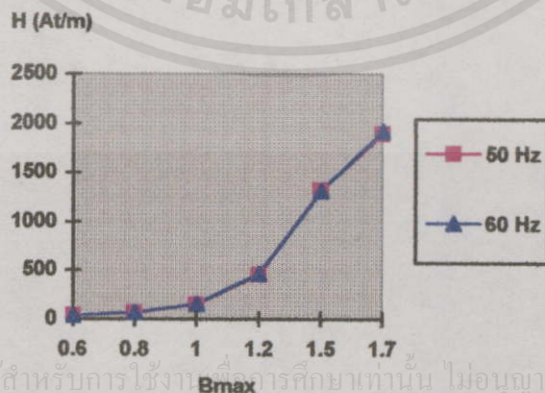
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P_c กับ B_{max} ของแกนเหล็ก M5 ที่ความถี่ 50 Hz และ 60 Hz



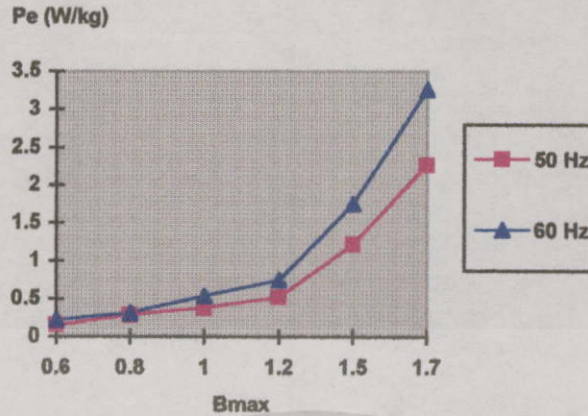
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P_a กับ B_{max} ของแกนเหล็ก M5 ที่ความถี่ 50 Hz และ 60 Hz



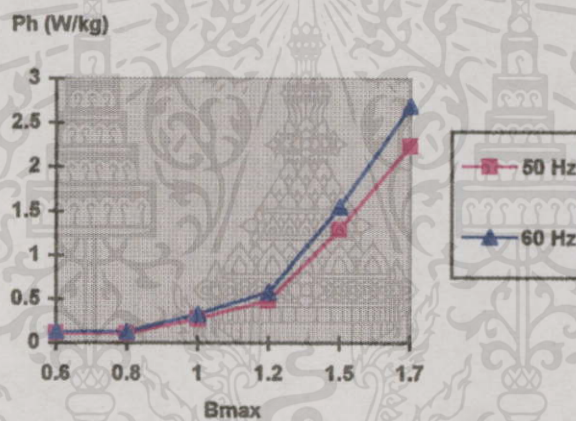
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ดึงทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง H กับ B_{max} ของแกนเหล็ก M5 ที่ความถี่ 50 Hz และ 60 Hz



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P_e กับ B_{max} ของแกนเหล็ก M5 ที่ความถี่ 50 Hz และ 60 Hz



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P_h กับ B_{max} ของแกนเหล็ก M5 ที่ความถี่ 50 Hz และ 60 Hz

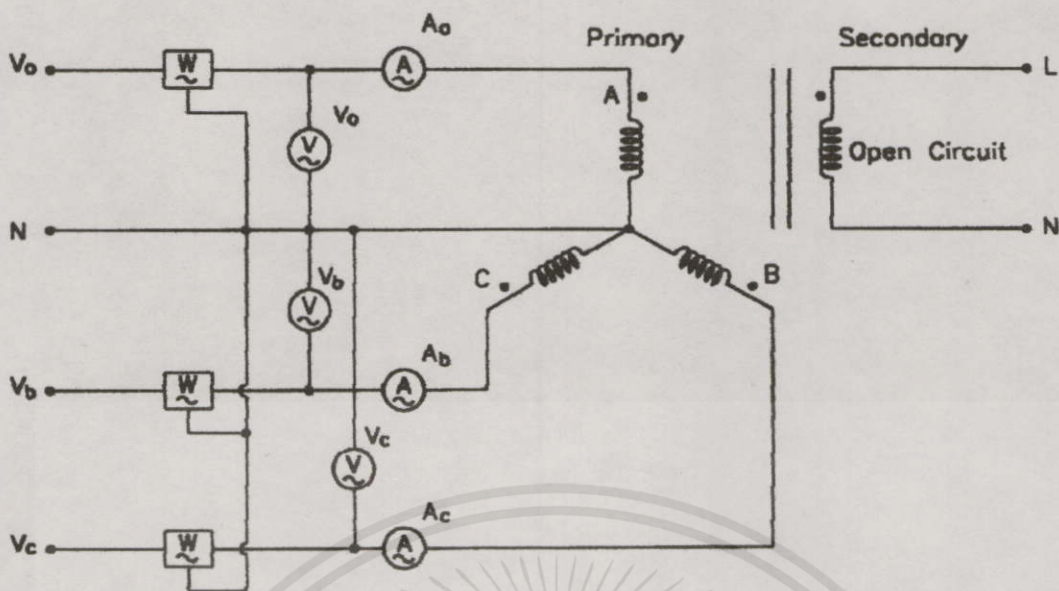
4.3 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อหาค่าพารามิเตอร์ภายในหม้อแปลงไฟฟ้า จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน คือ

4.3.1 การทดสอบแบบเปิดวงจร (Open Circuit Test)

ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร จะทำการทดสอบโดยต่อวงจรดัง

รูปที่ 4.7 หลังจากนั้น จะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทางค้ำปฐมภูมิจนถึงพิกัดแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง ทำการบันทึกแรงดันไฟฟ้า (V_{oc}), กระแสไฟฟ้า (I_{oc}) และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (P_{oc}) โดยทำการทดสอบที่ระยะ 0.18 m



รูปที่ 4.7 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร (open circuit test)

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนำมาคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยใช้สมการ

(4.1) ถึง (4.6)

$$\cos \theta = \frac{P_{oc}}{V_{oc} \cdot I_{oc}}$$

$$\therefore \theta = \cos^{-1} \left(\frac{P_{oc}}{V_{oc} \cdot I_{oc}} \right) \tag{4.1}$$

$$I_{\phi} = I_{oc} \tag{4.2}$$

$$I_c = I_{oc} \cos \theta \tag{4.3}$$

$$I_m = I_{oc} \sin \theta \tag{4.4}$$

$$R_c = \frac{V_{oc}}{I_c} \tag{4.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (4.6) ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าบันทึกผลลงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร (open circuit test)

V_{in} (V)			I_{in} (A)			I_{av} (A)	P_{in} (W)			P_{av} (W)	P_{core} (W)
A	B	C	A	B	C		A	B	C		
220	220	220	8.38	9.53	8.62	8.85	183	309	113	217	605

จากการทดสอบ open circuit test สามารถนำมาคำนวณค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\cos \theta_{oc} = \frac{217}{220 \times 8.85} = 0.11$$

$$\theta_{oc} = \cos^{-1} 0.11 = 83.6^\circ$$

$$\sin \theta_{oc} = \sin 83.6 = 0.99$$

$$I_\phi = I_{oc} = 8.85 \text{ A}$$

$$I_c = I_{oc} \cos \theta = 8.85 \times 0.109 = 0.973 \text{ A}$$

$$I_m = I_{oc} \sin \theta = 8.85 \times 0.99 = 8.761 \text{ A}$$

$$R_c = \frac{V_{oc}}{I_c} = \frac{220}{0.973} = 226.1 \quad \Omega / ph$$

$$X_m = \frac{V_{oc}}{I_m} = \frac{220}{8.761} = 25.11 \quad \Omega / ph$$

4.3.2 การทดสอบแบบลัดวงจร (Short Circuit Test)

ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจรนั้นจะทำการทดสอบโดยต่อวงจร

ดังรูปที่ 4.8 หลังจากนั้นจะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสให้กับสามเฟสให้กับหม้อ

แปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิจนกระทั่งถึงพิกัดกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า (I_{cu}) และทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า (V_{sc}) และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด (P_{cu}) โดยทำการทดสอบที่ระยะใช้

0.18 m ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนำมาคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยใช้สมการ (4.7) ถึง (4.10) จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าบันทึกผลลงในตารางที่ 4.6

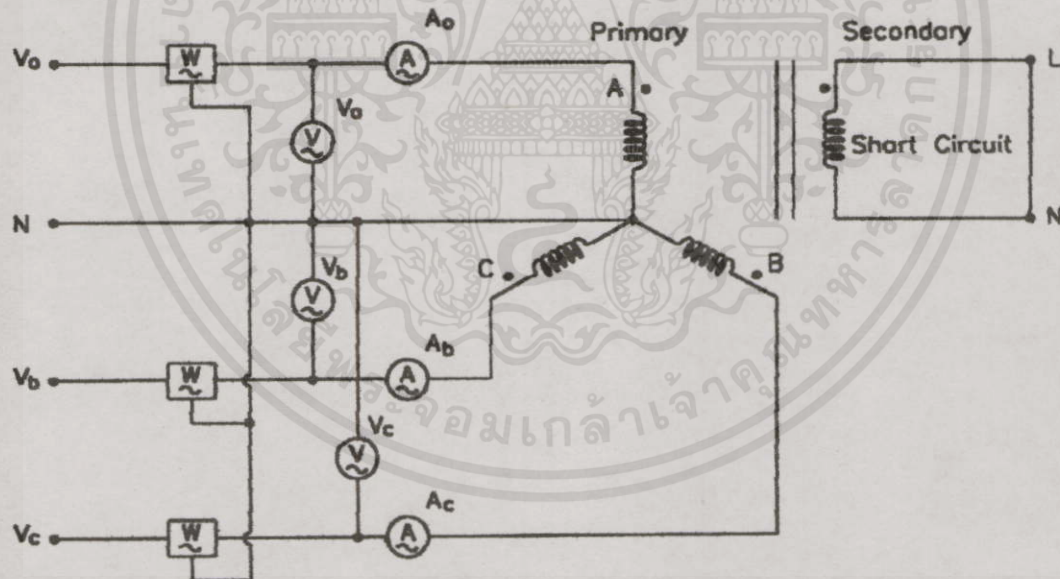
$$\cos \theta_{sc} = \frac{P_{sc}}{V_{sc} \cdot I_{sc}}$$

$$\therefore \theta_{sc} = \cos^{-1} \left(\frac{P_{sc}}{V_{sc} \cdot I_{sc}} \right) \tag{4.7}$$

$$Z_{sc} = \frac{V_{sc} \angle 0^\circ}{I_{sc} \angle -\theta_{sc}} = R_{sc} + jX_{sc} \tag{4.8}$$

$$R_{eq} = R_{sc} \tag{4.9}$$

$$jX_{eq} = jX_{sc} \tag{4.10}$$



รูปที่ 4.8 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจร (short circuit test)

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจร (short circuit test)

V_{in} (V)			I_{in} (A)			I_{av} (A)	P_{in} (W)			P_{av} (W)	I_o (A)	P_{cu} (W)
A	B	C	A	B	C		A	B	C			
167	167	167	5.2	8.3	8.7	7.56	116	190	210	176	6.11	516

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับครูอาจารย์เพื่อใช้ในการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบ short circuit test สามารถนำมาคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังนี้

$$\cos \theta_{sc} = \frac{176}{167 \times 7.56} = 0.13$$

$$\therefore \theta_{sc} = \cos^{-1} 0.13 = 81.98^\circ$$

$$Z_{sc} = \frac{V_{sc} \angle 0^\circ}{I_{sc} \angle -\theta_{sc}} = \frac{167 \angle 0^\circ}{7.56 \angle -81.98^\circ}$$

$$= 22.08 \angle 81.98 = 3.08 + j21.86 \quad \Omega / ph$$

$$R_{eq} = 3.08 \quad \Omega / ph$$

$$jX_{eq} = j21.86 \quad \Omega / ph$$

4.3.3 การทดสอบหาค่าความต้านทานของหม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับการทดสอบหาค่าความต้านทานไฟฟ้า สามารถทำได้โดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่ขดลวดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อทำการหาค่า R_1 และ R_2 ผลการทดสอบจะบันทึกลงในตารางที่ 4.7 และ 4.8

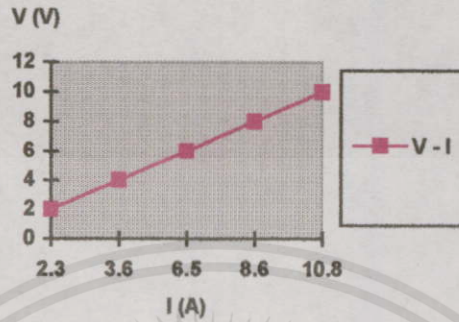
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความต้านทานทางด้านปฐมภูมิ (R_1)

V (V)	I (A)
2	2.3
4	3.6
6	6.5
8	8.6
10	10.8

นำมาพล็อตกราฟ ดังรูปที่ 4.9 และหาค่าความชันได้เท่ากับ 0.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความชันนี้ คือค่าความต้านทาน R_1 มีค่าเท่ากับ 0.68 โอห์มต่อเฟส สำหรับความต้านทาน R_2 จะทำการทดสอบเหมือนกับความต้านทาน R_1 ผลการทดสอบจะบันทึกลงในตารางที่ 4.8

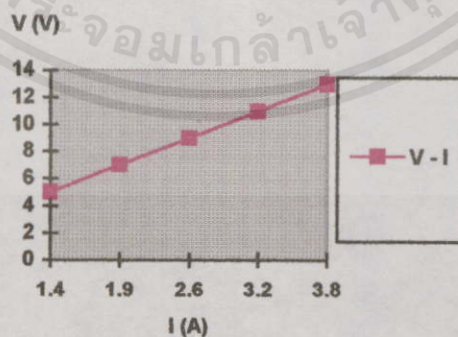


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลการทดลอง V – I Method ของความต้านทานทางด้านปฐมภูมิ

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ (R_2)

V (V)	I (A)
5	1.4
7	1.9
9	2.6
11	3.2
13	3.8

นำมาพล็อตกราฟดังรูปที่ 4.10 และหาความชันได้เท่ากับ 2.85



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการทดลอง V – I Method ของความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ค่าความชันนี้คือความต้านทาน R_2 มีค่าเท่ากับ 2.85 โอห์มต่อเฟส

จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร (open circuit test) , แบบลัดวงจร (short circuit test) และการทดสอบค่าหาความต้านทานไฟฟ้า ทำให้ทราบถึงค่าสูญเสียในแกนเหล็กและขดลวดของแปลงไฟฟ้าและยังสามารถนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เขียนวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าได้

4.4 การทดสอบผลกระทบของการทำสกีวอิ้งของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในส่วนของ การทดสอบผลกระทบของการทำสกีวอิ้งของหม้อแปลงไฟฟ้านั้น แกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิจะวางเรียงแกนเหล็ก 2 แบบด้วยกันประกอบด้วย การวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (unskewing) และวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (skewing) 1 ร่องสล๊อทเมื่อเทียบกับแกนเหล็กทางด้านทุติยภูมิ ดังรูปที่ 4.11 (ก) และ (ข) สำหรับการทดสอบจะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า



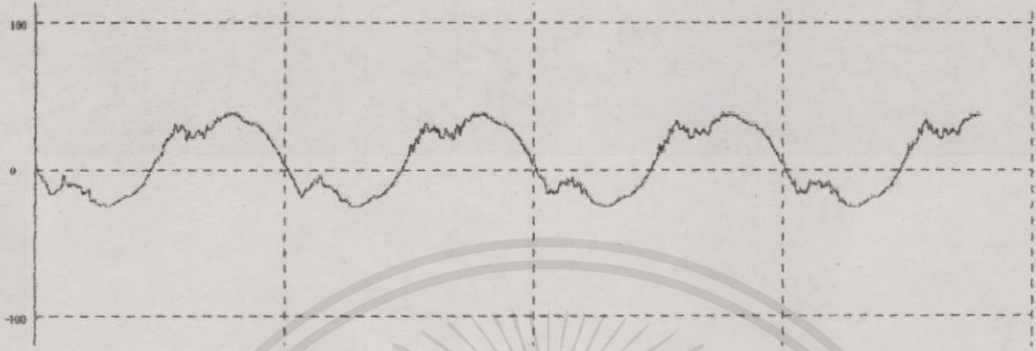
รูปที่ 4.11 ก) การวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (unskewing)



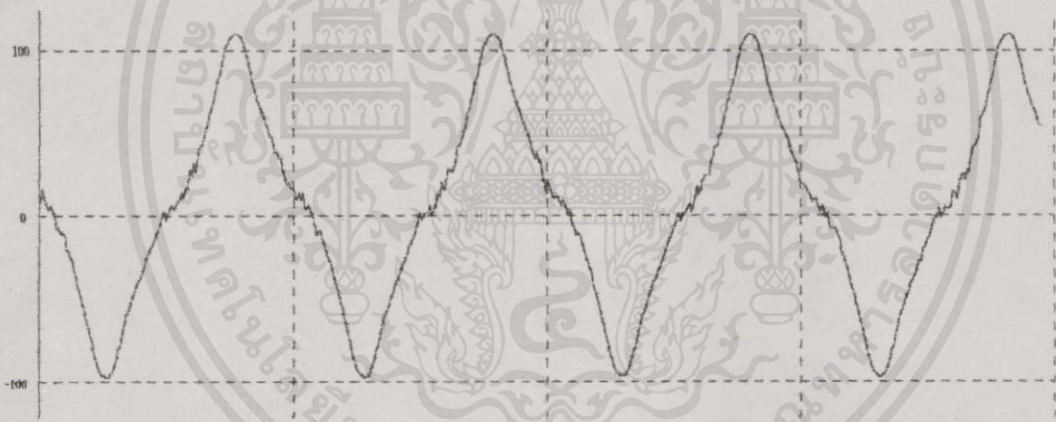
รูปที่ 4.11 ข) การวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (skewing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูในวงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสสลับสามเฟสให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ หลังจากนั้นจะทำการวัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิโดยใช้ Harmonic Analyzer ที่ระยะต่าง ๆ จากผลการทดสอบจะแสดงดังรูปที่ 4.12 ถึงรูปที่ 4.23

