

หน่วยย่อยของระบบนิเวศวิทยา

UNIT 2 - CRUCIFORM SECTION WITH 1K VA 220:3000V
(SINGLE PHASE DISTRIBUTION CORE TYPE WITH 2-STEP
CRUCIFORM SECTION 1K VA 220:3000V TRANSFORMER)

ปฏินิวัติ ช่างเขียนภาพ
โลกาณ บุญจิต

รายงานฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการศึกษาเท่านั้น และไม่ควรถูกใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใด

มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

UNITED STATES 2540

CONTRIBUTION

หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าเฟสเดียว ชนิดขดลวดล้อมแกนพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กแบบ

2 ชั้น Cruciform section ขนาด 1 kVA 220 : 3000 V

(Single - phase distribution core type with 2 - step cruciform section

1 kVA 220:3000 V. transformer)

นายปฏิวัติ ชัยเจริญลักษณ์ B3702055

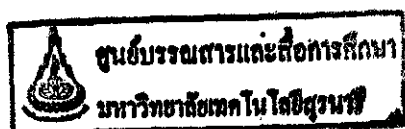
นายไพศาล สดวิสัย B3707029

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2540





ใบรับรองโครงงานวิศวกรรม
สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เรื่อง หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าเฟสเดียว ชนิดขดลวดล้อมแกนพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กแบบ 2 ชั้น

Cruciform section ขนาด 1 kVA 220 : 3000 V

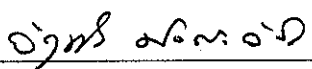
โดย นายปฎิวัติ ชัยเจริญลักษณะ

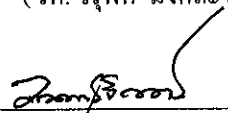
นายไพศาล สดวิสัย

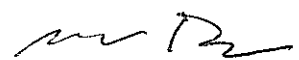
ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณบดี
วันที่ เดือน พ.ศ. 2540

คณะกรรมการสอบ

 ประธานกรรมการ
(รศ. วิรุฬห์ มังคละวิรัช)

 กรรมการ
(อาจารย์ มานพ รุจิภากร)

 กรรมการ, ที่ปรึกษาโครงงาน
(รศ. ไพบุลย์ ไชยนิล)

โครงการงาน	หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าเฟสเดียว ชนิดขดลวดล้อมแกน พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กแบบ 2 ชั้น Cruciform section ขนาด 1kVA 220:3000V
ผู้ดำเนินงาน	1. นายปวิวัติ ชัยเจริญลักษณ์ 2. นายไพศาล สุกวิสัย
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ไพบุลย์ ไชยนิล
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาคการศึกษาที่	2/2540

บทคัดย่อ

โครงการวิศวกรรมไฟฟ้าเรื่องการออกแบบและการสร้างหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า เฟสเดียวชนิดขดลวดล้อมแกน (Single - phase distribution transformer with 2- step cruciform section) แปลงแรงดันขึ้นจาก 220 โวลต์ เป็น 3000 โวลต์ ประกอบด้วยการออกแบบเพื่อกำหนดค่าลักษณะสมบัติ และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้เหมาะสม ขั้นตอนการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า และการวิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติ และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการสร้าง และ ทดสอบ ซึ่งเป็นการนำเอาทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้า มาประยุกต์ใช้ทำการสร้าง และออกแบบให้ได้หม้อแปลงที่มีประสิทธิภาพสูง

Project Single - phase distribution core type with 2 - step cruciform section
 rating 1 kVA 220 : 3000 V

Written by 1. Mr. Patiwat Chaijaroenluk
 2. Mr. Phaisarn Sudwilai

Supervisor Associate Professor Phaibul Chaiyanil

School of Electrical Engineering

Timesty 2/1997

Abstract

The work described in this report deals with the design and construction of a single-phase distribution transformer with 2 - step cruciform section. The rating is 1kVA 220:3000 V. step up transformer. This report includes the design to assign an optimum parameter, the procedure to build a transformer, and the test and the analysis of the characteristic and parameter of the transformer. The design is aimed to have high efficiency.

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงงาน วิศวกรรมไฟฟ้า นี้ ได้ทำขึ้นเพื่อเป็นการนำทฤษฎีที่ได้ศึกษามาทั้งหมดมาประยุกต์ใช้ในการทำโครงงานวิศวกรรมไฟฟ้า และสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ของทุก ๆ ฝ่าย ซึ่งการทำโครงงาน วิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งนี้จะสำเร็จไม่ได้ ถ้าขาดบุคคลผู้มีพระคุณในการทำโครงงานวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งนี้ ผู้ทำโครงงานจึงขอสดุดีท่านไว้ ณ โอกาสนี้ ดังมีรายชื่อดังต่อไปนี้

รศ. ไพบุลย์ ไชยนิล

รศ. วิรุฬห์ มังคละวิรัช

รศ. นท. ดร. สราวุฒิ สุจิตจร

อาจารย์ชวลิต คำรงรัตน์

อาจารย์เรวัติ ไวเปีย

อาจารย์มานพ รุจิภากร

อาจารย์รังสรรค์ วงศ์ธรรม์

ผศ. สุพรรณ ทรัพย์ประกอบ

ผศ. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ

ผศ.ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์

อาจารย์ พันธุ์พงศ์ อภิชาติกุล

อาจารย์ อนันต์ อุ่นศิริไธย

ดร. อรชุน ไชยเสนะ

คณาจารย์สำนักวิชาวิทยาศาสตร์

คณาจารย์ทุกท่านทั้งในอดีต และปัจจุบันที่ได้ถ่ายทอดความรู้ต่าง ๆ และบุคลากรที่ได้อบรม และเลี้ยงดูผู้ทำโครงงานวิศวกรรมไฟฟ้า

ในการทำโครงงานวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งนี้ ต้องขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ไพบุลย์ ไชยนิล ที่ได้ให้การตรวจสอบผลการออกแบบ ให้คำแนะนำและถ่ายทอดการทำโครงงานวิศวกรรมไฟฟ้า รองศาสตราจารย์ นท.ดร. สราวุฒิ สุจิตจร ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำโครงงานวิศวกรรมไฟฟ้า และที่ขาดไม่ได้คือ เจ้าหน้าที่ และบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือ 1 ห้อง ปฏิบัติการเครื่องมือกล ที่ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือในการทำโครงงาน วิศวกรรมไฟฟ้าครั้งนี้ ตลอดจน คุณประพล จาระตะกู คุณบุญเรือง มะรังศรี และบุคลากรในห้องปฏิบัติการ เครื่องจักรกลไฟฟ้า ทุก ๆ ท่าน เพื่อน ๆ ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าปี ที่ 4 ทุกคนที่ได้ให้กำลังใจ ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ในการทำงาน

สารบัญ

บทคัดย่อ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญรูปภาพ	ช
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์และเป้าหมายของโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า	1
1.3 คำโครงของงาน โครงการวิศวกรรมไฟฟ้า	1
1.4 การจัดรูปแบบรายงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน และภูมิหลังของงานที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กล่าวนำ	3
2.2 ภูมิหลังของงานที่เกี่ยวข้อง	3
2.3 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า	4
2.4 การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในขดลวดปฐมภูมิในสถานะไร้โหลด	7
2.5 การพิจารณาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในสถานะมีโหลด	9
2.6 การพิจารณาวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า	11
2.7 กำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า	12
2.8 การพิจารณาประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า	15
2.9 สรุป	16
บทที่ 3 ความรู้เบื้องต้นในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า	
3.1 กล่าวนำ	18
3.2 ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า	18
3.3 สมการขาออก	20
3.4 ข้อกำหนดในการใช้ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์ และความหนาแน่นกระแส	21
3.5 ความหนาแน่นกระแสในขดลวด	22
3.6 การคำนวณ	23
3.7 ตัวประกอบพื้นที่	23
3.8 การออกแบบโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า	23
3.9 Arrangement of coil-leakage reactance	26
3.10 การคำนวณค่ากระแสกระตุ้น	26