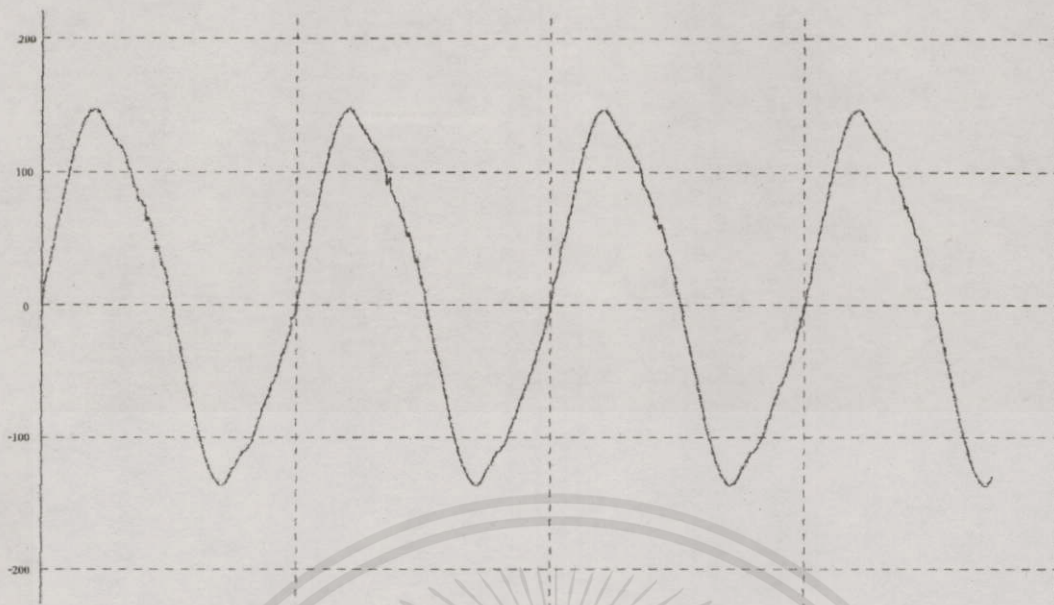


รูปที่ 4.12 แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.03 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)
38 V , THD 28.50 % (V/div 100 V , T/div 20 ms)

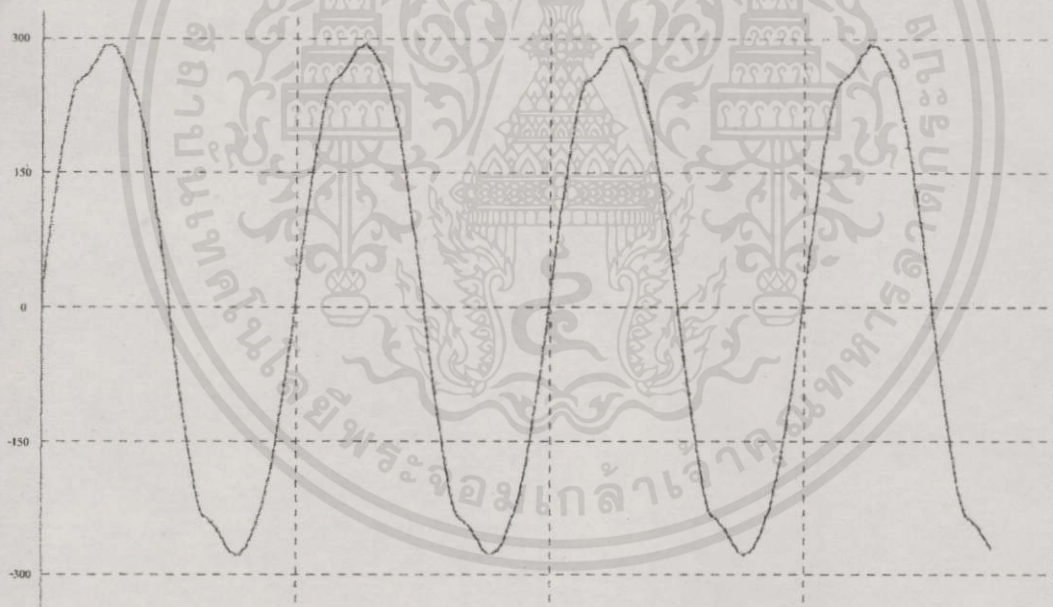


รูปที่ 4.13 แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.06 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)
106 V , THD 20.10 % (V/div 100 V , T/div 20 ms)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

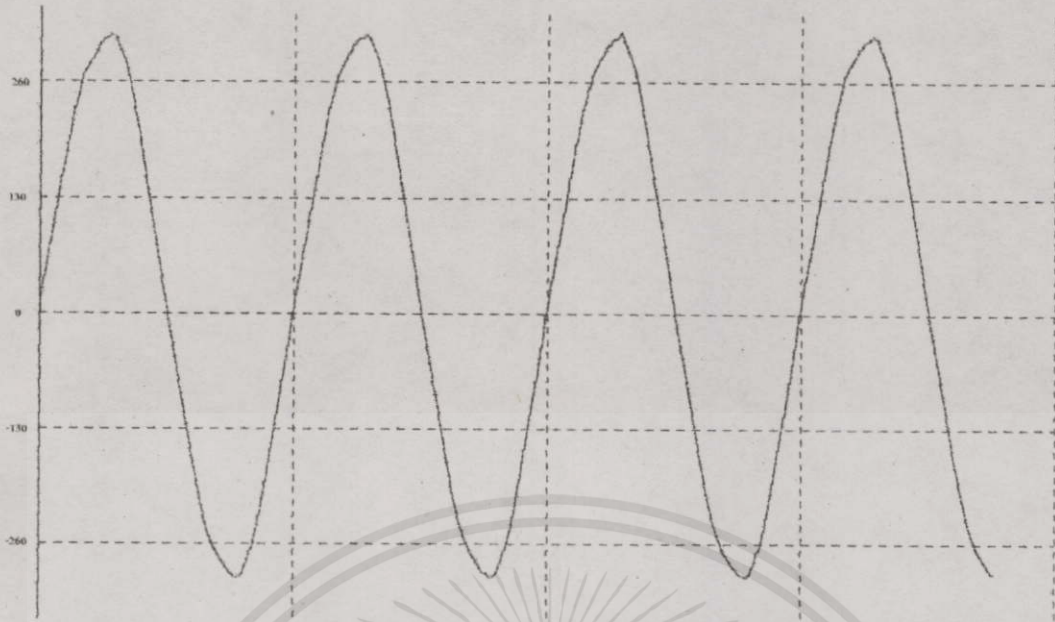


รูปที่ 4.14 แรงดันไฟฟ้าทางคานทุติยภูมิที่ระยะ 0.09 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)
172 V , THD 8.30 % (V/div 100 V , T/div 20 ms)

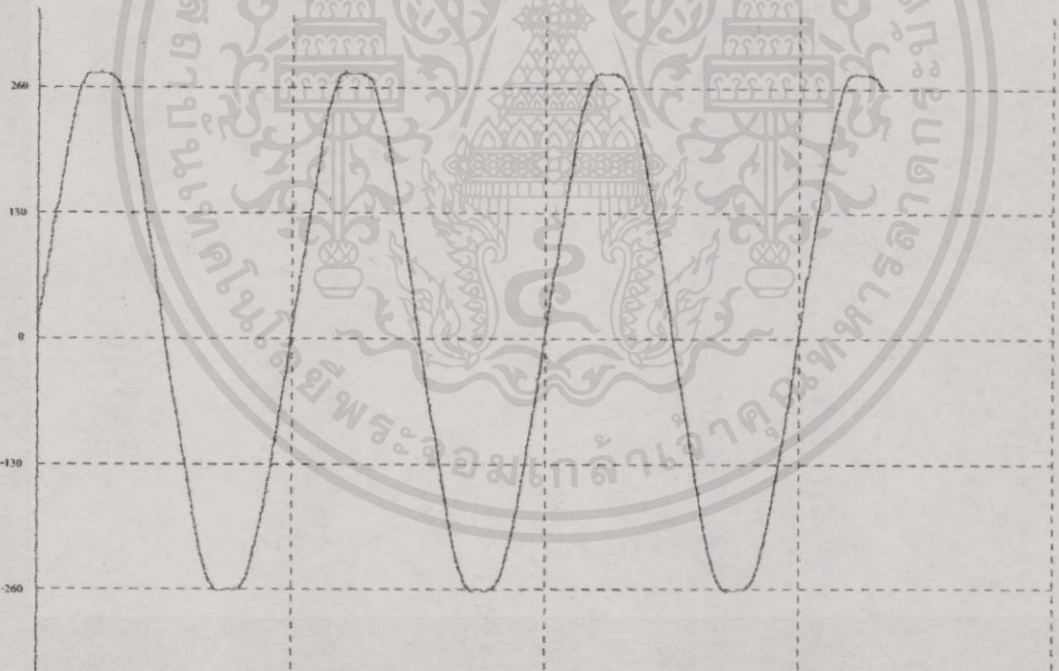


รูปที่ 4.15 แรงดันไฟฟ้าทางคานทุติยภูมิที่ระยะ 0.12 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)
254 V , THD 7.30 % (V/div 150 V , T/div 20 ms)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



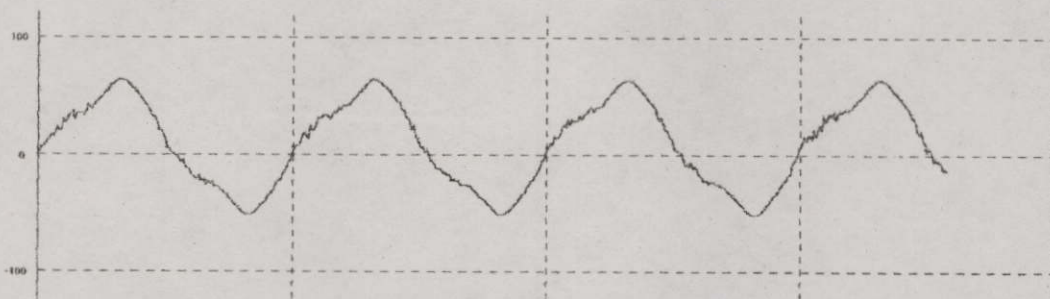
รูปที่ 4.16 แรงดันไฟฟ้าทางดำนทุติยภูมิที่ระยะ 0.15 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง(Unskewing)
294 V , THD 3.10 % (V/div 130 V , T/div 20 ms)



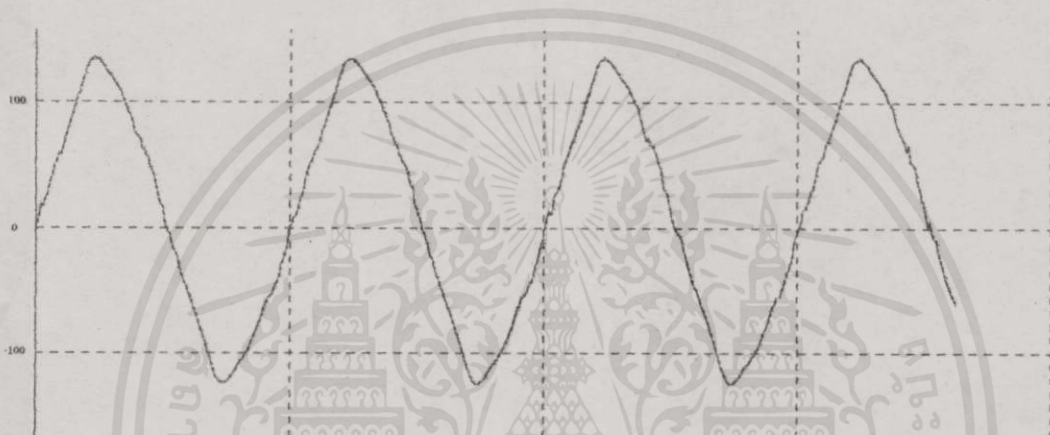
รูปที่ 4.17 แรงดันไฟฟ้าทางดำนทุติยภูมิที่ระยะ 0.18 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง(Unskewing)

276 V , THD 2.30 % (V/div 130 V , T/div 20 ms)

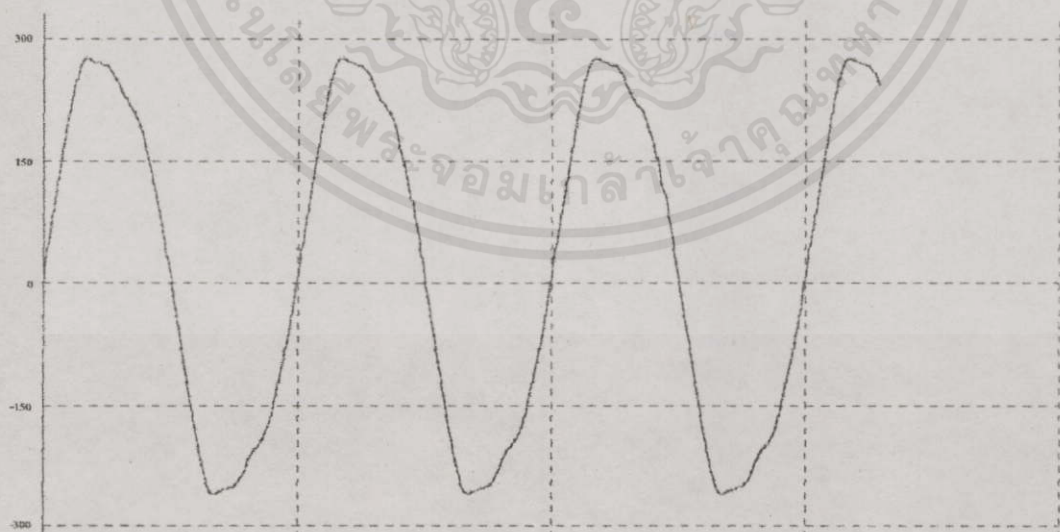
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.03 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)
66 V , THD 16.30 % (V/div 100 V , T/div 20 ms)



รูปที่ 4.19 แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.06 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)
153 V , THD 7.40 % (V/div 100 V , T/div 20 ms)

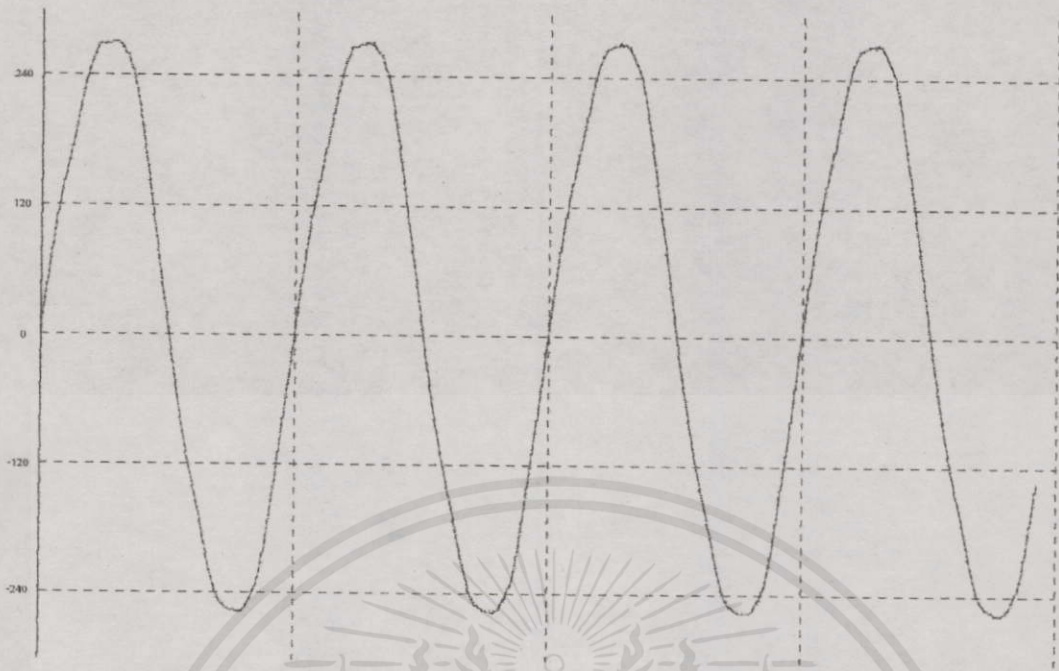


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

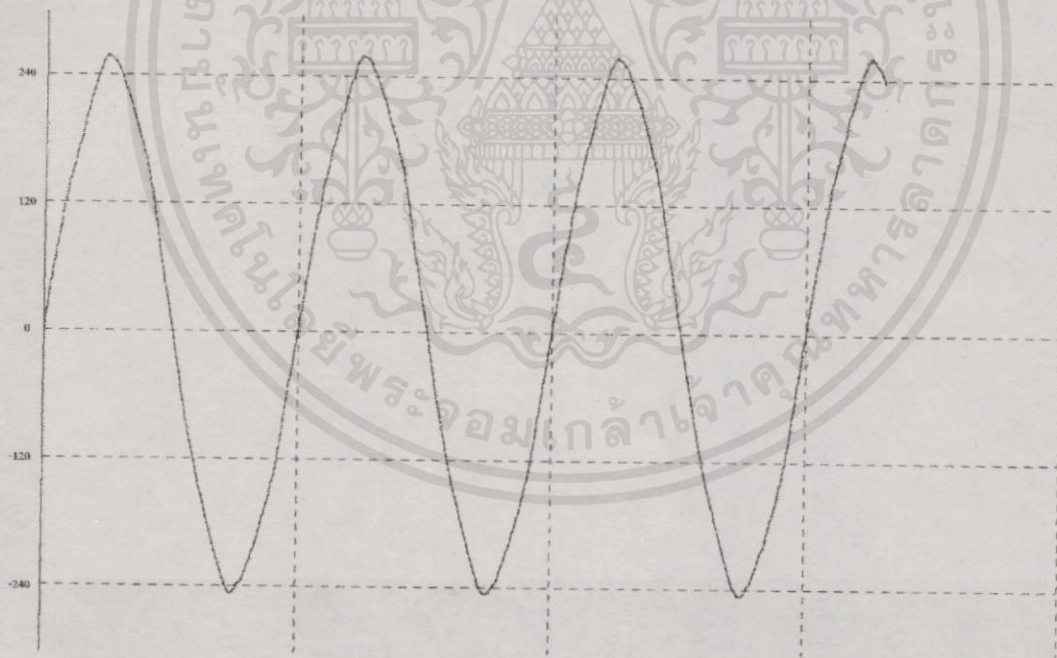
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น สิ่งนี้ทั้งหมดมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.20 แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.09 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)