3.11 Magnetic leakage in transformer	27
3.12 การคำนวณค่าแรงดันตก (IR drop)	28
3.13 การแสดงเวกเตอร์ของหม้อแปลงและผลกระทบของฟลักซ์รั่ว	32
3.14 การคุมค่าแรงดัน	33
3.15 ประสิทธิภาพ	34
3.16 สรุป	35
บทที่ 4 ข้อมูลของการออกแบบสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า	
4.1 กล่าวนำ	37
4.2 Specification	39
4.3 การคำนวณ	39
4.4 พื้นที่หน้าตัด	41
4.5 ความยาวเฉลี่ยของเส้นทางฟลักซ์	43
4.6 ค่ากำลังสูญเสียในขดลวด	43
4.7 ขนาดเส้นลวดและการจัดวางขดลวด	45
4.8 แรงดันตก และกำลังสูญเสียในขดลวด	47
4.9 สรุป	49
บทที่ 5 ขั้นตอนการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า	
5.1 กล่าวนำ	50
5.2 วัสดุอุปกรณ์การสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า	50
5.3 ขั้นตอนการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าระยะที่ 1	51
5.4 ขั้นตอนการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าระยะที่ 2	53
5.5 ขั้นตอนการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าระยะที่ 3	54
5.6 สรุป	57
บทที่ 6 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	
6.1 กล่าวนำ	58
6.2 การทดสอบหม้อแปลงที่สภาวะเปิดวงจร	58
6.3 การทดสอบหม้อแปลงที่สภาวะปิดวงจร	60
6.4 การทดสอบหาจรรยาสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า	61
6.5 การทดสอบหาค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า	62
6.6 การตรวจสอบหาค่าโวลต์เตจเรกูลชันของหม้อแปลงไฟฟ้า	63
6.7 สรุป	64

บทที่ 7 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อสรุป	65
7.2 ข้อเสนอแนะ	66
เอกสารอ้างอิง	67
บรรณานุกรม	68
ภาคผนวก ก. (ตารางแสดงขนาดของเส้นลวดที่ใช้ในการพันหม้อแปลงไฟฟ้า)	69
ภาคผนวก ข. (ตารางแสดงค่าความต้านทานของเส้นลวดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)	72
ภาคผนวก ค. (กราฟคำนวณกระแสกระตุ้นและกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก)	74
ภาคผนวก ง. (ข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้าในโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า)	77
ประวัติผู้ทำโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า	80

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 รูปแสดงการทดลองของฟาราเดย์	3
รูปที่ 2.2 รูปแสดงแกนเหล็กหม้อแปลงชนิดขดลวดล้อมแกน	5
รูปที่ 2.3 รูปแสดงตำแหน่งการใส่ขดลวดในแกนเหล็กของหม้อแปลง	5
รูปที่ 2.4 รูปแสดงหม้อแปลงชนิดขดลวดล้อมแกนเมื่อประกอบแล้ว	6
รูปที่ 2.5 รูปแสดงภาคตัด โครงสร้างหม้อแปลงชนิดแกนล้อมขดลวด	6
รูปที่ 2.6 รูปแสดงขดลวดแพนเค้ก	7
รูปที่ 2.7 รูปแสดงหม้อแปลงพื้นฐาน	7
รูปที่ 2.8 รูปแสดงเฟสเซอร์หม้อแปลงอุดมคติในสภาวะเปิดวงจรด้านปฐมภูมิ	8
รูปที่ 2.9 รูปแสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลง	9
รูปที่ 2.10 รูปแสดงหม้อแปลงในสภาวะมีโหลด	9
รูปที่ 2.11 รูปแสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลง	11
รูปที่ 2.12 รูปแสดงวงปิดฮิสเทอรีซิส	12
รูปที่ 2.13 รูปแสดงทางของกระแสเอ็ดดี้ที่ไหลในแผ่นเหล็ก	13
รูปที่ 3.1 รูปแสดงลักษณะของหม้อแปลงชนิดต่าง ๆ	19
รูปที่ 3.2 รูปแสดงการจัดวางแผ่นเหล็ก laminate	19
รูปที่ 3.3 รูปแสดงแสดงค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก	21
รูปที่ 3.4 รูปแสดงลักษณะของแกนเหล็กของหม้อแปลงชนิดแกนล้อมขดลวด	23
รูปที่ 3.5 รูปแสดงลักษณะของแกนเหล็กของหม้อแปลงชนิดขดลวดล้อมแกน	24
รูปที่ 3.6 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า C, W, L	24
รูปที่ 3.7 รูปแสดงลักษณะของพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กชนิด Cruciform section	25
รูปที่ 3.8 รูปแสดงการจัดวางขดลวดในหม้อแปลงชนิดขดลวดล้อมแกน	26
รูปที่ 3.9 รูปแสดงเวกเตอร์แสดงค่ากระแสกระตุ้น	27
รูปที่ 3.10 รูปแสดงลักษณะของสนามแม่เหล็ก	27
รูปที่ 3.11 รูปแสดงลักษณะของสนามแม่เหล็กบริเวณรอยต่อ	28
รูปที่ 3.12 รูปแสดงพื้นที่หน้าตัดของหม้อแปลงชนิดขดลวดล้อมแกน	28
รูปที่ 3.13 รูปแสดงพื้นที่หน้าตัด แสดงรายละเอียดของการจัดวางขดลวด	29
รูปที่ 3.14 รูปแสดงเวกเตอร์แสดงลักษณะสมบัติของหม้อแปลง	32
รูปที่ 3.15 รูปแสดงเวกเตอร์แสดงการคุมค่าแรงดัน	33
รูปที่ 4.1 รูปแสดงลักษณะความสัมพันธ์ของหน้าต่าง	40
รูปที่ 4.2 รูปแสดงพื้นที่หน้าตัด แกนเหล็กแบบ Cruciform 2-ชั้น	42
รูปที่ 4.3 รูปแสดงทางเดินของสนามแม่เหล็ก	43
รูปที่ 4.4 รูปแสดงขนาดของขดลวด และการจัดวาง	45

รูปที่ 5.1 รูปแสดงอุปกรณ์การพันขดลวด	50
รูปที่ 5.2 รูปแสดงแกนไม้กลึง	51
รูปที่ 5.3 รูปแสดงลักษณะการพันขดลวด	52
รูปที่ 5.4 รูปแสดงขดลวดที่พันเสร็จเรียบร้อยแล้ว	52
รูปที่ 5.5 รูปแสดงการเรียงแกนเหล็ก	53
รูปที่ 5.6 รูปแสดงแกนเหล็กหม้อแปลง	54
รูปที่ 5.7 รูปแสดงแกนเหล็กของหม้อแปลงที่นำส่วนบนออก	54
รูปที่ 5.8 รูปแสดงแผ่นเบตาไลต์	55
รูปที่ 5.9 รูปแสดงหม้อแปลงที่ประกอบแล้ว	55
รูปที่ 5.10 รูปแสดงหม้อแปลงไฟฟ้าที่เสร็จสมบูรณ์	56
รูปที่ 6.1 รูปแสดงการทดสอบหม้อแปลงที่สภาวะเปิดวงจร	58
รูปที่ 6.2 รูปแสดงการทดสอบหม้อแปลงที่สภาวะลัดวงจร	60
รูปที่ 6.3 รูปแสดงวงจรจรสมมูลของหม้อแปลง	61
รูปที่ 6.4 รูปแสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงที่ได้จากการทดสอบ	62

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความหนาแน่นฟลักซ์ที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลง	21
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความหนาแน่นของกระแสในขดลวด	22
ตารางที่ 3.3 แสดงการฉนวน	23
ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลในการออกแบบหม้อแปลง	37

บทที่ 1

บทนำ

1.1 . กล่าวนำ

ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้านั้น หม้อแปลงไฟฟ้านับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ด้วยข้อจำกัดทางด้านเครื่องจักรกล และปัญหาการสูญเสียในการส่งจ่ายเป็นต้องส่งจ่ายด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง ๆ หม้อแปลงไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องนำมาใช้ในการส่งกำลังไฟฟ้า ไปยังผู้ใช้ที่อยู่ห่างไกลจากแหล่งผู้ผลิตกำลังงานไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์และเป้าหมายของโครงการงานวิศวกรรมไฟฟ้า

1. เพื่อนำเอาความรู้ที่ได้ศึกษาเรื่องหม้อแปลงไฟฟ้า มาใช้ในการสร้างและออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า
2. เพื่อฝึกการทำงาน โดยการออกแบบ และสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างเป็นขั้นตอน
3. เพื่อฝึกการทดสอบหม้อแปลง
4. เพื่อฝึกการทำงานร่วมกันเป็นกลุ่ม

1.3 คำโครงของงานโครงการงานวิศวกรรมไฟฟ้า

1.3.1 ชื่อโครงการงานวิศวกรรมไฟฟ้า

“Single - phase distribution core type with 2-step cruciform section 1 kVA 220/3000 V transformer”

1.3.2 วิธีดำเนินงาน

- ศึกษาทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้า
- ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า
- ชี้อุปกรณ์ในการทำหม้อแปลงไฟฟ้า
- สร้างชิ้นส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้า
- ประกอบหม้อแปลงไฟฟ้า
- ทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

1.3.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้รับความรู้เกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้า
- ได้รับความรู้เกี่ยวกับการแก้ปัญหาในการสร้างและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในทางปฏิบัติ
- ได้นำทฤษฎีที่ได้ศึกษามาทั้งหมดมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด
- ได้รับความรู้ในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าในทางปฏิบัติ

1.3.4 แผนปฏิบัติงาน

ขั้นตอน	ระยะเวลาในการดำเนินการ
1. ศึกษาทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้า	13 ส.ค. 40 - 19 ส.ค. 40
2. ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า	20 ส.ค. 40 - 22 ส.ค. 40
3. ซื่ออุปกรณ์	24 ส.ค. 40
4. ดำเนินการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า	
- พันขดลวด	18 ต.ค. 40 - 20 ต.ค. 40
- ตัดแผ่นเหล็กเพื่อสร้างแกนเหล็ก	25 ต.ค. 40 - 29 ต.ค. 40
- ประกอบแกนเหล็ก	30 ต.ค. 40
- ประกอบหม้อแปลงไฟฟ้า	31 ต.ค. 40
- เคลือบวานิช	3 พ.ย. 40 - 4 พ.ย. 40
5. ทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	5 พ.ย. 40 - 9 พ.ย. 40
6. เขียนรายงาน	10 พ.ย. 40 - 20 พ.ย. 40

รวมระยะเวลาในการสร้างและออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า 4 เดือน เริ่มตั้งแต่ 13 สิงหาคม 2540 ถึง วันที่ 20 พฤศจิกายน 2540

1.4 การจัดรูปเล่มรายงาน

โครงการวิศวกรรมไฟฟ้าได้จัดทำรูปเล่มรายงานซึ่งประกอบด้วยทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้า ขั้นตอนการออกแบบ ขั้นตอนการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานและภูมิหลังของงานที่เกี่ยวข้อง

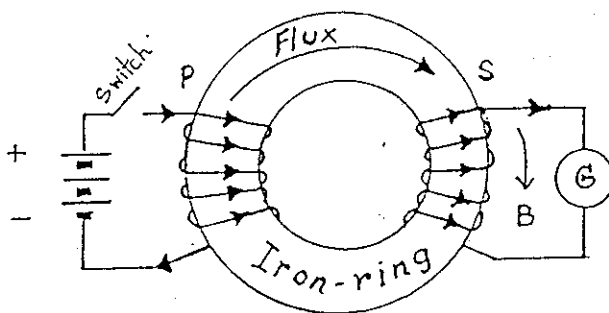
2.1 กล่าวนำ

ในการที่จะพิจารณาถึงการออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้น สิ่งที่มีความสำคัญและต้องคำนึงก่อนก็คือ การศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับ ทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ตลอดจนภูมิหลังของงานที่เกี่ยวข้อง ว่ามีประวัติความเป็นมาอย่างไร มีการกล่าวถึงทฤษฎีมีว่าอย่างไรบ้าง ขอบเขตของการนำไปใช้มีมากน้อยเพียงใด ซึ่งจะทำให้เราเข้าใจในหลักการของทฤษฎีนี้ และสามารถพัฒนาต่อไป และสามารถทำทฤษฎีเหล่านั้นไปประยุกต์ใช้กับงานได้อย่างเหมาะสม และแพร่หลายมากขึ้น โดยในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงประวัติความเป็นมาของหม้อแปลงไฟฟ้าและทฤษฎีพื้นฐานหลักๆของหม้อแปลง ดังมีรายละเอียดดังนี้

2.2 ภูมิหลังของงานที่เกี่ยวข้อง

หลังจากเออร์สเตด(Oersted) ได้เสนอผลงานในปี ค.ศ.1820 ที่แสดงว่าเส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลอยู่สามารถจะทำให้เข็มทิศเบี่ยงเบนและยังสาธิตให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้ามีส่วนสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน กระแสไฟฟ้าสามารถทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก เออร์สเตด ได้ทำการทดลองต่อมาอีกเป็นจำนวนมาก และได้เสนอข้อสรุปว่าควรเป็นไปได้ถ้าจะผลิตกระแสไฟฟ้าจากสนามแม่เหล็กที่มีอยู่ จนกระทั่งปี ค.ศ. 1831 ฟาราเดย์ จึงสามารถพิสูจน์ยืนยันทฤษฎีของเขาได้สำเร็จและได้เสนอหลักการเกี่ยวกับ แม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(Electromagnetic induction)

เครื่องทดลองของฟาราเดย์ประกอบด้วย เหล็กอ่อนทำเป็นวงแหวน มีขดลวดพันอยู่สองชุด ชุดแรกจะต่อเข้ากับแบตเตอรี่ผ่านสวิตช์ ปลายทั้งสองของขดลวดชุดที่2ต่อเข้ากับ กาลวานอมิเตอร์ เมื่อสับสวิตช์กระแสในขดลวดปฐมภูมิ(P) จะเพิ่มขึ้นตามเวลา ฟลักซ์จะเกิดขึ้นในแกนเหล็กและจะคล่อง ขดลวดทุติยภูมิ(S) ตามกฎมือขวาของเฟลมมิง (Fleming's right hand rule) ทิศทางของแรงดันเหนี่ยวนำจะเป็นไปตามลูกศรของรูปที่1 เมื่อสวิตช์ถูกเปิดฟลักซ์ที่มีอยู่ในแกนเหล็กวงแหวนจะยุบตัวววกเป็นศูนย์จะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำในทางตรงข้ามกับกรณีแรก กาลวานอมิเตอร์จะชี้ทิศทางของการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำ ทั้งตอนสับสวิตช์ และตอนเปิดสวิตช์