236 V , THD 8.0 % (V/div 150 V , T/div 20 ms)

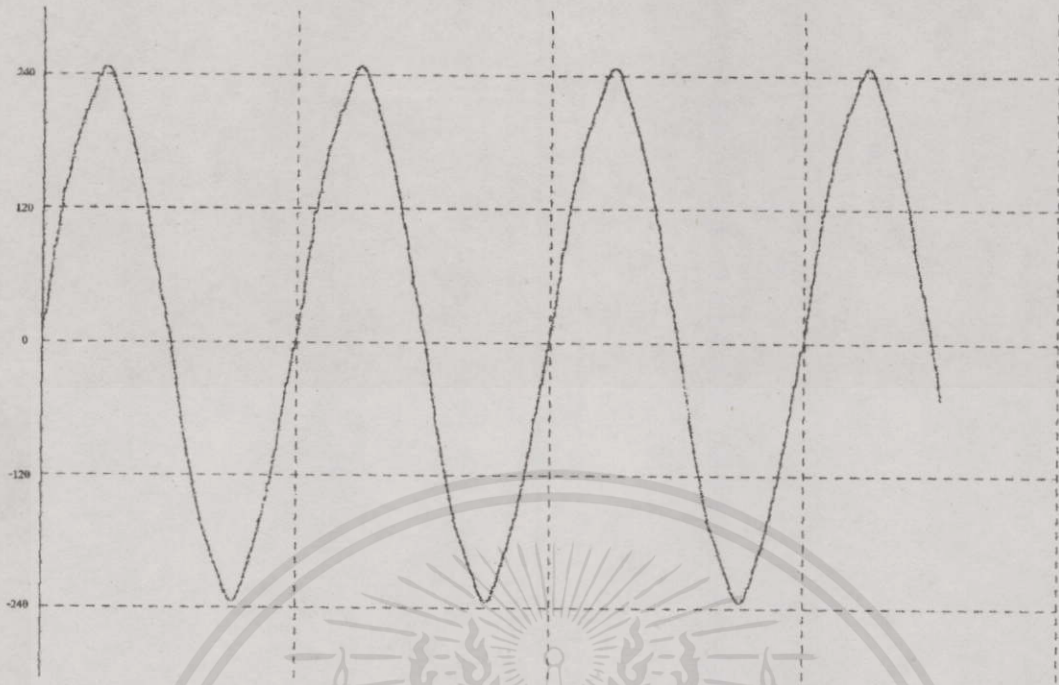


รูปที่ 4.21 แรงดันไฟฟ้าทางคานทุติยภูมิที่ระยะ 0.12 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง(Skewing)
285 V , THD 4.0 % (V/div 120 V , T/div 20 ms)



รูปที่ 4.22 แรงดันไฟฟ้าทางคานทุติยภูมิที่ระยะ 0.15 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง(Skewing)

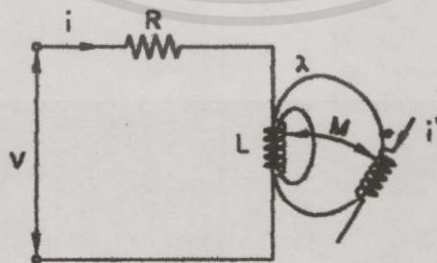
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนลิขสิทธิ์ในนามของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.18 m วางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing) 244 V, THD 2.90 % (V/div 120 V, T/div 20 ms)

4.5 การทดสอบการเกี่ยวค้ำของเส้นแรงแม่เหล็ก

สำหรับการพันขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะประกอบด้วยขดลวดทางด้านปฐมภูมิ (primary) ที่มีลักษณะการพันแบบสามเฟส โดยจะพันขดลวดในแต่ละเฟสจะห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้าและขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (secondary) จะมีการพันแบบหนึ่งเฟส โดยภายในขดลวดจะประกอบด้วยความต้านทาน (Resistance) และค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) เพื่อง่ายต่อการพิจารณาจะพิจารณาจากรูปที่ 4.24[9,10,12]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.24 วงจรไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทางสนธิสัญญาห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.24 สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (4.11)

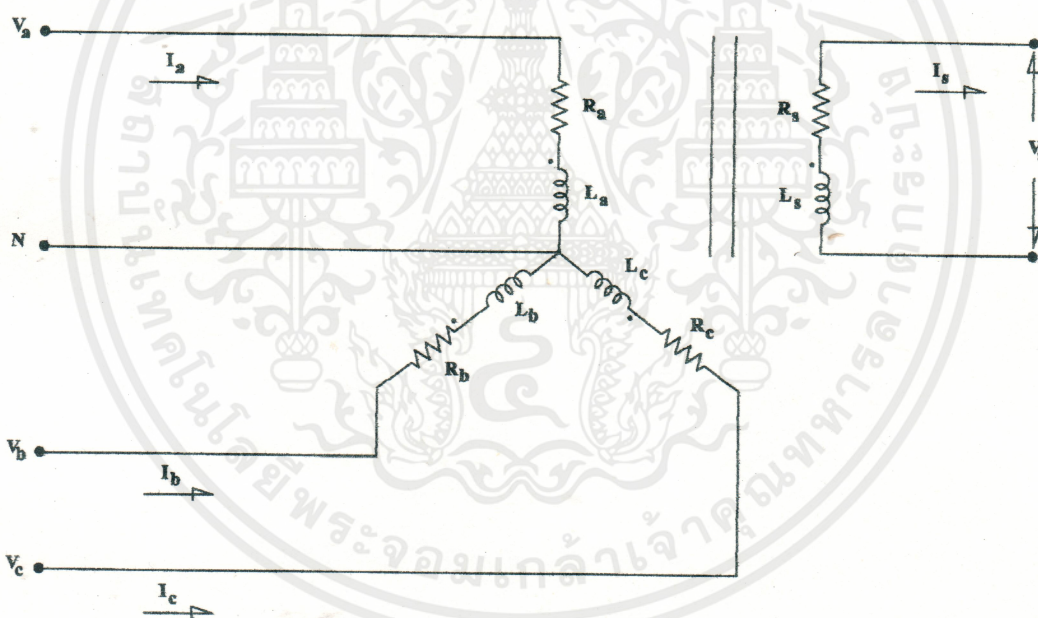
$$V = Ri + \frac{d\lambda}{dt} \quad (4.11)$$

เมื่อ

λ : Flux linkage มีค่าเท่ากับสมการที่ (4.12)

$$\lambda = Li \quad (4.12)$$

โดยในหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสนั้น จะประกอบด้วยขดลวด 4 ชุดประกอบด้วยขดลวดทางด้านปฐมภูมิ (primary) และขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (secondary) ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 วงจรไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.25 สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (4.13) ถึง (4.16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและเผยแพร่ข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการ (4.13) ใช้

$$V_a = R_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (4.13)$$

$$V_b = R_b i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \quad (4.14)$$

$$V_c = R_c i_c + \frac{d\lambda_c}{dt} \quad (4.15)$$

$$V_s = R_s i_s + \frac{d\lambda_s}{dt} \quad (4.16)$$

ในเทอมของ Flux Linkage ของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4.17) ถึง (4.20)

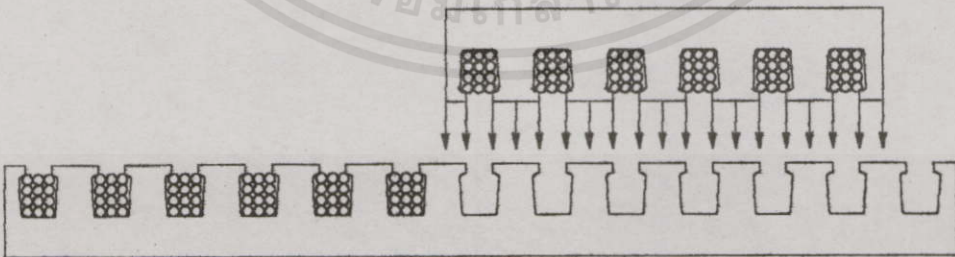
$$\lambda_a = L_a i_a + M_{ab} i_b + M_{ca} i_c + M_{as} i_s \quad (4.17)$$

$$\lambda_b = L_b i_b + M_{ba} i_a + M_{bc} i_c + M_{bs} i_s \quad (4.18)$$

$$\lambda_c = L_c i_c + M_{ca} i_a + M_{cb} i_b + M_{cs} i_s \quad (4.19)$$

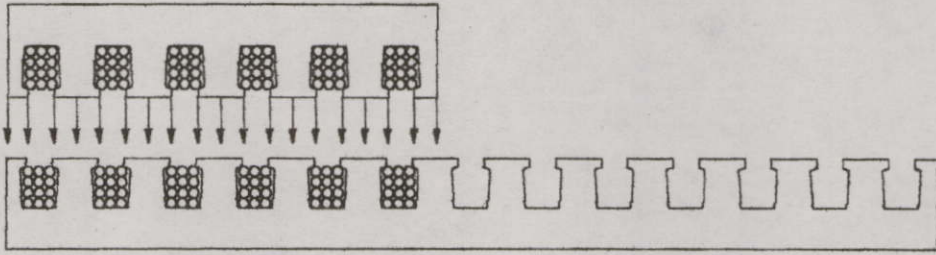
$$\lambda_s = L_s i_s + M_{sa} i_a + M_{sb} i_b + M_{sc} i_c \quad (4.20)$$

โดยในการทดสอบการเกี่ยวค้องของ Mutual Flux ในแต่ละเฟสที่กระทำต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่ระยะต่าง ๆ โดยจะวัดออกอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ 4.26 ถึง 4.27 ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบกันระหว่างการวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) และการวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (skewing) โดยบันทึกผลการทดสอบดังตารางที่ 4.9 ถึง 4.16



รูปที่ 4.26 การเกี่ยวค้องของ Mutual Flux ที่ระยะ 0 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 การเกี่ยวค้ำของ Mutual Flux ที่ระยะ 0.18 m

ตารางที่ 4.9 การทดสอบการเกี่ยวค้ำของ Mutual Flux เฟส A ที่กระทำต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่ระยะต่าง ๆ เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)

ระยะทาง	V_{in}	I_{in}	$\cos \theta$	V_{out}
0	222	7.39	0.13	2.92
0.03	221	7.15	0.15	37.5
0.06	220	7.48	0.14	84.4
0.09	221	7.81	0.14	120
0.12	220	7.47	0.13	135
0.15	221	7.45	0.13	165
0.18	220	7.1	0.11	140

ตารางที่ 4.10 การทดสอบการเกี่ยวค้ำของ Mutual Flux เฟส B ที่กระทำต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่ระยะต่าง ๆ เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)

ระยะทาง	V_{in}	I_{in}	$\cos \theta$	V_{out}
0	214	6.55	0.14	0.88
0.03	213	6.32	0.14	17.8
0.06	211	6.23	0.14	88.4
0.09	215	6.99	0.15	160
0.12	214	7.3	0.15	222
0.15	210	6.21	0.14	94
0.18	210	6.29	0.12	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก่อนไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 การทดสอบการเกี่ยวค้องของ Mutual Flux เฟส C ที่กระทำต่อขดลวดทางค้ำน
ทุติยภูมิที่ระยะต่าง ๆ เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)

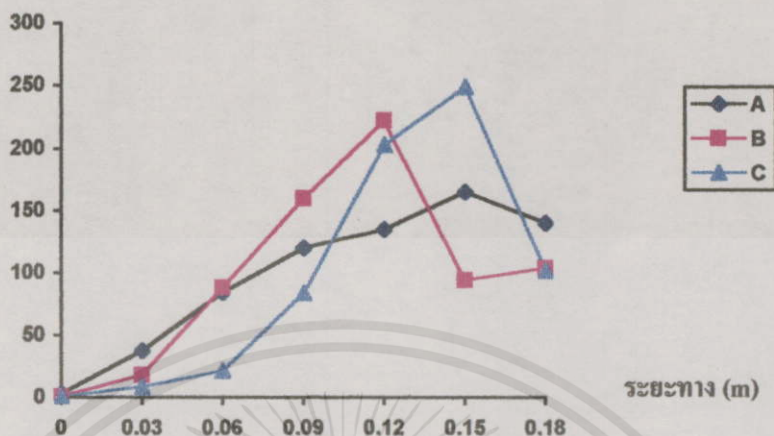
ระยะทาง	V_{in}	I_{in}	$\cos \theta$	V_{out}
0	215	6.77	0.14	0.82
0.03	214	6.86	0.14	8.4
0.06	212	6.79	0.14	21.3
0.09	215	6.71	0.14	84
0.12	214	7.19	0.13	203
0.15	210	7.19	0.14	248.5
0.18	209	6.85	0.12	102

ตารางที่ 4.12 การทดสอบการเกี่ยวค้องของ Mutual Flux ทั้งสามเฟสที่กระทำต่อขดลวดทางค้ำน
ทุติยภูมิที่ระยะต่าง ๆ เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)

ระยะทาง	V_{in}			I_{in}			$\cos \theta$			V_{out}
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
0	222	214	215	7.51	7.0	7.84	0.07	0.20	0.06	2.53
0.03	221	213	214	6.97	6.57	7.35	0.09	0.19	0.07	38
0.06	220	211	212	7.26	6.31	7.13	0.09	0.18	0.09	105.9
0.09	221	215	215	8.14	7.34	7.69	0.1	0.19	0.05	171
0.12	220	214	214	7.40	7.54	7.73	0.07	0.21	0.06	253.5
0.15	221	210	210	7.18	6.59	7.69	0.08	0.17	0.09	294
0.18	220	210	209	7.51	6.94	7.59	0.08	0.19	0.03	274

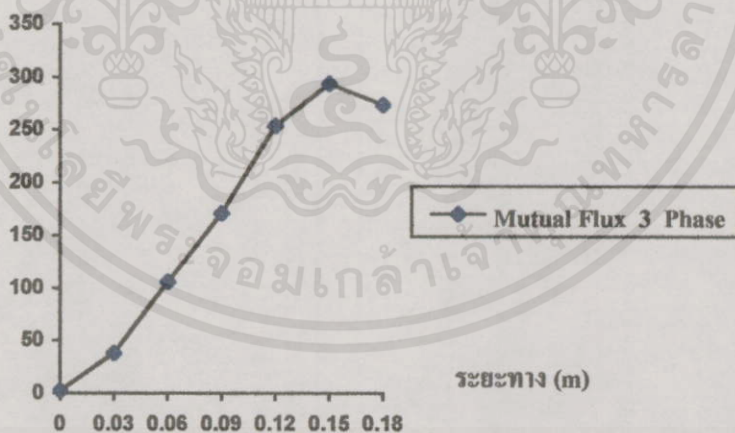
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าทาง
ด้านทุติยภูมิ (v)



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง Mutual Flux แต่ละเฟสที่กระทำต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิ เมื่อเลื่อนแกนเหล็กที่ระยะต่างๆ โดยมีการวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)

แรงดันไฟฟ้าทาง
ด้านทุติยภูมิ (v)



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง Mutual Flux ทั้งสามเฟสที่กระทำต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิ เมื่อเลื่อนแกนเหล็กที่ระยะต่างๆ โดยมีการวางแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 การทดสอบการเกี่ยวค้องของ Mutual Flux เฟส A ที่กระทำต่อขดลวดทางค้ำน
หุติยภูมิที่ระยะต่าง ๆ เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)

ระยะทาง	V_{in}	I_{in}	$\cos \theta$	V_{out}
0	221	7.1	0.23	7.0
0.03	220	7.2	0.24	10
0.06	223	7.1	0.23	67
0.09	220	7.3	0.23	176
0.12	218	7.5	0.24	245
0.15	219	7.7	0.24	146
0.18	220	7.7	0.24	60

ตารางที่ 4.14 การทดสอบการเกี่ยวค้องของ Mutual Flux เฟส B ที่กระทำต่อขดลวดทางค้ำน
หุติยภูมิที่ระยะต่าง ๆ เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)

ระยะทาง	V_{in}	I_{in}	$\cos \theta$	V_{out}
0	230	7.2	0.23	14
0.03	229	7.3	0.23	54
0.06	233	7.5	0.23	79
0.09	232	7.9	0.23	102
0.12	231	9.0	0.23	133
0.15	229	8.0	0.23	229
0.18	232	8.0	0.24	171

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 การทดสอบการเกี่ยวค้องของ Mutual Flux เฟส C ที่กระทำต่อขดลวดทางค้ำน
หุติยภูมิที่ระยะต่าง ๆ เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)