รูปที่ 2.1 การทดลองของฟาราเดย์

ชุดทดลองของฟาราเดย์ นับได้ว่าเป็นพื้นฐานในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับในปัจจุบัน จะแตกต่างกับบ้างก็เฉพาะในเรื่องการออกแบบ การใช้วัสดุในการสร้าง ส่วนหลักการทำงานจะเป็นแบบเดียวกับ

ที่ฟาราคย์ได้เสนอไว้ทั้งหมด เช่นแทนที่จะต่อขดลวดปฐมภูมิ เข้ากับไฟกระแสตรงแล้วเปิดสวิตช์ เพื่อให้เกิดแรงดันกลับไปมา หม้อแปลงปัจจุบันจะต่อเข้ากับไฟกระแสสลับ ฟลักซ์ที่เกิดในแกนเหล็กจะเปลี่ยนแปลงขนาดตามเวลาทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดทุติยภูมิ เช่นกัน

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดที่ใช้ในการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยลักษณะการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเป็นเครื่องมือในการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ซึ่งไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงกำลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานในรูปแบบอื่นเหมือนกับ มอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า แต่หม้อแปลงไฟฟ้าจะเปลี่ยนเฉพาะค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ซึ่งแรงดันไฟฟ้าอาจจะถูกเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า แต่ไม่ได้หมายความว่าหม้อแปลงไฟฟ้าจะสร้างพลังงานได้แต่ทุกๆแรงดันที่เพิ่มขึ้นหมายถึง กระแสไฟฟ้าจะลดลง โดยหม้อแปลงไฟฟ้าจะเปลี่ยนแรงดันให้มีค่าสูงขึ้นหรือต่ำลงจากเดิมก็ได้แต่กระแสไฟฟ้าจะมีค่าตรงกันข้ามกับแรงดันด้วย

การแบ่งชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้าอาจจะแบ่งตามจำนวนเฟส , วิธีการระบายความร้อนแต่ส่วนมากจะแบ่งชนิดของหม้อแปลงตามขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้ามากกว่าคือ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power transformer) และ หม้อแปลงระบบจำหน่าย (Distribution transformer) ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะเป็นหม้อแปลงที่ใช้งานในระบบสายส่งที่มีขนาดใหญ่ทั้งขนาดและกำลังงานและยังมีแรงดันสูง ส่วนหม้อแปลงระบบจำหน่าย จะมีขนาดเล็กกว่าหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังซึ่งเหมาะสมกับย่านที่อยู่อาศัย ส่วนหม้อแปลงชนิดอื่นๆที่ถูกสร้างขึ้นมามีอีกเช่น หม้อแปลงเครื่องมือวัด(Instrument transformer) , หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าคงที่(Constant current transformer) เป็นต้น

2.3 โครงสร้างของหม้อแปลง

ตามลักษณะ โครงสร้างของหม้อแปลงที่จะนำมาเป็นหลักพิจารณาในการแบ่งชนิดของหม้อแปลงได้ โดยโครงสร้างของหม้อแปลงจะมีอยู่ 2 ชนิดหลักคือ

1. ชนิดขดลวดล้อมแกน (Core type)

2. ชนิดแกนล้อมขดลวด (Shell type)

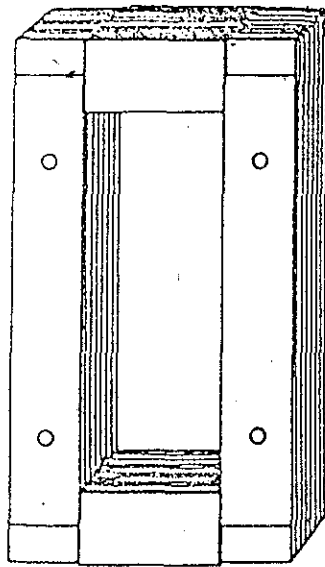
โดยโครงสร้างของทั้ง2ชนิดจะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับหม้อแปลงในแต่ละชนิด ซึ่งโครงสร้างแบบชนิดขดลวดล้อมแกน จะเป็นโครงสร้างที่ง่ายและใช้พื้นที่หน้าตัดน้อยแต่มีความยาวของวงจรแม่เหล็กมากซึ่งทำให้สามารถพันขดลวดได้มากรอบ และการพันขดลวดบนหม้อแปลงชนิดขดลวดล้อมแกน นี้จะกระทำได้ง่ายโดยจะพันเป็นรูปทรงกระบอก และโครงสร้างแบบนี้ยังเหมาะที่จะใช้กับแรงดันสูงซึ่งมีการใช้ขดลวดมาก และการฉนวนที่แข็งแรงซึ่งก็จะทำให้มีกระแสต่ำ และขดลวดที่ใช้ก็จะมีขนาดเล็กลง ซึ่งจะทำให้ค่าความหนาแน่นแม่เหล็กน้อยด้วย

ส่วนหม้อแปลงแบบชนิดแกนล้อมขดลวด(Shell type) และแบบอื่นๆนั้นจะใช้ในหม้อแปลงที่มีแรงดันไม่สูงมากและใช้จำนวนรอบขดลวดน้อย มีการกับฉนวนไม่มาก มีกระแสสูง และความถี่ต่ำ และจะมีฟลักซ์แม่เหล็กเป็นลักษณะเดียวกัน

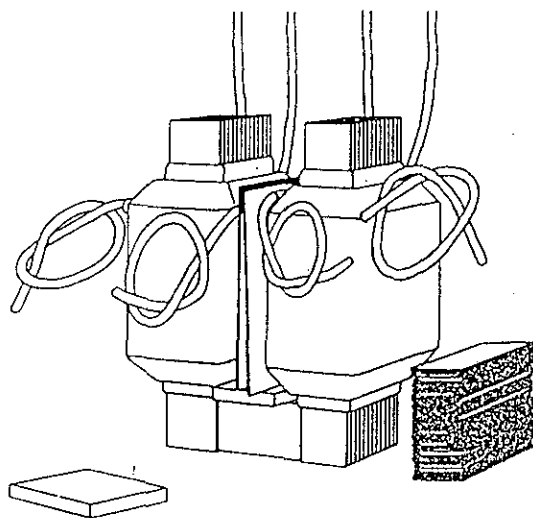
2.3.1 โครงสร้างชนิด ขดลวดล้อมแกน (Core type)

ลักษณะพื้นฐานของหม้อแปลงชนิดขดลวดล้อมแกนนี้จะมีลักษณะแกนเหล็กดังรูปที่1.2 ซึ่งเป็นแกนเหล็กของหม้อแปลงเฟสเดียว โดยในส่วนของแกนเหล็กนี้จะประกอบมาจากแผ่นเหล็กบางๆ โดยจะมี

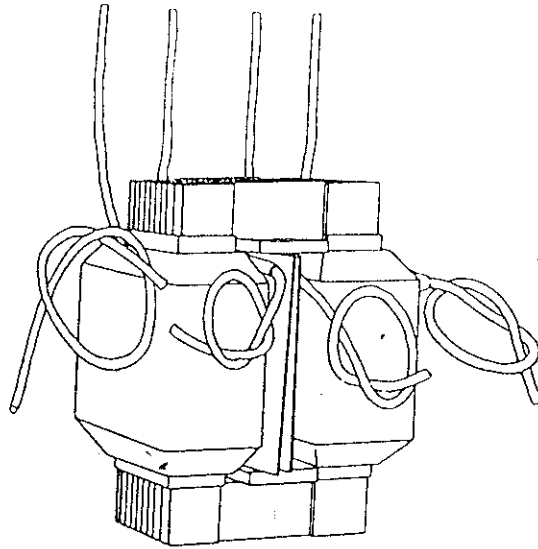
ส่วนที่เรียกว่า ส่วนขา ซึ่งเป็นส่วนที่ถูกขดลวดคล้อง และส่วนที่เรียกว่าส่วนเข้าคู่ (Yokes) ซึ่งเป็นส่วนที่มีขนาดสั้นกว่าประมาณ 2.5 เท่าของส่วนขา และหม้อแปลงโครงสร้างแบบขดลวดล้อมแกนนี้จะมีส่วนขดลวดอยู่ 4 แกน โดยขดลวดทั้ง 4 แกนนี้จะเป็นแกนของด้านปฐมภูมิ 2 แกน และแกนทุติยภูมิ 2 แกน ซึ่งในการนำขดลวดมาคล้องกับขาของแกนเหล็ก จะนำเอาด้านที่มีแรงดันต่ำอยู่ด้านในขาแกนเหล็ก ส่วนขดลวดที่มีแรงดันสูงจะอยู่ด้านนอก โดยในการคล้องของขดลวดนี้จะต้องมีการกันฉนวนระหว่างแกนเหล็กกับตัวของขดลวด และระหว่างชั้นภายในขดลวดก็มีการกันฉนวนระหว่างชั้นซึ่งเป็นการป้องกันการลัดวงจรภายในขดลวด และในขณะที่คล้องขดลวดก็จะเปิดช่องด้านบนของแกนเหล็กออกเสียก่อนดังรูป 2.3 และเมื่อคล้องขดลวดเสร็จก็ทำการปิดแกนเหล็กส่วนบน ซึ่งจะได้รูปแบบของหม้อแปลงที่ประกอบแล้วดังรูป 2.4



รูปที่ 2.2 แกนเหล็กหม้อแปลงชนิดขดลวดล้อมแกน



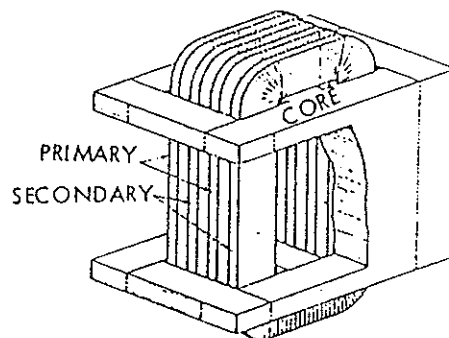
รูปที่ 2.3 ตำแหน่งการใส่ขดลวดในแกนเหล็ก



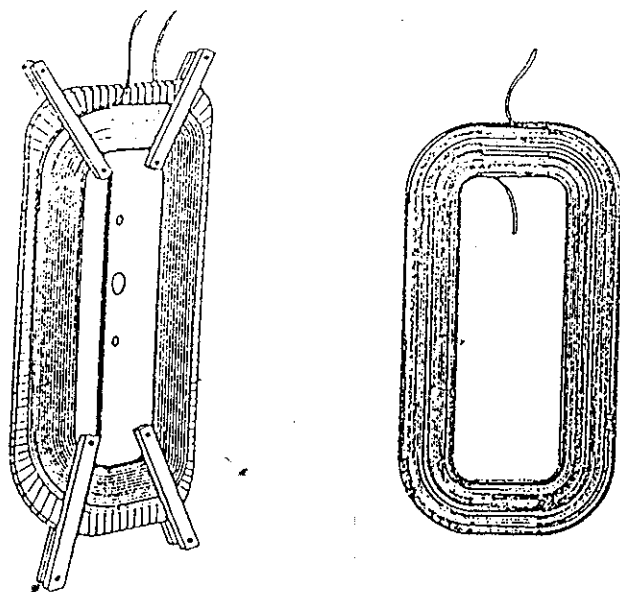
รูปที่ 2.4 หม้อแปลงชนิดขดลวดล้อมแกนเมื่อประกอบแล้ว

2.3.2 โครงสร้างชนิดแกนล้อมขดลวด (Shell type)

ลักษณะพื้นฐานหม้อแปลงประเภทนี้จะมีรูปลักษณะตามรูป 2.5 ซึ่งหม้อแปลงชนิดนี้จะเกิดฟลักซ์รั่ว (Leakage flux) น้อยที่สุดเพราะว่าขดลวดจะพันรอบแกนกลางของแกนเหล็กและแกนเหล็กด้านนอกก็ล้อมรอบขดลวดอีกชั้นหนึ่งซึ่งรูป 2.5 จะแสดงโครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลงเฟสเดียวแบบชนิดแกนล้อมขดลวด ซึ่งแกนเหล็กทำมาจากแผ่นเหล็กบางๆ นำมาประกอบกัน โดยในหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ ขดลวดของหม้อแปลงชนิดนี้จะมีลักษณะการพันเป็นแบบ แพนเค้ก บนตัวแบบ ดังรูป 2.6 โดยขดลวดจะมีลักษณะเป็นพื้นเหลี่ยม ซึ่งจะใช้ 1 รอบต่อ 1 ชั้น โดยแต่ละแผ่นขดลวดนี้จะมีการฉนวนที่พิเศษระหว่างรอบ



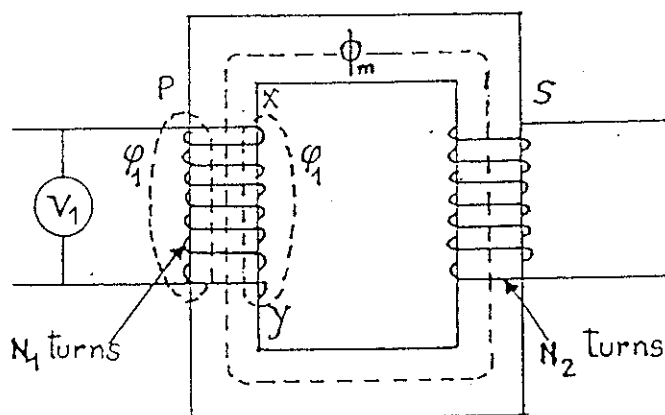
รูปที่ 2.5 ภาคตัด โครงสร้างหม้อแปลงชนิดแกนล้อมขดลวด



รูปที่ 2.6 ขดลวดแกนค้ำ

2.4 การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ต่างๆในขดลวดปฐมภูมิในสภาวะไร้โหลด

จากสภาวะไร้โหลดซึ่งแสดงว่าขดลวดทางด้นทุติยภูมิมีการเปิดวงจร และมีการป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้าทางขดลวดปฐมภูมิดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 หม้อแปลงพื้นฐาน

P=ขดลวดปฐมภูมิ

S=ขดลวดทุติยภูมิ

N_1 =จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ

N_2 =จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ

Φ_m =ฟลักซ์ร่วม (Mutual flux)

Φ_l =ฟลักซ์รั่ว (leakage flux)

จากวงจรเปิดตามรูปที่ 2.7 ถ้าทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกระแสปฐมภูมิ(I_o) กับแรงดันปฐมภูมิในรูปแบบของหม้อแปลงอุดมคติซึ่งจะมีข้อสมมุติที่ว่า