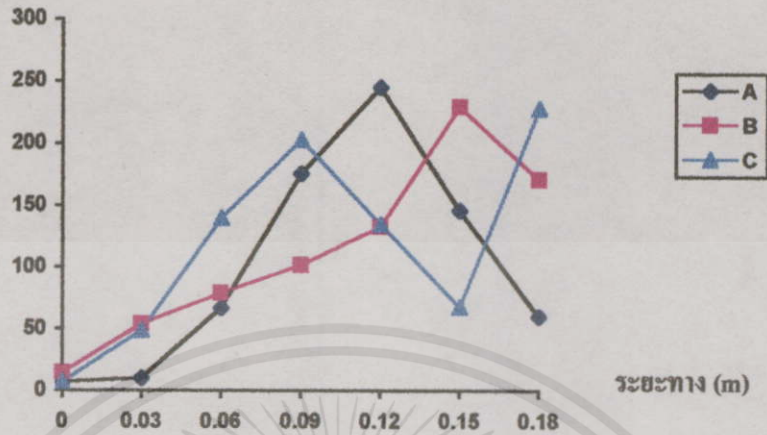
ระยะทาง	V_{in}	I_{in}	$\cos \theta$	V_{out}
0	223	6.8	0.23	7.0
0.03	220	6.5	0.25	49
0.06	224	7.8	0.24	140
0.09	223	7.1	0.23	203
0.12	221	7.3	0.24	135
0.15	219	7.7	0.24	68
0.18	220	7.7	0.23	228

ตารางที่ 4.16 การทดสอบการเกี่ยวค้องของ Mutual Flux ทั้งสามเฟสที่กระทำต่อขดลวดทางค้ำน
หุติยภูมิที่ระยะต่าง ๆ เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)

ระยะทาง	V_{in}			I_{in}			$\cos \theta$			V_{out}
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
0	221	230	220	7.7	8.1	7.69	0.11	0.15	0.05	1.88
0.03	220	229	220	7.42	8.9	7.48	0.13	0.12	0.08	65.2
0.06	223	233	224	8.34	9.32	7.92	0.14	0.11	0.09	152
0.09	220	232	223	8.14	8.92	8.09	0.12	0.12	0.09	232.9
0.12	220	231	221	7.49	8.48	7.66	0.11	0.14	0.06	285
0.15	218	229	219	7.33	8.31	7.44	0.09	0.13	0.08	260
0.18	219	232	220	8.38	9.53	8.62	0.1	0.14	0.06	244

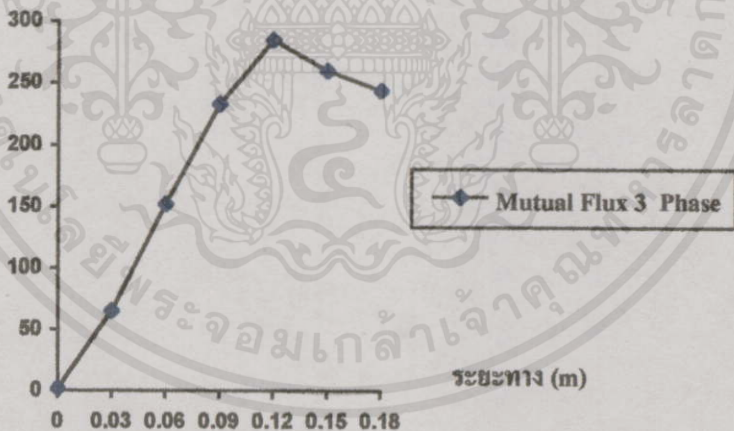
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าทาง
ด้านทุติยภูมิ (v)



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง Mutual Flux แต่ละเฟสที่กระทำต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิ
เมื่อเลื่อนแกนเหล็กที่ระยะต่าง ๆ โดยมีการวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)

แรงดันไฟฟ้าทาง
ด้านทุติยภูมิ (v)



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง Mutual Flux ทั้งสามเฟส ที่กระทำต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิ
เมื่อเลื่อนแกนเหล็กที่ระยะต่าง ๆ โดยมีการวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

สิ่งที่สำคัญที่สุดหลังจากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า คือ การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงประสิทธิภาพที่แท้จริงของหม้อแปลงไฟฟ้า ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีการทดสอบประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับระหว่างการวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) และการวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing) โดยโหลดที่ใช้คือโหลดความต้านทานทดสอบครั้งละ 200 วัตต์ โดยจะทดสอบที่ระยะ 0 m , 0.03m , 0.06 m , 0.09 m , 0.12 m , 0.15 m และ 0.18 m บันทึกผลการทดสอบดังตารางที่ 4.17 ถึง 4.30

ตารางที่ 4.17 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) ที่ระยะ 0 m

Load R	V_{in}			I_{in}			Power Factor			P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	% η
	A	B	C	A	B	C	A	B	C					
No- Load	222	214	215	7.51	7	7.84	0.07	0.2	0.06	517.44	2.53	-	-	-

ตารางที่ 4.18 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) ที่ระยะ 0.03 m

Load R	V_{in}			I_{in}			Power Factor			P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	% η
	A	B	C	A	B	C	A	B	C					
No- Load	221	213	214	6.97	6.57	7.35	0.09	0.19	0.07	514.62	38	-	-	-
1	242	234	236	9.43	8.60	9.85	0.08	0.19	0.08	750.88	38	0.2	7.6	1.01
2	253	244	245	10.5	9.80	11.0	0.09	0.18	0.09	885	38	0.4	15.2	1.70
3	264	259	259	12.5	11.50	12.90	0.12	0.16	0.10	1214	38	0.9	34.64	2.85
4	274	265	265	13.4	12.40	13.80	0.12	0.15	0.09	1262	38	1.1	41	3.2

ตารางที่ 4.19 การทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) ที่ระยะ 0.06 m

Load R	V_{in}			I_{in}			Power Factor			P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	% η
	A	B	C	A	B	C	A	B	C					
No- Load	220	211	212	7.26	6.31	7.13	0.09	0.18	0.09	519.44	105	-	-	-
1	228	218	219	8.05	6.94	7.84	0.09	0.18	0.09	592.03	105	0.3	31.5	7.17
2	247	238	240	10.4	8.89	10.2	0.12	0.19	0.09	930.58	105	0.7	73.71	7.9
3	252	244	244	11.3	9.46	10.9	0.13	0.18	0.09	1025.03	105	1.0	105	10.24
4	273	263	264	14.2	12	13.5	0.15	0.18	0.11	1541.61	105	1.4	148.26	9.0

ตารางที่ 4.20 การทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง
(Unskewing) ที่ระยะ 0.09 m

Load R	V_{in}			I_{in}			Power Factor			P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	% η
	A	B	C	A	B	C	A	B	C					
No- Load	221	215	215	8.14	7.34	7.69	0.1	0.19	0.05	562.4	171	-	-	-
1	234	226	226	9.27	8.18	8.63	0.11	0.22	0.07	781.8	171	0.5	85.5	10.9
2	248	239	239	10.9	9.47	10.0	0.12	0.24	0.06	1010.98	171	1.0	171.5	16.96
3	263	254	256	13.3	11.6	12.3	0.13	0.24	0.08	1413.76	171	1.5	256.8	18.16
4	272	262	265	14.7	13.1	13.5	0.14	0.25	0.08	1704.03	171	1.9	311.4	18.28

ตารางที่ 4.21 การทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง
(Unskewing) ที่ระยะ 0.12 m

Load R	V_{in}			I_{in}			Power Factor			P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	% η
	A	B	C	A	B	C	A	B	C					
No- Load	220	214	214	7.4	7.54	7.73	0.07	0.21	0.06	552.06	253.5	-	-	-
1	226	218	219	7.76	8.06	7.9	0.08	0.25	0.11	762.89	254.3	0.5	127.15	16.6
2	231	222	224	8.11	8.85	8.12	0.07	0.29	0.15	973.73	253	1.2	303.6	31.17
3	244	235	237	9.3	10.6	9.48	0.08	0.30	0.18	1333.8	253	1.8	455.4	34.14
4	253	243	245	10.2	11.9	10.3	0.09	0.31	0.20	1651.92	254	2.5	635	38.44
5	263	252	256	11.5	13.5	11.9	0.1	0.32	0.22	2061.29	253.5	3.2	811.2	39.35
6	272	260	265	12.7	15.2	13.1	0.11	0.31	0.23	2403.5	253.5	3.8	963.3	40.07
7	273	260	264	12.7	15.6	13.3	0.11	0.32	0.25	2557.1	244	4.4	1073.6	41.9

ตารางที่ 4.22 การทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง
(Unskewing) ที่ระยะ 0.15 m

Load R	V_{in}			I_{in}			Power Factor			P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	% η
	A	B	C	A	B	C	A	B	C					
No- Load	221	210	210	7.18	6.59	7.39	0.08	0.17	0.09	501.87	294	-	-	-
1	234	223	224	8.19	7.90	9.11	0.11	0.18	0.17	889.04	294.4	0.6	176.64	19.86
2	238	227	227	8.23	8.40	9.8	0.15	0.18	0.23	1148.69	294.5	1.3	382.70	33.3
3	245	235	235	8.70	9.36	10.9	0.17	0.18	0.25	1398.65	294.3	2.0	589	42.1
4	249	238	238	9.06	9.47	11.7	0.22	0.19	0.3	1782.5	294.3	2.8	824	46.23
5	254	243	243	9.32	10.50	12.4	0.24	0.19	0.33	2270.96	294.3	3.5	1030	48.5
6	258	247	247	9.75	11.2	13.3	0.27	0.19	0.34	2321.73	294.1	4.2	1235.2	53.2
7	267	253	252	10.5	12.1	14.6	0.28	0.19	0.36	2691.14	294.7	4.9	1441.5	53.56
8	271	257	257	11	12.8	15.8	0.32	0.19	0.37	3081.36	294.5	5.6	1649.2	53.52
9	271	257	256	11.2	12.8	16	0.35	0.18	0.39	3223.43	284	6.1	1733.6	53.78

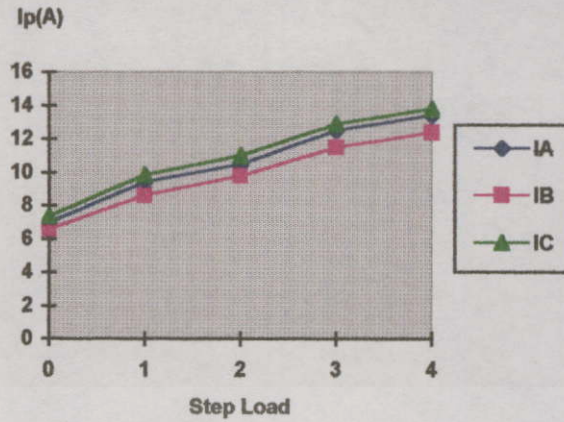
ตารางที่ 4.23 การทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) ที่ระยะ 0.18 m

Load R	V_{in}			I_{in}			Power Factor			P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	% η
	A	B	C	A	B	C	A	B	C					
No- Load	220	210	209	7.51	6.94	7.59	0.08	0.19	0.09	551.84	274	-	-	-
1	237	225	225	9.01	8.11	9.37	0.14	0.22	0.08	869.5	274.1	0.6	164.4	18.9
2	240	229	230	9.61	8.31	10.1	0.2	0.22	0.09	1069.97	274.3	1.3	356.2	33.2
3	243	232	234	10.1	8.45	10.7	0.25	0.25	0.09	1329.02	274.4	2.0	548	41.2
4	251	239	240	10.9	8.86	11.6	0.29	0.25	0.11	1629	274	2.7	739.8	45.4
5	252	239	240	11.5	9.04	12	0.32	0.27	0.11	1825	274.2	3.3	904.2	49.84
6	255	245	246	12.5	9.47	12.9	0.34	0.27	0.13	2122.73	274.6	4.0	1086	51.6
7	261	249	251	12.8	9.91	13.5	0.36	0.28	0.12	2300.23	274	4.7	1287.8	53.98
8	267	257	255	14.2	10.4	14.6	0.37	0.29	0.13	2656.66	274	5.4	1479.6	54.8
9	268	259	258	14.8	10.6	15.1	0.4	0.31	0.14	2983.05	271	6	1626	54.5

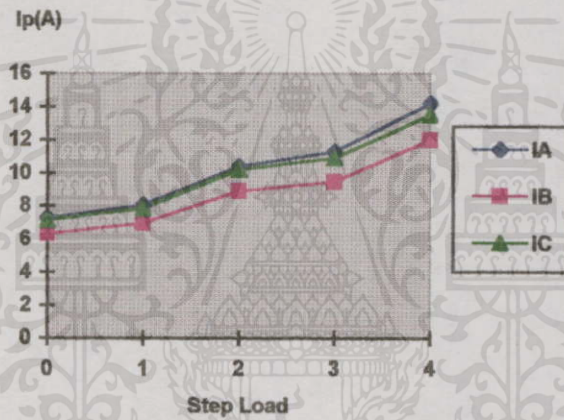


รูปที่ 4.32 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะต่าง ๆ เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)

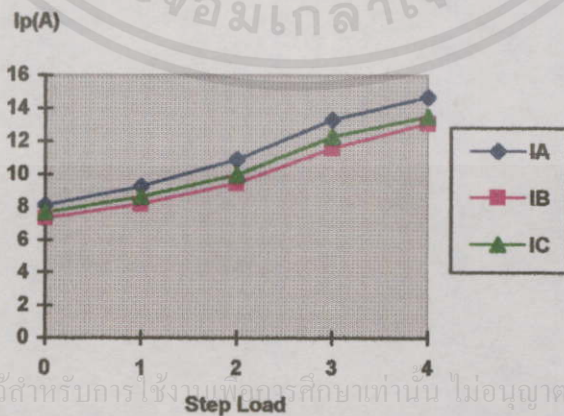
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.03 m
เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)



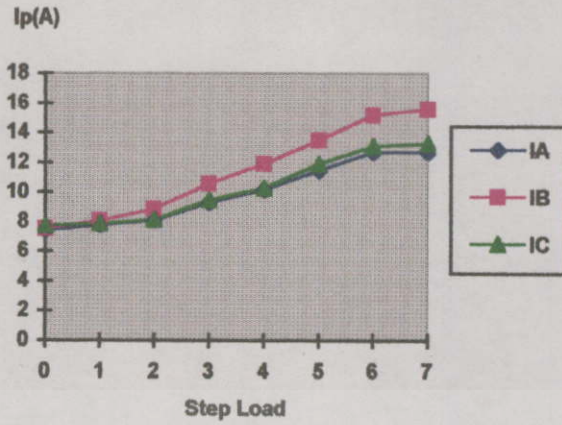
รูปที่ 4.34 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.06 m
เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)



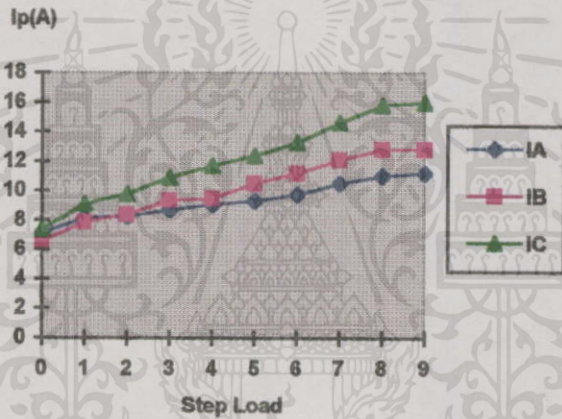
รูปที่ 4.35 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.09 m
เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

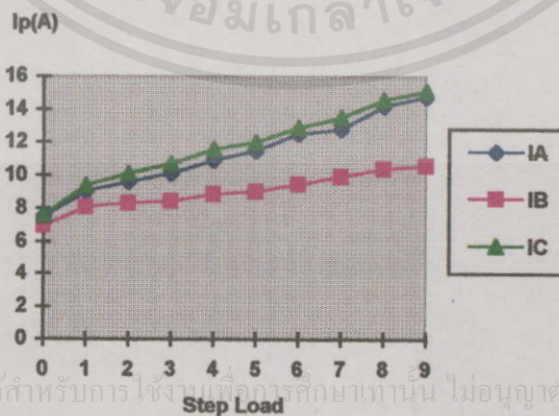
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.12 m เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)



รูปที่ 4.37 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.15 m เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.38 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.18 m เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing)

ตารางที่ 4.24 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็ก
ในแนวเอียง(Skewing) ที่ระยะ 0 m

Load R	V_{in}			I_{in}			Power Factor			P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	% η
	A	B	C	A	B	C	A	B	C					
No- Load	221	230	223	7.7	8.1	7.69	0.11	0.15	0.05	552.38	1.88	-	-	-

ตารางที่ 4.25 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็ก
ในแนวเอียง(Skewing) ที่ระยะ 0.03 m

Load R	V_{in}			I_{in}			Power Factor			P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	% η
	A	B	C	A	B	C	A	B	C					
No- Load	220	229	220	7.42	8.9	7.48	0.13	0.12	0.08	588.43	65.2	-	-	-
1	226	237	229	8.25	9.71	8.29	0.13	0.14	0.07	697.45	65.2	0.45	29.34	4.20
2	239	248	240	9.35	10.7	9.33	0.14	0.14	0.07	841.04	65.2	0.75	48.9	5.81
3	257	267	260	11.6	13	11.7	0.16	0.14	0.07	1175.8	65.2	1.07	69.76	5.93
4	270	281	272	13.5	15.1	13.6	0.17	0.15	0.08	1552	65.2	1.37	89.32	5.75
5	271	281	274	13.7	15.2	14	0.17	0.16	0.08	1621.4	61.5	1.63	106.27	6.55

ตารางที่ 4.26 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็ก
ในแนวเอียง(Skewing) ที่ระยะ 0.06 m

Load R	V_{in}			I_{in}			Power Factor			P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	% η
	A	B	C	A	B	C	A	B	C					
No- Load	223	233	224	8.34	9.32	7.92	0.14	0.11	0.09	658.91	152	-	-	-
1	233	243	234	9.1	10	8.88	0.15	0.14	0.09	845.25	152	0.61	92.72	10.96
2	254	255	247	10.5	11.4	10.4	0.16	0.15	0.1	1119.65	152	1.09	165.68	14.79
3	261	271	264	12.6	13.3	12.6	0.16	0.15	0.1	1399.46	152	1.59	241.68	17.26
4	273	283	275	14.2	15	14.3	0.17	0.16	0.1	1731.47	152	2.08	316.16	18.25
5	274	284	276	14.2	15.3	14.6	0.16	0.17	0.11	1804.46	143	2.51	358.93	19.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.27 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็ก
ในแนวเอียง(Skewing) ที่ระยะ 0.09 m