1. หม้อแปลงมีค่าฟลักซ์ ในแกนเหล็กที่แปรผันโดยตรงกับแรงเคลื่อนแม่เหล็ก(ค่าความซาบซึมได้(Permeability) มีค่าคงที่)
2. ไม่มีกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก
3. ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กทั้งหมดเป็นฟลักซ์ร่วม
4. ในขดลวดปฐมภูมิเสมือนไม่มีความต้านทาน

จากข้อสมมุตินี้เมื่อ ไม่มีค่าความต้านทานในขดลวดปฐมภูมิทำให้กระแสในขดลวดไหลได้อย่างไม่มีขีดจำกัดเมื่อกระแสมีการเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้ค่าฟลักซ์ เปลี่ยนแปลงตามด้วยซึ่งจะทำให้เกิด แรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดปฐมภูมิตาม กฎของเลนซ์ โดยแรงดันนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันที่ขดลวดปฐมภูมิต่ออยู่

จากกฎของฟาราเดย์ที่ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ตามเวลาจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำและฟลักซ์ก็จะมีเปลี่ยนแปลงตามกฎของเลนซ์ ทำให้สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$e = -N_1 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (2.1)$$

e = แรงดันเหนี่ยวนำ

N_1 =จำนวนขดลวดปฐมภูมิ

ϕ_m = ฟลักซ์ร่วม

t = เวลา

ซึ่งจากสมการที่(2.1)สามารถหาค่าแรงดันประสิทธิผล(effective)ตามข้อกำหนดทั้ง 4 ข้อได้ค่า

$$E_1 = V_1 = \sqrt{2} \times 2\pi f N_1 \phi_{\max} = 4.44 f N_1 \phi_{\max} \quad (2.2)$$

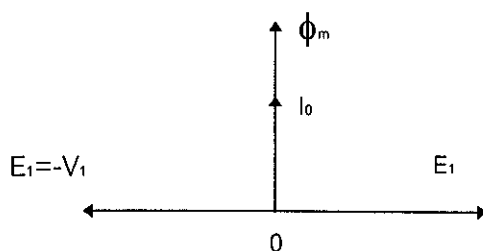
E_1 = แรงดันเหนี่ยวนำทางปฐมภูมิ [V.]

V_1 = แรงดันที่ต่อกับขดลวดปฐมภูมิ [V.]

f = ความถี่ [Hz.]

$\phi_{\max}$ =ค่าฟลักซ์ร่วมที่สูงสุด [Wb.]

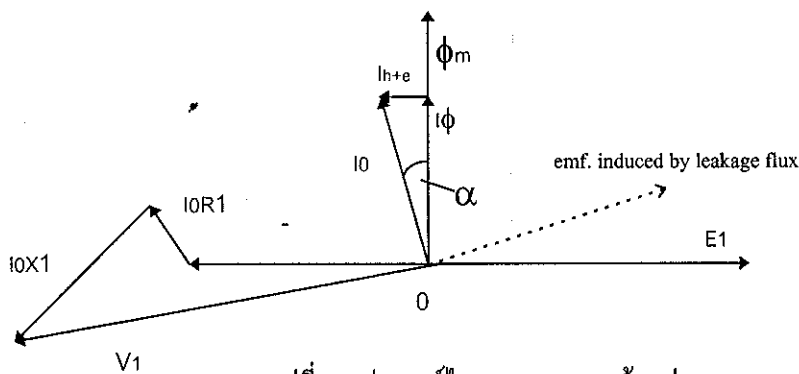
และสามารถเขียนเฟสเซอร์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในสถานะไว้โหลดของขดลวดปฐมภูมิในเงื่อนไขว่าเป็นหม้อแปลงในอุดมคติได้ดังนี้



รูปที่ 2.8 เฟสเซอร์หม้อแปลงอุดมคติในสถานะเปิดวงจรด้านปฐมภูมิ

จากรูปที่ 2.8 เป็นไปตามเงื่อนไขที่ว่าไม่มีกำลังสูญเสียในแกนเหล็กซึ่งโดยในความเป็นจริงแล้วในหม้อแปลงจะมีกำลังงานสูญเสียเนื่องจากอิทธิพลของฮิสเตรีซิสและกระแสเอ็ดดี้ โดยจากผลของกำลังงานสูญเสียนี้จะทำให้กระแส I_0 จะมีมุมเฟสหน้าพลาซม ϕ_m เป็นมุม α ซึ่งมีค่าน้อยมาก และสามารถแบ่งแยกกระแสกระตุ้น I_0 ออกเป็น 2 ส่วนคือ กระแสทำแม่เหล็ก (Magnetizing current, I_ϕ) ซึ่งมีมุมเฟสทับกับ ϕ_m และกระแสกระตุ้นในส่วนสูญเสียในแกนเหล็ก (I_{h+e}) ซึ่งมีเฟสทับกับแรงดัน V_1

และเนื่องจากค่าฟลักซ์ในแกนเหล็กไม่ได้มีเฉพาะฟลักซ์ร่วมอย่างเดียวแต่จะมีฟลักซ์รั่ว (ϕ_l) ด้วย โดย ϕ_l จะทำให้เกิดค่าเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (emf) มีเฟสล่าหลัง ϕ_l อยู่ 90 องศา และเป็นปฏิภาคกับ ϕ_l โดยประมาณซึ่ง ϕ_l จะมีค่าแปรตามและมีมุมเฟสทับกับกระแสกระตุ้น (I_0) โดยสามารถเขียนเฟสเซอร์ของหม้อแปลงในสภาวะไร้โหลดได้ใหม่ดังนี้



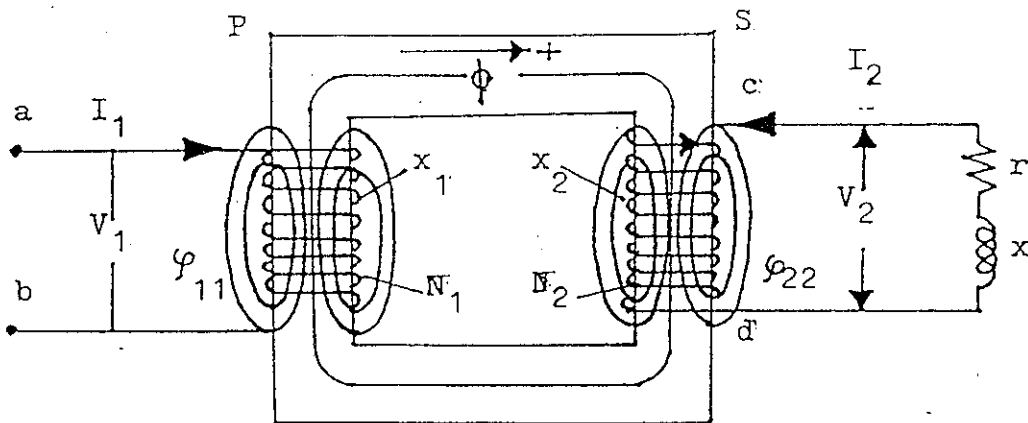
รูปที่ 2.9 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลง

R_1 = ค่าความต้านทานทางปฐมภูมิ

X_1 = ค่ารีแอक्टแดนซ์ทางปฐมภูมิ

2.5 การพิจารณา ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ต่างๆในสภาวะมีโหลด

การพิจารณาความสัมพันธ์ในสภาวะมีโหลดนี้จะพิจารณาว่าหม้อแปลงเป็นหม้อแปลงในอุดมคติ โดยจะให้กระแสทางปฐมภูมิมียทิศทางเป็นบวกเมื่อกระแสไหลเข้าขดลวดปฐมภูมิและกระแสดยุคิยภูมิจะมีค่าเป็นบวกเมื่อกระแสไหลออกจากขดลวดทุติยภูมิ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 หม้อแปลงในสภาวะมีโหลด