Load R	V_{in}			I_{in}			Power Factor			P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	% η
	A	B	C	A	B	C	A	B	C					
No- Load	220	232	223	8.14	8.92	8.09	0.12	0.12	0.09	625.59	232.9	-	-	-
1	227	236	228	8.49	9.29	8.7	0.16	0.15	0.09	815.74	232.9	0.76	177	21.69
2	239	249	246	9.55	10.6	10	0.18	0.17	0.1	1105.53	232.9	1.42	330.71	29.91
3	250	262	254	11	12.3	11.5	0.19	0.19	0.11	1456.1	232.9	2.07	482.1	33.10
4	266	275	268	12.7	14.4	13.4	0.21	0.2	0.11	1896.45	232.9	2.73	635.81	33.52
5	272	282	275	13.6	15.8	14.6	0.21	0.21	0.1	2114	226	3.33	752.58	35.59

ตารางที่ 4.28 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็ก
ในแนวเอียง(Skewing) ที่ระยะ 0.12 m

Load R	V_{in}			I_{in}			Power Factor			P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	% η
	A	B	C	A	B	C	A	B	C					
No- Load	220	231	221	7.49	8.48	7.66	0.11	0.14	0.06	555.13	285	-	-	-
1	222	232	223	7.63	8.99	7.51	0.17	0.16	0.06	722.14	285	0.75	213.75	29.59
2	230	239	230	8.2	9.72	7.91	0.24	0.19	0.07	1021.37	285	1.4	399	39.06
3	235	246	237	8.94	10.7	8.32	0.29	0.19	0.09	1286.84	285	2.09	595.65	46.28
4	244	254	246	10	12.1	9.07	0.32	0.19	0.09	1634.42	285	2.79	795.15	48.65
5	251	262	259	11.2	13.5	9.61	0.35	0.2	0.12	1989.99	285	3.48	991.8	49.83
6	260	270	264	12.7	15.3	10.8	0.36	0.2	0.12	2357.06	285	4.17	1188.4	50.42
7	265	277	270	14	16.7	11.5	0.37	0.2	0.13	2701.53	285	4.84	1379.4	51.05
8	273	284	278	15.3	18.1	12.4	0.36	0.2	0.14	3014.12	282	5.49	1548.1	51.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.29 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็ก
ในแนวเอียง(Skewing) ที่ระยะ 0.15 m

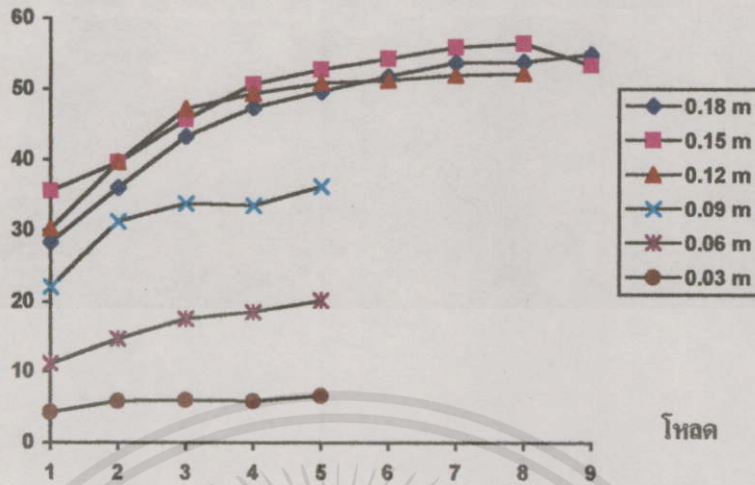
Load R	V_{in}			I_{in}			Power Factor			P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	% η
	A	B	C	A	B	C	A	B	C					
No- Load	218	229	219	7.33	8.31	7.14	0.09	0.13	0.08	521.55	260	-	-	-
1	221	232	221	7.81	8.54	7.36	0.13	0.14	0.13	713.22	260	0.96	249.6	34.99
2	225	237	226	8.4	8.78	7.48	0.16	0.15	0.20	952.62	260	1.36	353.6	37.11
3	231	243	231	9.18	9.3	7.83	0.18	0.15	0.25	1172.87	260	2.03	527.8	45
4	237	248	239	10.1	9.86	8.37	0.20	0.15	0.28	1405.65	260	2.7	702	49.94
5	242	254	243	11.1	10.4	8.88	0.21	0.16	0.32	1685.04	260	3.36	873.6	51.84
6	246	260	247	12.1	11.1	9.67	0.23	0.15	0.35	1953.89	260	4.02	1045.2	53.49
7	255	266	258	13.5	11.9	10.9	0.24	0.14	0.34	2225.5	260	4.72	1227.2	55.14
8	260	273	262	14.8	12.8	11.7	0.24	0.14	0.36	2516.28	260	5.39	1401.4	55.69
9	266	279	270	16.2	13.7	12.8	0.25	0.15	0.39	2998.48	260	6.06	1575.6	52.54

ตารางที่ 4.30 การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็ก
ในแนวเอียง(Skewing) ที่ระยะ 0.18 m

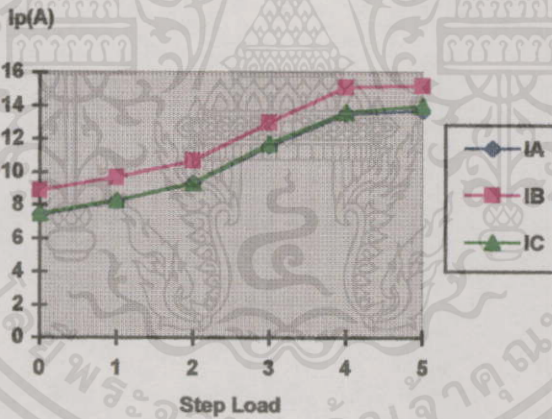
Load R	V_{in}			I_{in}			Power Factor			P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	% η
	A	B	C	A	B	C	A	B	C					
No- Load	219	232	220	8.38	9.53	8.62	0.1	0.14	0.06	606.84	244	-	-	-
1	223	236	224	8.69	9.68	8.91	0.09	0.18	0.09	758.86	244	0.86	209.8	27.65
2	228	243	228	9.16	9.81	9.58	0.11	0.23	0.12	1040.12	244	1.49	363.5	34.95
3	233	246	235	9.61	10.3	10.5	0.11	0.25	0.15	1214.87	244	2.15	524.6	41.97
4	239	249	240	10	10.5	11.3	0.12	0.28	0.17	1479.9	244	2.81	685.6	46.33
5	245	255	244	10.6	11.1	12.3	0.12	0.31	0.18	1729.31	244	3.45	841.8	48.67
6	250	262	250	11.2	11.7	13.4	0.12	0.33	0.19	1984.08	244	4.11	1002.8	50.54
7	255	268	256	11.9	12.6	14.4	0.11	0.34	0.2	2219.18	244	4.76	1161.4	52.33
8	261	275	261	12.8	13.5	15.6	0.1	0.35	0.22	2529.2	244	5.43	1324.9	52.38
9	268	280	267	13.5	14.4	17	0.1	0.35	0.22	2771.58	244	6.11	1490.8	54.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพ

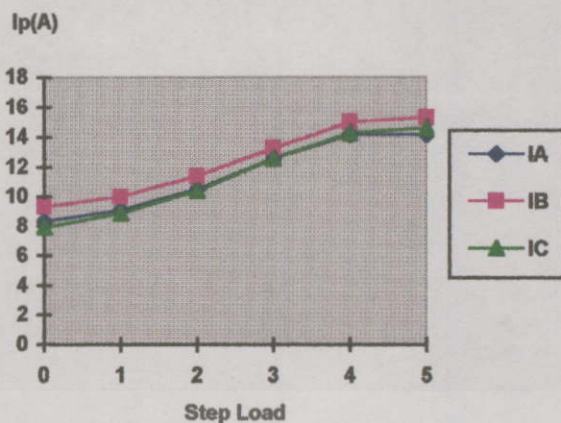


รูปที่ 4.39 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะต่าง ๆ เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)

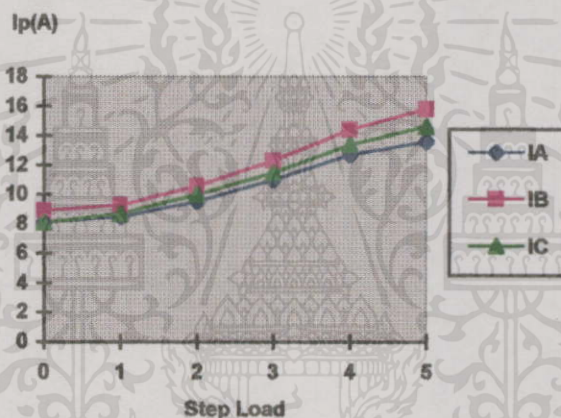


รูปที่ 4.40 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.03 m เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)

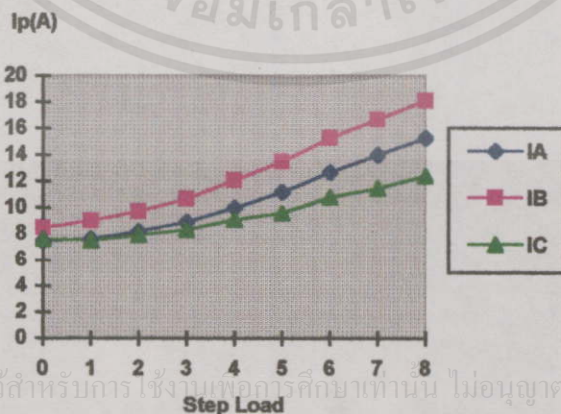
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 กระแสทางด้นปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.06 m
เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)



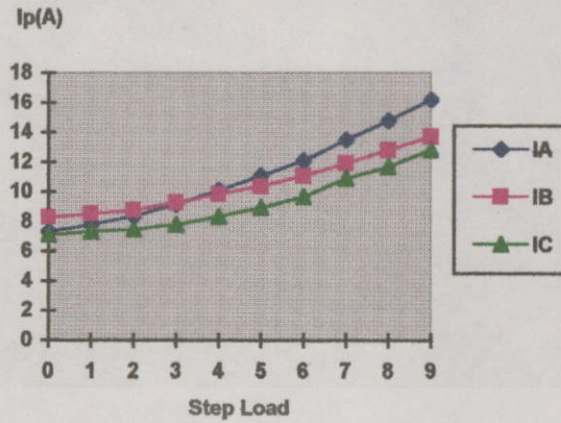
รูปที่ 4.42 กระแสทางด้นปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.09 m
เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)



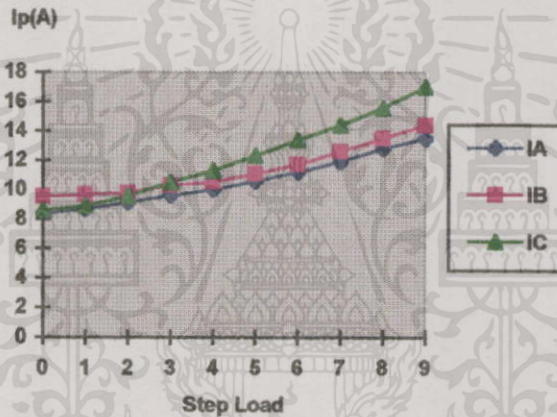
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.43 กระแสทางด้นปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.12 m
เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)



รูปที่ 4.44 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.15 m เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)



รูปที่ 4.45 กระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่ระยะ 0.18 m เมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing)

4.7 บทสรุป

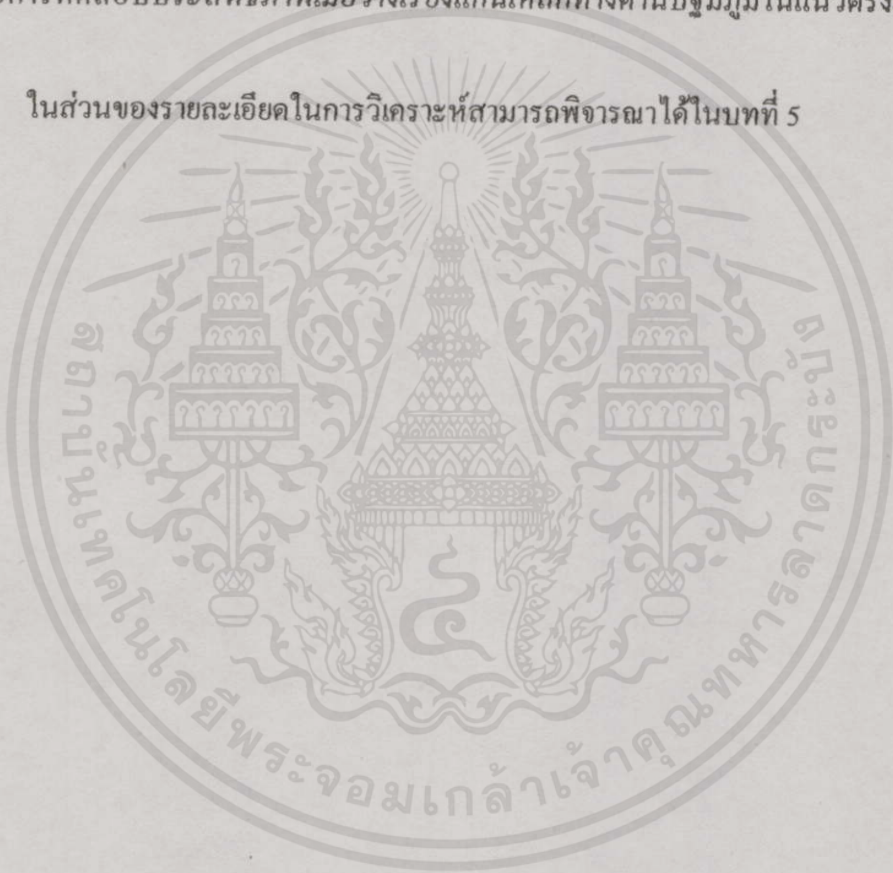
ในส่วนของการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะแบ่งการทดสอบ 5 ส่วนด้วยกันคือ

1. การทดสอบแกนเหล็ก M5 ซึ่งเป็นแกนเหล็กที่ใช้ในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการทดสอบแกนเหล็กจะอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบแกนเหล็ก IEEE STD 393-1991 ที่ความถี่ 50 Hz และ 60 Hz และใช้สมการเอ็มไพริคัลแยกกำลังไฟฟ้าสูญเสียออกเป็น 2 ส่วนคือการสูญเสียฮิสเทอรีซิสและการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

2. การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะแบ่งการทดสอบออก 3 ส่วนด้วยกันคือการทดสอบแบบเปิดวงจร (Open Circuit Test) , การทดสอบแบบลัดวงจร (Short Circuit Test) และการทดสอบ V-I Method

3. การทดสอบผลกระทบของการทำสกีวอิ่งทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจะแบ่งออก 2 ส่วนด้วยกันคือการทดสอบเมื่อวางเรียงแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิในแนวตรงและแนวเอียง
4. การทดสอบการเกี่ยวค้ำของเส้นแรงแม่เหล็กจะแบ่งการทดสอบออก 2 ส่วนคือการทดสอบการเกี่ยวค้ำของ Mutual Flux ในแต่ละเฟสและ Mutual Flux ทั้งสามเฟสที่กระทำต่อขดลวดทางด้านปฐมภูมิโดยมีการเปรียบเทียบกันระหว่างการวางเรียงแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิในแนวตรงและแนวเอียง
5. การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าจะแบ่งการทดสอบออก 2 ส่วนด้วยกันคือการทดสอบประสิทธิภาพเมื่อวางเรียงแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิในแนวตรงและแนวเอียง

ในส่วนของรายละเอียดในการวิเคราะห์สามารถพิจารณาได้ในบทที่ 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

5.1 บทนำ

จากที่กล่าวมาในบทที่ 4 ของวิทยานิพนธ์ถึงการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในส่วนของการวิเคราะห์ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 6 ส่วนด้วยกัน คือ

1. วิเคราะห์การทดสอบแกนเหล็ก
2. วิเคราะห์การทดสอบค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า
3. วิเคราะห์ผลกระทบของการทำสกีวอิ้งของหม้อแปลงไฟฟ้า
4. วิเคราะห์การเกี่ยวข้องของเส้นแรงแม่เหล็ก
5. วิเคราะห์การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า
6. วิเคราะห์ผลกระทบของขอบที่มีต่อหม้อแปลงไฟฟ้า

โดยสามารถพิจารณารายละเอียดได้ในหัวข้อถัดไป

5.2 วิเคราะห์การทดสอบแกนเหล็ก

จากการทดสอบแกนเหล็ก M5 ซึ่งเป็นแกนเหล็กที่ใช้ในการออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถสรุปได้ดังนี้

5.2.1 ลักษณะของ B - H Curve

ลักษณะของ B - H Curve ของแกนเหล็ก M5 จากรูปที่ 4.4 ที่ความถี่ 50 Hz และ 60 Hz มีลักษณะของเส้นกราฟคล้ายคลึงกันมากจนเส้นกราฟเกือบจะทับกันพอดี ทำให้สามารถกล่าวได้ว่า B - H ของแกนเหล็กชนิดใด ๆ ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ไฟฟ้า ทั้งนี้ เนื่องจากที่ค่า B_{max} ใด ๆ อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่ไฟฟ้าของวงจรแม่เหล็กที่มีจำนวนรอบและพื้นที่หน้าตัดเป็นค่าคงที่ นั่นคือ ค่า B_{max} จะคงที่ค่า ๆ หนึ่ง ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงจะเป็นตัวกำหนดขนาดของแรงดันไฟฟ้า เมื่อพิจารณาจาก B - H Curve สามารถสรุปได้ว่า ค่า B_{max} เพิ่มขึ้นเมื่อค่า H_{max} เพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มขึ้นจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ นั่นหมายถึงความสามารถในการซึมซับพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็กมีค่าลดลง โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นจะมีค่าสูงสุดในช่วงแรกของ B - H Curve