เมื่อพิจารณารูป 2.10 และจากกฎของฟาราเดย์จะแสดงได้ว่า

$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\phi}{dt} ; & e_2 &= -N_2 \frac{d\phi}{dt} \\ \frac{e_1}{N_1} &= \frac{e_2}{N_2} = \frac{d\phi}{dt} \\ \frac{e_1}{e_2} &= \frac{N_1}{N_2} \end{aligned} \quad (2.3)$$

และเมื่อมีการต่อโหลดทางดำนขดลวดทุติยภูมิ จะทำให้ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางขดลวดทุติยภูมิ $N_2 I_2$ เกิดขึ้น โดยแรงเคลื่อนแม่เหล็กนี้มีค่าประมาณเท่ากับค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางปฐมภูมิ $N_1 I_1$ เพราะว่าค่าความซาบซึมได้ (Permeability) ของแกนเหล็กมีค่าสูงมากๆ ซึ่งเมื่อพิจารณาในวงจรแม่เหล็กเสมือนว่ามีค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance) ต่ำมากด้วย

ดังนั้นค่า

$$N_1 I_1 \approx N_2 I_2 \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (1.3), (1.4) สามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = a \quad (2.5)$$

a = อัตราส่วนการทรานส์ฟอร์ม

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.5 จะแสดงได้ว่าสามารถจะทำการคิดค่าพารามิเตอร์จากขดลวดทุติยภูมิ ในด้านปฐมภูมิและคิดค่าพารามิเตอร์ของทางปฐมภูมิทางขดลวดทุติยภูมิได้

ค่าพารามิเตอร์ทางทุติยภูมิคิดเทียบใน ด้านปฐมภูมิ

$$E'_2 = a E_2$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{a}$$

$$Z'_2 = a^2 Z_2$$

ค่าพารามิเตอร์ทางปฐมภูมิคิดเทียบในด้านทุติยภูมิ

$$E'_1 = \frac{E_1}{a}$$

$$I'_1 = a I_1$$

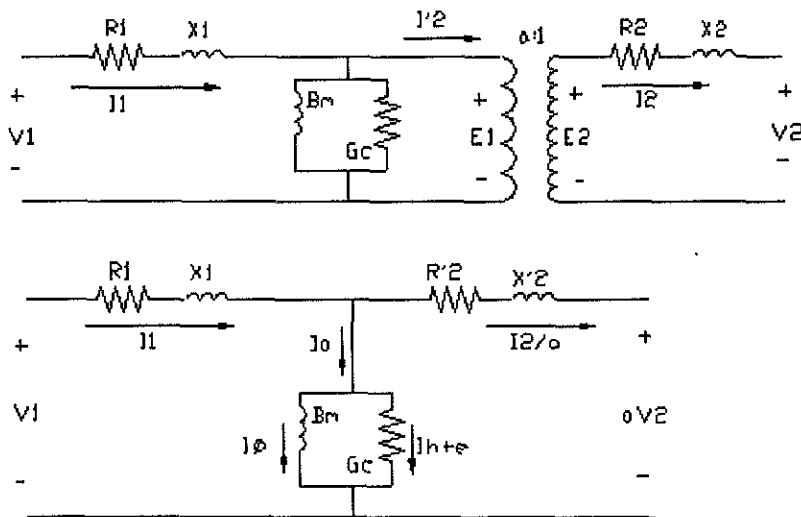
$$Z'_1 = \frac{Z_1}{a^2}$$

2.6 การพิจารณาวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติของหม้อแปลงที่ใช้กันจริงจะมีความแตกต่างกับหม้อแปลงในอุดมคติ โดยในหม้อแปลงที่ใช้งานจริง ๆ นั้นจะมี ผลกระทบที่เกิดจากค่าความต้านทานของขดลวด, สนามแม่เหล็กรั่ว , ฟลักซ์และกระแสกระตุ้นซึ่งบางทีค่าความจุไฟฟ้าของขดลวดก็มีความสำคัญต่อผลการวิเคราะห์ หรือผลจากความถี่ก็มีผลต่อวงจรและคุณสมบัติของหม้อแปลงด้วย แต่ในระบบการส่งจ่ายของหม้อแปลงระบบจำหน่ายจะไม่พิจารณาถึงความถี่สูงโดยปกติค่า ความถี่จะมีค่าคงที่ดังนั้นในวงจรของหม้อแปลงระบบจำหน่ายก็ไม่ทำการคิดค่าความจุไฟฟ้าของขดลวด

จากผลรวมของฟลักซ์ที่เกิดขึ้น ในหม้อแปลงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือฟลักซ์ร่วมกับฟลักซ์รั่ว ซึ่งจากผลของฟลักซ์รั่ว นี้จะทำให้เกิด ค่ารีแอแกนซ์รั่ว(X_1) ทั้งทางปฐมภูมิและทุติยภูมิ และนอกจากจะเกิดค่ารีแอแกนซ์รั่วแล้วในขดลวดทั้งสองยังมีค่าความต้านทาน R ด้วย ซึ่งจากผลของค่า R และค่า X นี้ทำให้เกิดแรงดันตกในขดลวดทั้งสอง

และผลจากฟลักซ์ร่วมที่เชื่อมขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิจะเป็นส่วนในการทรานสฟอร์มค่าพารามิเตอร์ต่างๆของด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยสามารถเขียนเป็นวงจรได้ดังนี้



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของหม้อแปลง

จากรูป 2.11 ผลของกระแสทางปฐมภูมิ (I_1) จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนกระแสกระตุ้น (I_0) กับกระแสส่วนโหลด (I_1') โดยส่วนกระแสส่วนโหลดนี้เกิดจากส่วนของกระแสทุติยภูมิและส่วนกระแสกระตุ้นซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดฟลักซ์ร่วมซึ่งค่ากระแสกระตุ้นนี้จะไม่เป็นคลื่นไซน์ เนื่องจากผลของวงปิดฮิสเทอรีซิส และกระแสกระตุ้นสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนกระแสแม่เหล็ก (I_ϕ) กับกระแสส่วนกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (I_{h+c}) และจากรูป 2.11 จะมีส่วนประกอบอีก 2 ส่วนคือ ค่าความนำ G_c และค่าชัศเชิงแกน (B_m) ซึ่งขนานกันตามรูป 2.11 โดยกำลังงานจากค่าความนำ E^2/G_c จะเป็นเหตุให้เกิดค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ซึ่งกระทำโดยฟลักซ์ร่วม โดยค่า G_c จะมีค่าสมมุติว่าคงที่ แต่ค่ากำลังงานสูญเสียจะสมมุติให้แปรค่าตามแรงดันยกกำลังสองซึ่งก็

คือแปรตาม $(f\phi_{\max})^2$ ด้วยส่วนค่าชัศเชิงเตนซ์ (B_m) จะมีค่าแปรตามจุดอิมตัวของแกนเหล็กโดยค่า B_m จะสมมุติค่าว่าคงที่ โดยทั้ง G_c และ B_m จะหาจากที่แรงดันและความถี่ที่พิกัดซึ่งส่วนมากจะนิยมให้มีค่าคงที่ในการคำนวณที่สภาวะปกติ