5.2.2 ลักษณะของกราฟ P_c กับ B_{max}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ค่าของ P_c ที่ได้จากการทดสอบจากรูปที่ 4.2 เมื่อนำมาพล็อตรวมกับค่า B_{max} ไม่ว่าจะถี่ใดๆทั้งสิ้น อีกหนึ่งสมมติให้คิดแปลงเป็นหน่วยและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารบางครั้งที่มีการนำไปใช้พบว่า ค่า P_c จะเพิ่มขึ้น เมื่อ B_{max} เพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นสูง นั่นหมายความว่าความถี่การเพิ่มขึ้นของค่า P_c จะสูงขึ้นอย่างมากเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า B_{max} ในแต่ละช่วงเพียงเล็กน้อยและความถี่

จะมีผลต่อค่า P_c โดยพิจารณาจากการทดสอบแกนเหล็กที่ความถี่ 50 Hz และ 60 Hz ที่ค่า B_{max} เดียวกัน ค่าของ P_c ที่ความถี่ 60 Hz จะมีค่ามากกว่าค่า P_c ที่ความถี่ 50 Hz จึงสรุปได้ว่า ที่ค่า B_{max} ใด ๆ ค่า P_c ที่มีความถี่สูง จะมีค่าสูญเสียแกนเหล็กมากกว่าที่ความถี่ต่ำกว่า [5,7,13]

5.2.3 ลักษณะของกราฟ P_a กับ B_{max}

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P_a กับ B_{max} จากรูปที่ 4.3 บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อทำการเพิ่ม B_{max} ในแต่ละช่วงโดย B_{max} มีค่าสูงขึ้น ค่า P_a ยิ่งสูงขึ้น จากการทดสอบที่ความถี่ 50 Hz และ 60 Hz จะพบว่าค่า P_a ที่ความถี่ 60 Hz จะมีค่ามากกว่า P_a ที่ความถี่ 50 Hz นั้นหมายความว่าความถี่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า P_a โดยที่ค่า B_{max} ใด ๆ ที่ความถี่สูง ๆ ค่า P_a จะมีค่ามากกว่าที่ความถี่ต่ำ ๆ

5.2.4 วิเคราะห์การแยกค่าสูญเสียฮิสเทอรีซิสและกระแสไหลวน

ในการวิเคราะห์การแยกค่าสูญเสียฮิสเทอรีซิสและกระแสไหลวน ได้มีการพัฒนาวิธีการแบ่งแยกค่าสูญเสีย 4 วิธีด้วยกันดังนี้คือ [16]

1. Two Frequency Method
2. Form Factor Method
3. Temperature Method
4. D.C. Hysteresis Method

วิธีการของ Two Frequency Method , Form Factor Method และ D.C.Hysteresis Method เป็นหลักเทคนิคที่เหมาะสมของการแบ่งแยกค่าสูญเสียฮิสเทอรีซิสและกระแสไหลวน ส่วนวิธีการของ Temperature Method เป็นการรวบรวมเทคนิคใหม่สำหรับการแบ่งแยกค่าสูญเสีย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์จะนำเสนอวิธีการของ Two Frequency Method ในการวิเคราะห์ [4,12,13,16] ดังนั้น ค่าสูญเสียในแกนเหล็กประกอบด้วย

$$P_c = P_h + P_e \quad (5.1)$$

เมื่อ

$$P_h = K_h \cdot B_{max}^x \cdot f \quad 1.5 < x < 2.5 \text{ โดยทั่วไปจะใช้}$$

ค่า x นี้ประมาณ 1.6

$$P_e = K_e \cdot B_{max}^2 \cdot f^2$$

กำหนดให้

$$I = K_h \cdot B_{max}^x$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J = K_e \cdot B_{max}^2$$

ดังนั้น

$$P_c = I \cdot f + J \cdot f^2 \quad (5.2)$$

พิจารณาที่ความถี่ 50 Hz $P_{c,50Hz}$

$$\frac{P_{c,50}}{50} = I + 50J \quad (5.3)$$

พิจารณาที่ความถี่ 60 Hz $P_{c,60Hz}$

$$\frac{P_{c,60}}{60} = I + 60J \quad (5.4)$$

ทำการแก้สมการ (5.3) และ (5.4) จะได้ค่า I, J ซึ่งสามารถคำนวณค่าสูญเสียฮิสเทอรีซิสและกระแสไหลวนได้จากสมการที่ (5.5) และ (5.6)

$$P_h = I \times f \quad (5.5)$$

$$P_c = J \times f^2 \quad (5.6)$$

5.2.5 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส

การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิสของแกนเหล็กที่ความถี่คงที่ใด ๆ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ B_{max} เพิ่มขึ้นในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น นั่นคือ เมื่อค่า B_{max} มีค่าสูงขึ้น ค่า P_h จะมีค่าสูงมากขึ้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่า K_h และค่า B_{max} ที่ยกกำลัง x โดยค่า x คือดัชนีสไตน์เมทซ์ (Steinmetz's Index) จะมีค่าเท่ากับ 1.6 การที่ค่าสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิสเปลี่ยนแปลงตามค่า B_{max} นั้นเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของค่า μ_r โดยเมื่อค่า B_{max} มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่า μ_r จะมีค่าลดลงจึงจำเป็นต้องเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กเพื่อให้ได้ค่า B_{max} นั้นๆ จึงทำให้การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิสเปลี่ยนแปลงตามค่า B_{max} และที่ค่า B_{max} เดียวกันเมื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 50 Hz และ 60 Hz ค่า P_h ที่ความถี่ 60 Hz จะมีค่าสูงกว่าค่า P_h ที่ความถี่ 50 Hz ในทุกๆ ค่าของ B_{max} ทั้งนี้เนื่องจากการสั้นและกลับทิศของสนามแม่เหล็กของโดเมนของแกนเหล็ก ดังนั้นยิ่งความถี่สูงจึงทำให้ต้องใช้พลังงานในการกลับทิศของสนามแม่เหล็กมากขึ้น

5.2.6 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่ความถี่คงที่ใดๆ จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ B_{max} มีค่าเพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของ P_c จะไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องมาจากผลของค่า B_{max} และความถี่ที่ยกกำลัง 2 เมื่อพิจารณาที่ค่า B_{max} เดียวกัน ความถี่ที่มีผลต่อค่า P_c โดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ความถี่ 50 Hz และ 60 Hz ค่า P_c ที่ความถี่ 60 Hz จะมีมากกว่าค่า P_c ที่ความถี่ 50 Hz ในทุกๆ ค่าของ B_{max} ที่คงที่ การที่ค่า P_c เปลี่ยนแปลงตามความถี่และ B_{max} ที่ยกกำลัง 2 นั้นเนื่องมาจากกฎการเหนี่ยวนำของแรงดันไฟฟ้าที่แปรผันตรงกับความถี่และ B_{max} จากการเปรียบเทียบค่า P_h และ

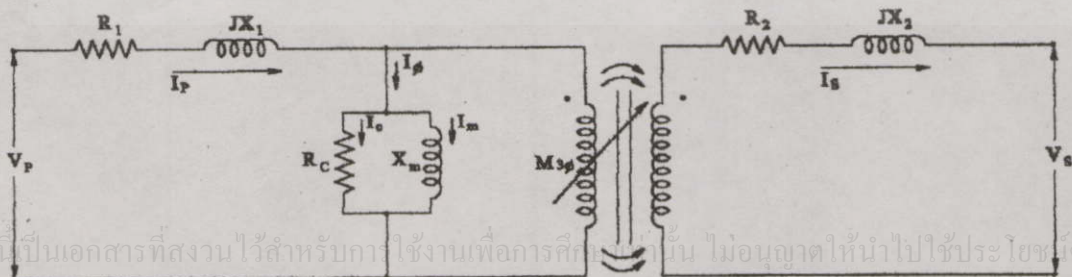
ค่า P_c ของแกนเหล็ก M5 เมื่อพิจารณาค่า B_{max} และความถี่ที่ค่าเดียวกันจะพบว่าค่า P_c จะมีค่ามากกว่าค่า P_h นั้นแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการลดค่าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนของแกนเหล็ก โดยสามารถลดการสูญเสียในส่วนนี้ได้โดยการเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กที่มีสภาพความต้านไฟฟ้าสูงและความหนาของแผ่นลามินเนทบางๆมาใช้งาน[4,7,11,12,13,16]

5.3 วิเคราะห์การทดสอบค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

สิ่งที่จำเป็นหลังจากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าคือการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือการทดสอบแบบเปิดวงจร (Open Circuit Test) ทำให้ทราบค่าของกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า (Core Losses), การทดสอบแบบลัดวงจร (Short Circuit Test) เพื่อทราบถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียของขดลวด (Copper Losses) และการทดสอบ V-I Method ทำให้ทราบถึงค่าพารามิเตอร์ R_1 , R_2 โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 5.1 จากรายละเอียดในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลย์ได้ดังตารางรูปที่ 5.1 สำหรับการปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมินั้นสามารถทำได้โดยการปรับเลื้อนแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิเพื่อให้มีขวลฟลักซ์เหนี่ยวนำขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่ระยะต่างๆ

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

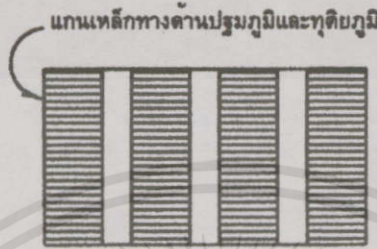
R_1	0.68 โอห์มต่อเฟส
R_2	2.85 โอห์มต่อเฟส
R_c	226.10 โอห์มต่อเฟส
X_m	25.11 โอห์มต่อเฟส
Core Losses	605 W
Copper Losses	516 W



รูปที่ 5.1 วงจรสมมูลย์ต่อเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้า

5.4 วิเคราะห์การทดสอบผลกระทบของการทำสกีวอิงของหม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับการทดสอบผลกระทบของการทำสกีวอิงของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะมีการทดสอบ 2 ส่วนคือแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิจะวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) และแนวเอียง (Skewing) ดังรูปที่ 5.2 (ก)และ(ข) ดังนั้นเพื่อให้่ายในการวิเคราะห์สามารถพิจารณา



รูปที่ 5.2 ก) การวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง



รูปที่ 5.2 ข) การวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง

จากผลการทดสอบผลกระทบของการทำสกีวอิงของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อวางเรียงแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิในแนวตรงและแนวเอียง จะเห็นว่าการวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียงจะทำให้แรงดัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ 0.03 0.06 0.09 0.12 0.15 0.18 ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.3 ฮาร์มอนิกส์ของแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะต่างๆ

ไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิมีปริมาณฮาร์มอนิกส้นน้อยกว่าการวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง ทั้งนี้เนื่องจากการทำสวิตจิงจะลดฮาร์มอนิกส้นในช่องว่างอากาศ (Space Harmonic) นั้นเองและเมื่อพิจารณาที่ระยะ 0.03 - 0.12 m จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิมีปริมาณฮาร์มอนิกส้นมากกว่าที่ระยะ 0.15 - 0.18 m นั้นเนื่องจากมีวาลฟลักซ์ที่เหนี่ยวนำกับร่องสล๊อทที่ไม่มีแกนขดลวดนั่นเอง

5.5 วิเคราะห์การทดสอบการเกี่ยวคล้องของเส้นแรงแม่เหล็ก

สำหรับการทดสอบการเกี่ยวคล้องของเส้นแรงแม่เหล็กนั้นจะมีการเปรียบเทียบกันระหว่างการวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) และการวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing) โดยการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือการทดสอบการเกี่ยวคล้องของ Mutual Flux ในแต่ละเฟสที่กระทำต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่ระยะต่างๆและการทดสอบการเกี่ยวคล้องของ Mutual Flux ทั้งสามเฟสที่กระทำต่อขดลวดทุติยภูมิที่ระยะต่างๆ ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์การเกี่ยวคล้องของเส้นแรงแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเริ่มต้นพิจารณาจากสนามแม่เหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้าจากรูปที่ 5.4 (a) ที่แสดงขดลวดจำนวน N รอบที่มีการพันขดลวดแบบ Full Pitch ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีโรเตอร์แบบ Cylindrical Rotor โดยแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่แสดงดังรูป 5.4 (b) มีค่าเท่ากับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ตลอดความยาวของช่องว่างอากาศ ดังนั้นความเข้มของสนามแม่เหล็กสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5.7) และจากรูปที่ 5.4 (c)

$$H = \frac{F}{g} \quad (5.7)$$

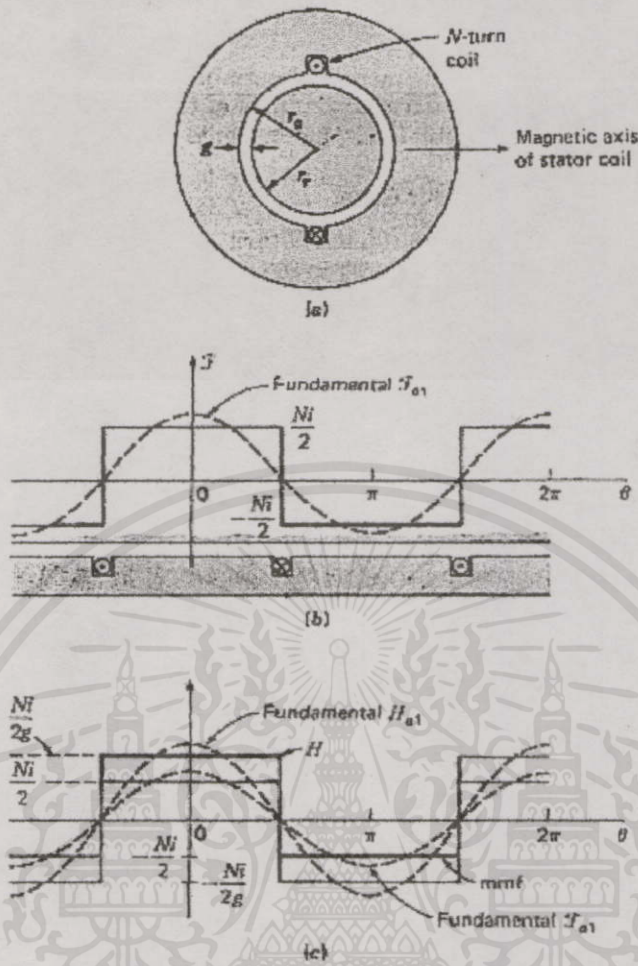
ในส่วนของ Fundamental ของความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.8) และ (5.9)[9]

$$H_{a1} = \frac{F_{a1}}{g} = \frac{4 Ni}{\pi 2g} \cos \theta \quad (5.8)$$

$$H_{a1} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_{ph}}{Pg} i_a \cos \theta \quad (5.9)$$

เมื่อ N_{ph} : จำนวนขดลวดต่อเฟส
 θ : มุมองศาทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับแฟลคเตอร์การพันขดลวดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แรงเคลื่อนแม่เหล็กและความเข้มสนามแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

ในส่วนของโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้านั้น ได้มาจากการผ่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าแล้วคลี่ออกมา ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ในแนวระนาบ ดังนั้นมุม θ ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะถูกแทนด้วยระยะทาง z ดังรูปที่ 5.5 ส่วนประกอบของแรงเคลื่อนแม่เหล็กสามารถพิจารณาจากสมการที่ (5.10) และ(5.11)

$$H_{a1} = \frac{4}{\pi} \frac{Ni}{2g} \cos \frac{2\pi z}{\beta} \tag{5.10}$$

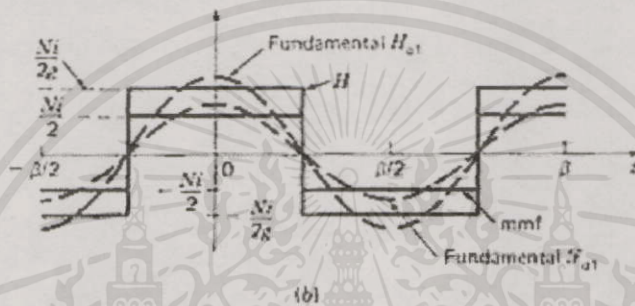
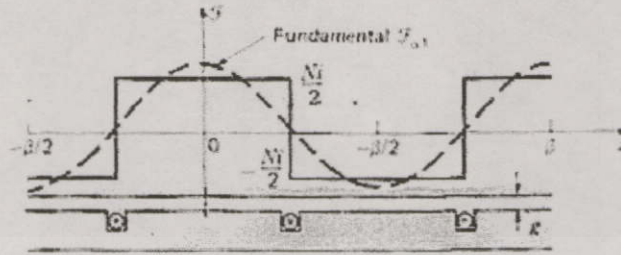
$$H_{a1} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_{ph} i}{2mg} \cos \frac{2\pi z}{\beta} \tag{5.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ β : ความยาวคลื่น

ดังนั้นผลรวมของสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ในแนวระนาบของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.12)



รูปที่ 5.5 แรงเคลื่อนแม่เหล็กและความเข้มสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า

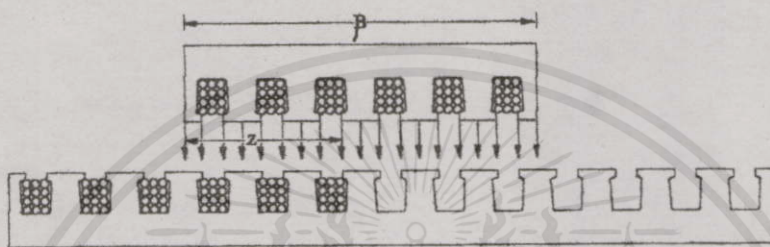
$$F(\theta, t) = \frac{3}{2} F_{max} \cos\left(\frac{2\pi z}{\beta} - \omega t\right) \tag{5.12}$$

ขนาดของสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ในแนวระนาบจะเท่ากับ

$$F_{peak} = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} (1) \frac{132 \times 15}{2} = 1890 \text{ A.turns/Pole}$$

ในส่วนของการทดสอบการเกี่ยวค้ำของ Mutual Flux ในแต่ละเฟสที่กระทำต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) จากรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจะวางขดลวดในแต่ละเฟสห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า , Spread of Phase Group (σ) เท่ากับ 60 องศาทางไฟฟ้า ดังนั้นในทางทฤษฎี Mutual Flux ของเฟส A ,B และC ซึ่งเหนี่ยวนำขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะมีแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิค่าสูงสุดที่ระยะ 0.12 ,0.15 และ 0.18 m ในขณะเดียวกันผลการทดสอบจากรูปที่ 4.28 เฟส Bและเฟส C จะมีแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิสูงสุดที่ระยะ 0.12 ,0.15 m แต่เฟส A แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิจะมีค่าสูงสุดที่ระยะ 0.15 m แทนที่จะมีค่าสูงสุดที่ระยะ 0.18 m ทั้งนี้เนื่องมาจากตำแหน่งการวางขดลวดของเฟส A วางใกล้กับ

ขอบจึงทำให้เกิดผลกระทบของขอบ (Edge Effect) ขณะเดียวกันสำหรับการวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing) จากรูปที่ 4.30 Mutual Flux ของเฟส A , B และ C ซึ่งเหนี่ยวนำขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะมีค่าสูงสุดที่ระยะ 0.12 , 0.15 และ 0.18 m ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากการทำสกีวอิ่งนั่นเอง สำหรับการทดสอบการเกี่ยวค้ำของ Mutual Flux ทั้งสามเฟสที่กระทำต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่ระยะต่าง ๆ นั้น ในส่วนของการคำนวณ Mutual Flux ทั้งสามเฟสนั้นสามารถพิจารณาจากรูปที่ 5.6 จะเห็นได้ว่า Mutual Flux ทั้งสามเฟสที่กระทำต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่ระยะทาง z ต่างๆสามารถเขียนเป็นสมการที่ 5.13 และเมื่อพิจารณาการพันขดลวดทางด้านทุติยภูมิ



รูปที่ 5.6 มีขดลวดฟลักซ์ทั้งสามเฟสที่กระทำต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

K_{dv} = เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวดทางด้านทุติยภูมิ
เส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดทางด้านปฐมภูมิ

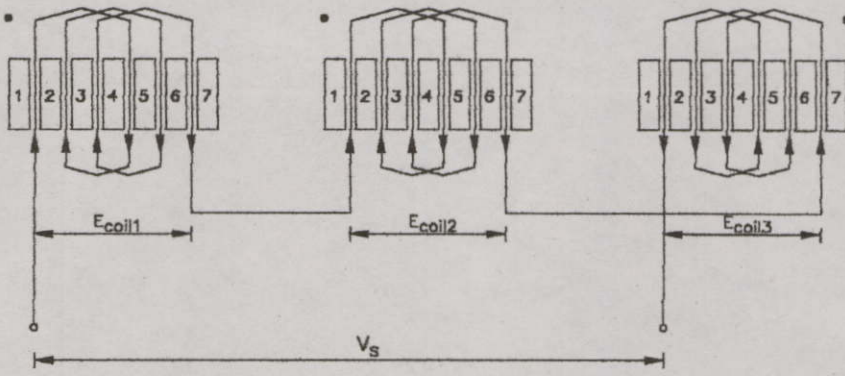
$$K_{dv} = \frac{1}{\beta} \int_0^z dz = \frac{z}{\beta}$$

(5.13)

- เมื่อ K_{dv} : Distance Voltage Factor
 z : ระยะทางที่ Mutual Flux ทั้งสามเฟสเหนี่ยวนำขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

คังรูปที่ 5.7 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านทุติยภูมิของขดลวดทุติยภูมิทั้งสามชุดที่ถูกเหนี่ยวนำโดย Mutual Flux ทั้งสามเฟสที่ระยะต่างๆสามารถพิจารณาจากสมการที่ 5.14 และเมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิจากรูปที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิได้จากการรวมกันของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดแต่ละชุดซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.8

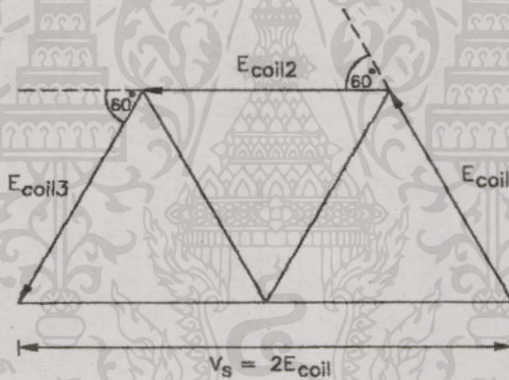
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 การต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

$$E_{coil1} = E_{coil2} = E_{coil3} = 4.44 f N_{ph} B_{max} A(s.f.) K_w K_{dv} \tag{5.14}$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะต่างๆสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.15

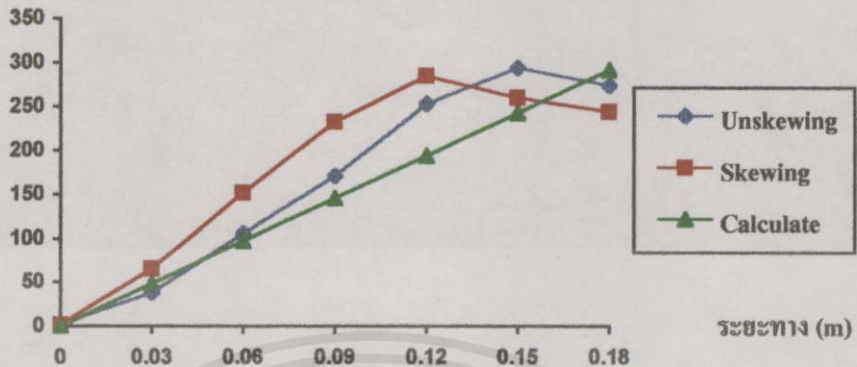


รูปที่ 5.8 การรวมกันทางเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแต่ละขดลวด

$$V_s = 2E_{coil} \tag{5.15}$$

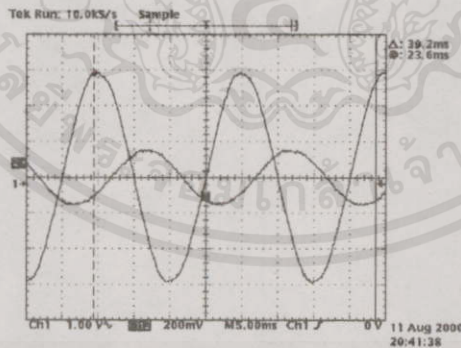
จากสมการที่ 5.13 - 5.15 สามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะต่างๆได้ดังรูปที่ 5.9 ในส่วนของการทดสอบเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) จากรูปที่ 5.9 จะเห็นว่าที่ระยะ 0 - 0.15 m การปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิจะเป็นเชิงเส้น (Linear) ส่วนที่ระยะ 0.18 m แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิจะมีค่าลดลงเนื่องจากผลรวมของ Mutual Flux ทั้งสามเฟสส่วนหนึ่งจะมีการ โกงตัวมาเหนี่ยวนำกับขอบด้านข้างของแกนเหล็กทางด้านทุติยภูมิทำให้เกิดไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งทำให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกฉบับที่มีการนำไปใช้สนามแม่เหล็กตัดขวางหรือเรียกว่าผลกระทบของขอบ (Edge Effect) นั่นเอง สำหรับการวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing) จากรูปที่ 5.9 จะเห็นว่าที่ระยะ 0 - 0.12 m การปรับขนาดของ

แรงดันไฟฟ้าทาง
ด้านทุติยภูมิ (v)



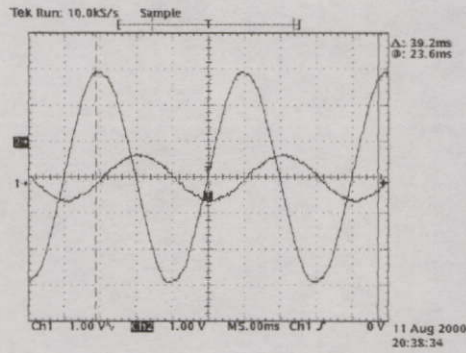
รูปที่ 5.9 แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะต่างๆ

แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิจะเป็นเชิงเส้น (Linear) ส่วนที่ระยะ 0.15-0.18 m แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิจะมีค่าลดลงตามลำดับเนื่องจากผลรวมของ Mutual Flux ทั้งสามเฟสส่วนหนึ่งจะมีการโค้งตัวมาเหนี่ยวนำกับร่องสล็อตที่ไม่ได้มีการพันขดลวดและขอบด้านข้างของแกนเหล็กทางด้านทุติยภูมิทำให้เกิดสนามแม่เหล็กตัดขวางนั่นเอง สำหรับ Phase shift ของแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเฟส A เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.03 - 0.18 m สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.10 - 5.15 โดยมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 5.2

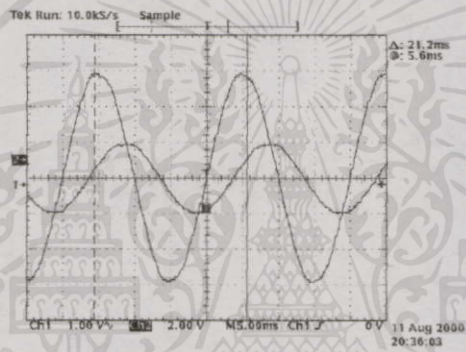


รูปที่ 5.10 เฟสชิฟของแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเฟส A เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.03 m เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ 20 V และแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ 1.07 V (Probe × 10)

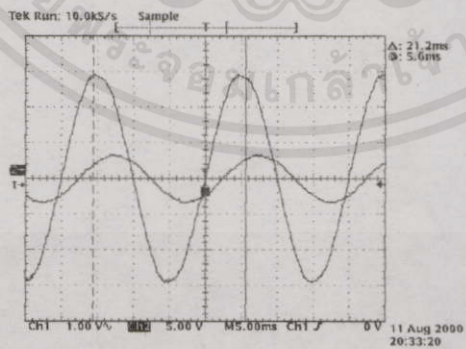
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



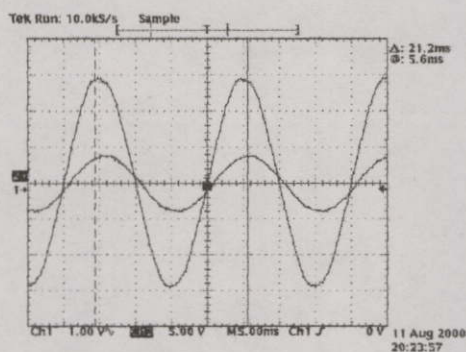
รูปที่ 5.11 เฟสชิพของแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเฟส A เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.06 m เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ 20 V และแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ 4.46 V (Probe $\times 10$)



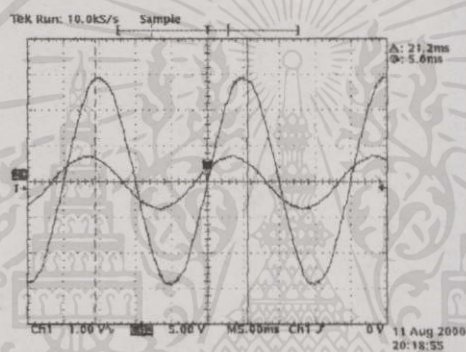
รูปที่ 5.12 เฟสชิพของแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเฟส A เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0.09 m เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ 20 V และแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ 13.79 V (Probe $\times 10$)



รูปที่ 5.13 เฟสชิพของแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเฟส A เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอกสารถังเป็นเอกสารถังสูงวน ไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ทุติยภูมิที่ระยะ 0.12 m เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ 20 V และแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ 22.92 V (Probe $\times 10$)



รูปที่ 5.14 เฟสชิพของแรงดันไฟฟ้าทางค้ำประจุมิเฟส A เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าทางค้ำ
 ทุดิยภูมิที่ระยะ 0.15 m เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าทางค้ำประจุมิ 20 V และแรงดัน
 ไฟฟ้าทางค้ำทุดิยภูมิ 27.41 V (Probe \times 10)



รูปที่ 5.15 เฟสชิพของแรงดันไฟฟ้าทางค้ำประจุมิเฟส A เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าทางค้ำ
 ทุดิยภูมิที่ระยะ 0.18 m เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าทางค้ำประจุมิ 20 V และแรงดัน
 ไฟฟ้าทางค้ำทุดิยภูมิ 25.73 V (Probe \times 10)

ตารางที่ 5.2 เฟสชิพระหว่างแรงดันไฟฟ้าทางค้ำประจุมิและทุดิยภูมิ

ระยะ	เฟสชิพของแรงดันไฟฟ้าทางค้ำประจุมิเฟส A เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าทางค้ำทุดิยภูมิ
0.03 m	นำหน้า 126 องศาทางไฟฟ้า
0.06 m	นำหน้า 99 องศาทางไฟฟ้า
0.09 m	นำหน้า 63 องศาทางไฟฟ้า
0.12 m	นำหน้า 45 องศาทางไฟฟ้า
0.15 m	นำหน้า 18 องศาทางไฟฟ้า
0.18 m	ล้าหลัง 27 องศาทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ข้อมูลข้างต้นไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 วิเคราะห์การทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

สิ่งที่สำคัญที่สุดหลังจากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าอีกส่วนหนึ่งคือการทดสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยในการทดสอบจะทดสอบประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับระหว่างการวางเรียงแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิในแนวตรง (Unskewing) และการวางแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิในแนวเอียง (Skewing) โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 5.3 จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าจะเห็นได้ว่าการวางเรียงแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิในแนวเอียง (Skewing) ที่ระยะ 0.03 - 0.18 m จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการวางเรียงแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิในแนวตรง (Unskewing) ในส่วนของการวางเรียงแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิในแนวเอียง (Skewing) ที่ระยะ 0.18 m ซึ่งเป็นบริเวณขอบของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีเส้นแรงแม่เหล็กโค้งตัวมาเหนี่ยวนำบริเวณขอบด้านข้างของแกนเหล็กทางด้านทุติยภูมิทำให้เกิดสนามแม่เหล็กตัดขวางจึงทำให้มีประสิทธิภาพต่ำกว่าที่ระยะ 0.15 m ดังนั้นที่ระยะ 0.15 m จึงเป็นจุดที่เหมาะสมกับการใช้งานทั้งนี้เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงสุด

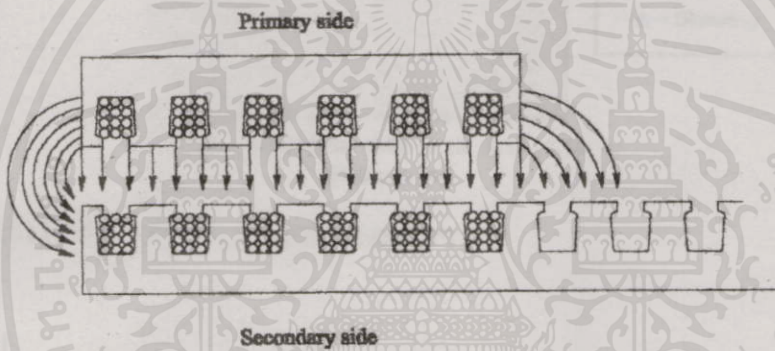
ตารางที่ 5.3 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

ระยะ (cm)	% η Unskewing	% η Skewing
0	-	-
3	3.2	6.55
6	10.24	19.89
9	18.28	35.59
12	41.9	51.36
15	53.78	55.69
18	54.80	54.91

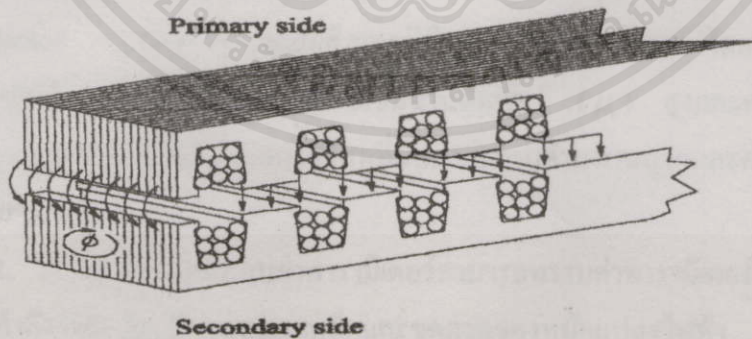
5.7 วิเคราะห์ผลกระทบของขอบที่มีต่อหม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับการออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแปลงจากระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ในแนวระนาบ (Travelling Wave) โดยโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีลักษณะการวางเรียงแกนเหล็กในแนวระนาบนั้นจะมีจุดเริ่มต้นและสิ้นสุดในการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็ก (Travelling Wave) จากด้านหน้าไปยังด้านหลังของขอบ (Edge Effect) โดยความเร็วของสนามแม่เหล็กสามารถคำนวณได้จากเอกสารที่ (2.12) ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น ดังนั้นความเร็วของสนามแม่เหล็กแนวระนาบ $V_f = 2 \times 0.09 \times 50 = 9$ m/s นี้คือการนำไปใช้

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.16 จะเห็นว่า Mutual Flux ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าส่วนหนึ่งเป็นเส้นแรงแม่เหล็กที่โค้งตัว (Fringing Flux) จะพุ่งลงมาเหนี่ยวนำกับของด้านข้างของแกนทางด้านทุติยภูมิทำให้ระยะขั้วแม่เหล็ก (Pole Pitch) มีความยาวเพิ่มขึ้นทำให้ความเร็วของสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ในแนวระนาบมีค่ามากกว่าการคำนวณและผลกระทบจากเส้นแรงแม่เหล็กที่โค้งตัว (Fringing Flux) จะพุ่งลงมาเหนี่ยวนำกับของด้านข้างของแกนทางด้านทุติยภูมิดังรูปที่ 5.17 จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กตัดขวางทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ณ ตำแหน่งบริเวณขอบมาก โดยสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.18 ซึ่งมีการเปรียบเทียบกันระหว่างการวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรงและแนวเอียง จากรูปที่ 5.18 จะเห็นได้ว่าเมื่อวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) ที่ระยะ 0.18 m ณ จุดนี้จะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากที่สุดเนื่องจากผลกระทบของขอบซึ่งเกิดจากมิวชวลฟลักซ์ที่โค้งตัวมาเหนี่ยวนำกับของด้านข้างของแกนทางด้านทุติยภูมิซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กตัดขวางดังรูปที่ 5.17 และที่ระยะ 0.15 m จะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุดเนื่องจาก



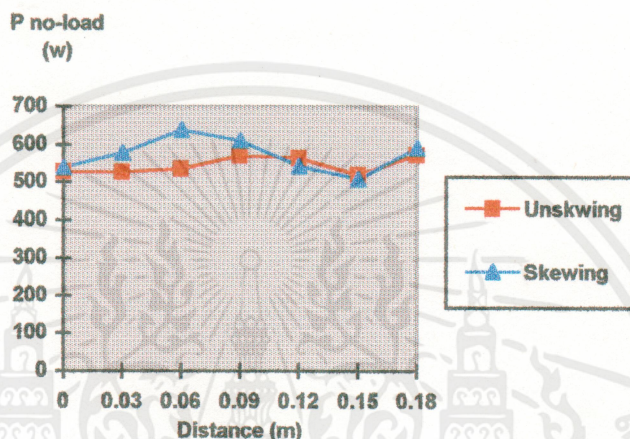
รูปที่ 5.16 เส้นแรงแม่เหล็กที่โค้งตัวของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 5.17 สนามแม่เหล็กตัดขวางด้านข้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับเลื่อนแกนเหล็กทำให้ลดผลกระทบของสนามแม่เหล็กตัดขวาง ในขณะที่เดียวกันที่ระยะ 0.12 m ถึง 0 m กำลังไฟฟ้าสูญเสียจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากผลกระทบจากมิวชวลฟลักซ์ที่โค้งตัวมาเหนี่ยวนำกับร่องสล๊อทที่ไม่มี การพันขดลวดจึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กตัดขวางในร่องสล๊อท ในส่วนของการวางเรียงแกนเหล็กในแนวเอียง (Skewing) จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการวางเรียงแกนเหล็กในแนวตรง (Unskewing) ดังนั้นที่ระยะ 0.15 m จึงเป็นจุดที่เหมาะสมกับการใช้งานทั้งนี้เนื่องจากมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยสุด



รูปที่ 5.18 กำลังไฟฟ้าสูญเสียบริเวณขอบที่ระยะต่างๆ

5.8 บทสรุป

ในส่วนของ การวิเคราะห์การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในบทที่ 5 จะแบ่งออก 6 ส่วนด้วยกันประกอบด้วย

1. วิเคราะห์การทดสอบแกนเหล็ก จากการทดสอบแกนเหล็ก M5 จะใช้วิธี Two Frequency Method ในการแยกค่าสูญเสียฮีสเทอรีซิสและกระแสไหลวน โดยค่าสูญเสียฮีสเทอรีซิสสามารถลดได้โดยการเลือกวัสดุที่มีค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ (μ_r) สูงและค่าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนสามารถลดได้โดยเลือกใช้วัสดุที่มีสภาพความต้านทานสูงๆและความหนาของแผ่นลามินเนทน้อยๆมาใช้งาน

2. วิเคราะห์การทดสอบค่าพารามิเตอร์สามารถทราบค่าพารามิเตอร์ R_1, R_2, R_c, X_m รวมทั้งกำลังไฟฟ้าสูญเสียของแกนเหล็กและขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า

3. วิเคราะห์ผลกระทบของการทำสกีวอิ่งของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเห็นได้ว่าการวางเรียงแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิในแนวเอียงจะทำให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิมีฮาร์โมนิกส์น้อยกว่า การวางเรียงแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิในแนวตรงเนื่องจากสกีวเฟลคเตอร์นั่นเอง

4. วิเคราะห์การเกิดขดลวดของเส้นแรงแม่เหล็กจะเห็นได้ว่าการวางเรียงแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิในแนวเอียง การปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0 - 0.12 m จะ

เป็นเชิงเส้น ส่วนการวางเรียงแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิในแนวตรง การปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ระยะ 0 - 0.15 m จะเป็นเชิงเส้น

5. วิเคราะห์ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเห็นได้ว่าการวางเรียงแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิในแนวเอียงจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการวางเรียงแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิในแนวตรง

6. วิเคราะห์ผลกระทบของขอบที่มีต่อหม้อแปลงไฟฟ้าจะเห็นได้ว่าการวางเรียงแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิในแนวตรงและแนวเอียงที่ระยะ 0.15 m จะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยสุด ส่วนที่ระยะอื่นจะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงเนื่องจากสนามแม่เหล็กตัดขวาง ณ ตำแหน่งบริเวณขอบและร่องสล๊อทที่ไม่ได้มีการพันขดลวด

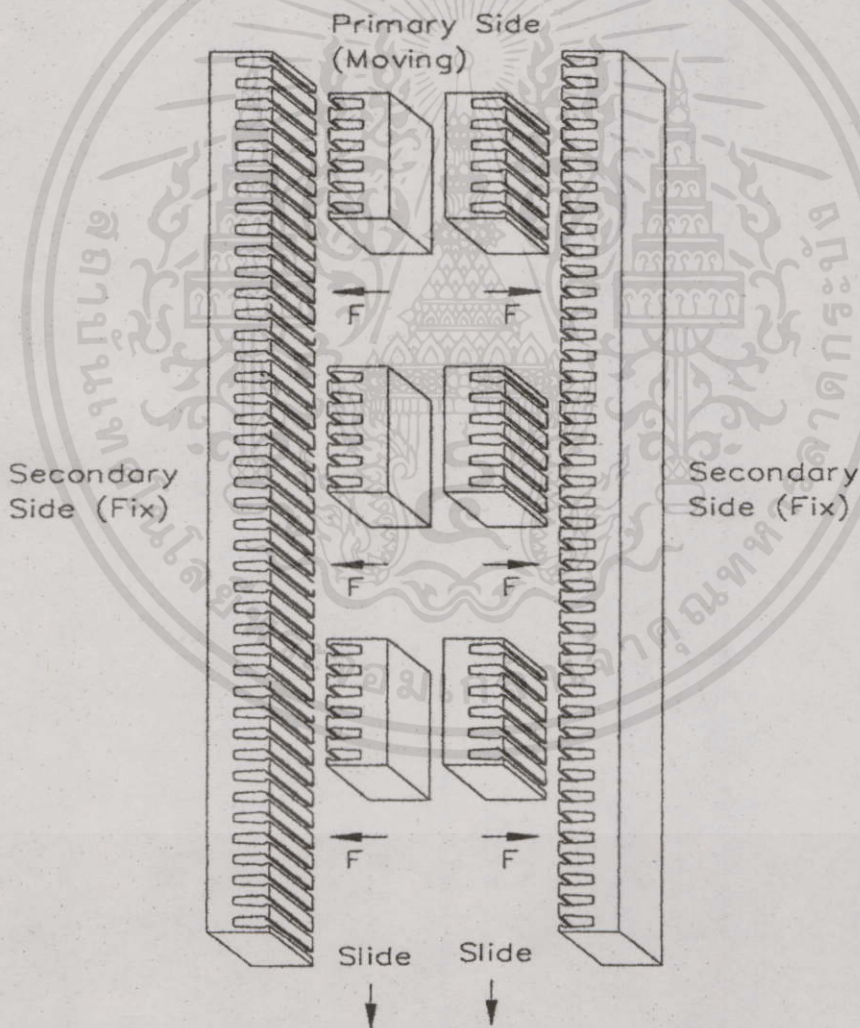


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 บทสรุป

6.1 บทสรุปและวิจารณ์

สำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการศึกษาหลักการของสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ในแนวระนาบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแนวระนาบ (Linear Machine) มาออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแปลงจากระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสขนาดพิกัด 6 กิโลโวลท์แอมป์ โดยโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าจะวางแบบ Double side ดังรูปที่ 6.1 เพื่อลด



รูปที่ 6.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Double side

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาเนื่องจากแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กทำให้สามารถปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้าได้อย่างสะดวก สำหรับรายละเอียดในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 รายละเอียดของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

ขนาดพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า	6 kVA
แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ(ต่อเฟส)	220 V
แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ	1.8 - 285 V
ฮาร์มอนิกส์ของแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ	2.70 - 16.30 %
จำนวนร่องสล้อททางด้านปฐมภูมิ	6 สล้อท (6ชุด)
จำนวนร่องสล้อททางด้านทุติยภูมิ	42 สล้อท (2ชุด)
จำนวนขดลวดทางด้านปฐมภูมิ	132 รอบ
จำนวนขดลวดทางด้านทุติยภูมิ	132 รอบ
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ออกแบบ	0.6 Tesla
จำนวนขั้วแม่เหล็ก	2 ขั้วแม่เหล็ก
ฟลักเตอร์ทางด้านปฐมภูมิ	1
ดิสตริบิวชั่นฟลักเตอร์ทางด้านปฐมภูมิ	1
ฟลักเตอร์การพันขดลวดทางด้านปฐมภูมิ	1
ฟลักเตอร์ทางด้านทุติยภูมิ	1
ดิสตริบิวชั่นฟลักเตอร์ทางด้านทุติยภูมิ	0.66
ฟลักเตอร์การพันขดลวดทางด้านทุติยภูมิ	0.66

และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสทางด้านทุติยภูมิสามารถปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 1.88 - 285 โวลต์ โดยการปรับเลื่อนแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิเพื่อให้มีขดลวดที่คล้องขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่ระยะต่างๆ ฮาร์มอนิกส์ของแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิมีค่าตั้งแต่ 2.70 - 16.30 % ส่วนจุดที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าจะอยู่ที่ระยะ 0.15 m ทั้งนี้เนื่องจากที่ระยะ 0.15 m รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิจะใกล้เคียงไซน์นั่นันแสดงให้เห็นถึงปริมาณฮาร์มอนิกส์ต่ำ, กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดต่ำสุดและมีประสิทธิภาพสูงสุดขณะมีโหลดเมื่อเทียบกับที่ระยะอื่นๆ สามารถพิจารณารายละเอียดได้จากบทที่ 5 สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบสร้างขึ้นจะมีเหมาะสมใช้งานกับโหลดหนึ่งเฟสซึ่งทำให้ระบบไฟฟ้ามีความสมดุลใกล้เคียงกัน, มีความน่าเชื่อถือในระบบ, ปริมาณฮาร์มอนิกส์ต่ำ, ไม่มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการอาร์คที่บริเวณหน้าสัมผัสรวมทั้งไม่เสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา แต่อย่างไรก็ตามหม้อ

แปลงไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงสุดเพียง 55.69 % ซึ่งต้องมีการพัฒนาทางด้านประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อไป



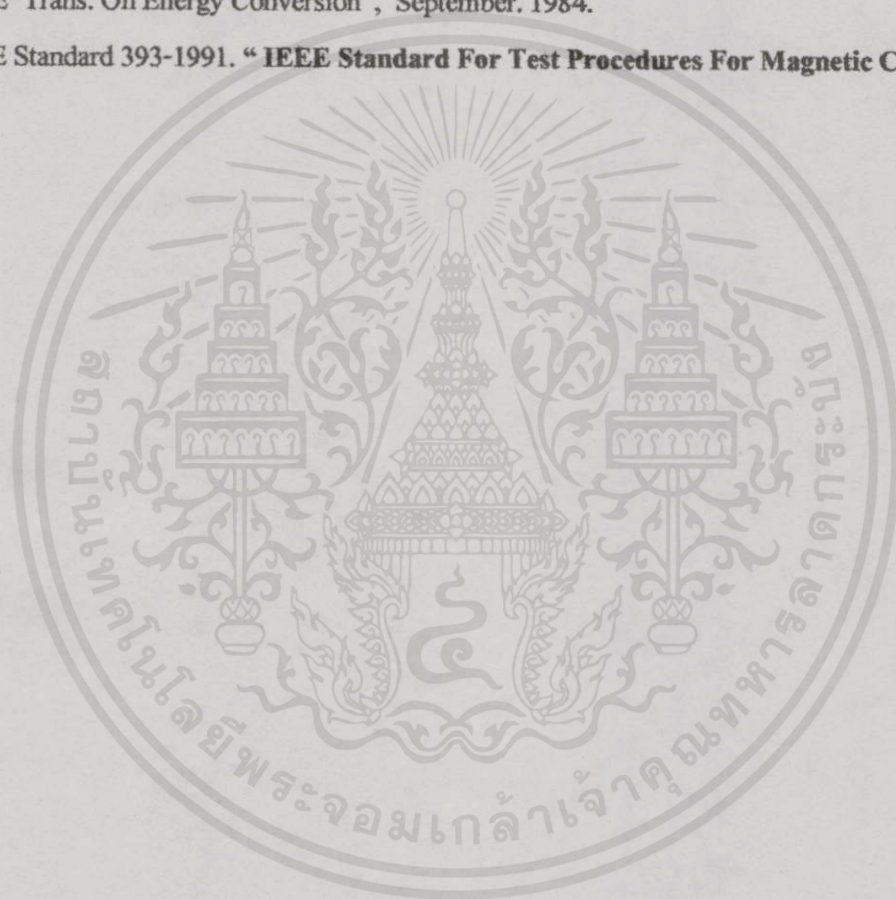
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] พุทธพร เสวตสกุลานนท์และคณะ. “การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสโดยหม้อแปลงไฟฟ้า.” ปรียญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2538
- [2] ศฤกษ์ สุวรรณรัตน์และคณะ. “มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชิงเส้น.” ปรียญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. 2540
- [3] พงศ์ศักดิ์ ฟูประเสริฐและคณะ. “มอเตอร์เหนี่ยวนำประสิทธิภาพสูง” ปรียญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. 2541
- [4] ชวิชัย จันทิมาและคณะ. “การวิเคราะห์ค่าสูญเสียในแกนเหล็กอะมอร์ฟัส” ปรียญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. 2541
- [5] สุเทพ จอมเกตุและคณะ. “การออกแบบและพัฒนาหม้อแปลงไฟฟ้าแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส” ปรียญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. 2542
- [6] พุทธพร เสวตสกุลานนท์และพิชิต ล้ายอง. 2540. “การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสโดยหม้อแปลงไฟฟ้า.” หน้า 760-765 ใน การประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20. กรุงเทพมหานคร : คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [7] พุทธพร เสวตสกุลานนท์และพิชิต ล้ายอง. 2541. “ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรแม่เหล็ก.” หน้า 469-472 ใน การประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21. กรุงเทพมหานคร : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [8] พุทธพร เสวตสกุลานนท์และพิชิต ล้ายอง. 2542. “การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสโดยหม้อแปลงไฟฟ้า.” หน้า 597-600 ใน การประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 22. กรุงเทพมหานคร : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [9] A.E. Fitzgerald.et.al. 1992. **Electric Machinery.** : McGraw – Hill
- [10] Richard H. Engelmann. et. al. 1982. **Static and Rotating and Electromagnetic Device.** : Marcel Dekker
- [11] Leander W.et.al. 1997. **Electromagnetic and Electromechanical Machine.** : Harper & Row Publishers

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [12] Paul L. Cochran. 1989. **Polyphase Induction Motors.** : Marcel Dekker
- [13] Karl T. Compton. 1943. **Magnetic Circuit and Transformers.** : M.I.T. Press
- [14] Essam S. Hamdi. 1994. **Design of Small Electrical Machines.** : John Wiley & Sons
- [15] Syed A. Nasar.et.al. 1987. **Linear Electric Motors.** : Prentice-Hall
- [16] D.S. Takach. , R.L. Boggavarapu. “**Distribution Transformer No – Load Losses.**”
IEEE Trans. On Energy Conversion , September. 1984.
- [17] IEEE Standard 393-1991. “**IEEE Standard For Test Procedures For Magnetic Core.**”



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายพุทธพร เสวตสกุลานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 27 ตุลาคม 2516 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (ไฟฟ้ากำลัง) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2538 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ไฟฟ้ากำลัง) จากวิทยาลัยช่างกลปทุมวัน ปีการศึกษา 2535 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ไฟฟ้ากำลัง) จากวิทยาลัยเทคนิคยะลา ปีการศึกษา 2532

ปี พ.ศ. 2539 เริ่มทำงานที่บริษัทซิโนไทยเอ็นจิเนียริงในตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้ากำลังประจำหน่วยงานเอเอ็นเอ็นเกมส์วิศวกรรมศาสตร์ศูนย์รังสิต ปี พ.ศ. 2540 – ปัจจุบัน ทำงานที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครในตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง. สนใจทำงานวิจัยด้าน Machine , Electric Drive และ Solar Energy มีผลงานวิจัยทางวิชาการหลายบทความเช่น

- การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสโดยหม้อแปลงไฟฟ้า ในการประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรแม่เหล็ก ในการประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสโดยหม้อแปลงไฟฟ้า ในการประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 22 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้