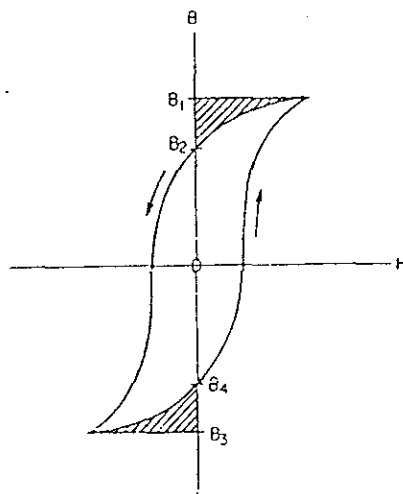
2.7 กำลังงานสูญเสียในหม้อแปลง

กำลังงานสูญเสียในหม้อแปลงสามารถแบ่งออกเป็นส่วนใหญ่ๆ ได้ 2 ส่วนคือ กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กกับกำลังงานสูญเสียในขดลวด โดยกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กนั้นจะมีค่าประมาณคงที่ไม่ขึ้นกับโหลด ส่วนกำลังงานสูญเสียในขดลวดจะเป็นสัดส่วนกับค่ากระแสในขดลวดนั้นๆ ยกกำลังสอง

2.7.1 กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก(Core loss) กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าของฟลักซ์ในแกนเหล็กและผลกระทบจาก ค่าสูงสุดของฟลักซ์ในแกนเหล็ก, ความถี่, รูปลักษณะคลื่นของฟลักซ์ในแกนเหล็ก, คุณภาพของเหล็กที่นำมาทำเป็นแกน, ความหนาของแผ่นเหล็ก, น้ำหนักของแกนเหล็ก โดยกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ กำลังงานสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส กับ กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสเอ็ดดี้

2.7.1.1 กำลังงานสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส

จากวงปิดฮิสเทอรีซิส ซึ่งเป็น คุณสมบัติของวัสดุ ferromagnetic ซึ่งเกิดจากผลในระดับอะตอมของโครงสร้างของวัสดุที่เรียกว่า โดเมน(Domain) ซึ่งอนุภาคโดเมนเหล่านี้เมื่อทำการใส่พลังงานเข้าไปในแกนเหล็กกำลังงานบางส่วนจะถูกใช้ในการวางและหมุนส่วนของโดเมนของแม่เหล็กของวัสดุที่ใช้ทางแกนเหล็ก ซึ่งพลังงานที่ส่งมอบไปที่ ขดลวดบนแกนเหล็กในคาบเวลา ก็คือกำลังงานสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส โดยกำลังงานสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส สามารถคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ 2.12 วงปิดฮิสเทอรีซิส

$$\text{จาก } e = -N \frac{d\phi}{dt}$$

ค่ากำลังงานชั่วขณะจาก $(-ei)$ ในเวลา dt จะได้

$$dW = -eidt = Nid\phi \quad [\text{Joules.}]$$

$$W = \int_{-\phi_m}^{+\phi_m} Nid\phi$$

$$d\phi = AdB$$

$$Ni = Hl$$

$$W = Al \int_{-B_m}^{+B_m} HdB$$

$$= Al \left[\int_0^{B_1} HdB - \int_{B_1}^{B_2} HdB + \int_{B_2}^0 HdB + \int_0^{B_3} HdB - \int_{B_3}^{B_4} HdB + \int_{B_4}^0 HdB \right]$$

$$W = Al \eta B_m^x$$

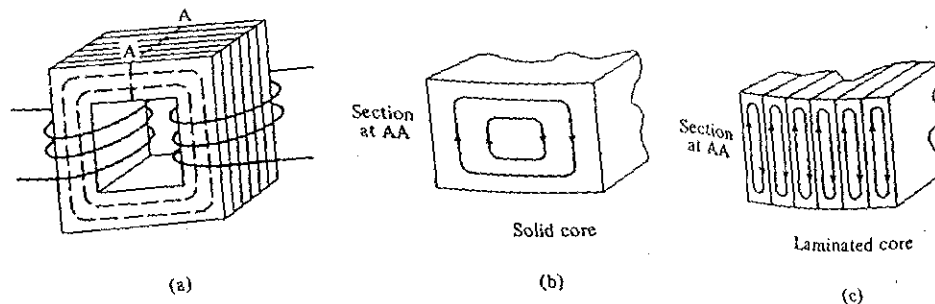
ค่า Al แทนได้ด้วย M/δ ซึ่ง M คือมวลของแกน และ δ คือความหนาแน่นจำเพาะของแกนเหล็ก

$$P_h = \eta \frac{M}{\delta} B_m^x \quad (2.6)$$

x คือค่า Proportionality constant characteristic

2.7.1.2 กำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสเอ็ดดี้

กระแสเอ็ดดี้เกิดเนื่องจาก เมื่อแกนเหล็กหม้อแปลงเป็นตัวนำเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า(emf.)และกระแสในแกนเหล็ก โดยกระแสที่ไหลวนอยู่ในแกนเหล็กนี้จะเรียกว่า กระแสเอ็ดดี้ โดยกระแสเอ็ดดี้จะมีทิศทางการไหลวนในทิศทางที่ต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ร่วม โดยกระแสเอ็ดดี้จะส่งผลให้เกิดกำลังงานสูญเสีย และส่งผลให้เกิดความร้อนในแกนเหล็ก ดังนั้นในการจัดสร้างหม้อแปลงจะทำการลดการไหลของกระแสเอ็ดดี้ ได้โดยการใช้ แผ่นเหล็กที่ทำการตัดเป็นชิ้นบางๆ และทำการกันฉนวน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความต้านทานในแกนเหล็กสูงขึ้นซึ่งจะทำให้กระแสเอ็ดดี้ลดลง



รูปที่ 2.13 ทางของกระแสเอ็ดดี้ที่ไหลในแผ่นเหล็ก

จากผลของการทำการสร้างแกนเหล็กด้วยแผ่นเหล็กบางๆ ทำการกันจนระหว่างแผ่น จะทำให้ลดกำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสเอ็ดดี้ได้ ซึ่งถ้ากำหนดใน ϵ คือค่าความหนาแผ่นเหล็ก ค่ากำลังงานสูญเสียจะมีค่าแปรผันเป็นกำลังสองของความหนาของแผ่นเหล็ก โดยสมการที่พิสูจน์โดย ไพบูลย์[1] จะได้

$$P_e = \epsilon \frac{M}{\delta} f^2 B_m^2 t^2 \quad [\text{Watts}] \quad (2.7)$$

$$= k_e f^2 B_m^2$$

ϵ = Proportionality constant

M = มวล

δ = ความหนาแน่นจำเพาะของเหล็ก

t = ความหนาของแผ่นเหล็ก

B_m = ฟลักซ์สูงสุด

f = ความถี่

k_e = ค่าคงที่

$$\therefore \text{ค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (Ph+e)} = P_h + P_e = \frac{M}{\delta} (\eta B_m^2 + \epsilon f^2 B_m^2)$$

$$P_h + e = k_h f B_m^2 + k_e f^2 B_m^2 \quad (2.8)$$

จากสมการที่(2.8) สามารถหา ค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กได้ในทางปฏิบัติจะทำการหาค่า กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก โดยทำการเปิดวงจรทางด้านแรงดันสูง ซึ่งค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าก็คือค่า กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กนั่นเอง

2.7.2 กำลังงานสูญเสียในขดลวด (Copper loss)

กำลังงานสูญเสียในขดลวดของหม้อแปลงจะเกิดขึ้นเมื่อหม้อแปลงทำการจ่ายโหลด โดยกำลังงานสูญเสียในขดลวดนี้จะมีส่วนประกอบอยู่ 2 ส่วนคือ ส่วนแรก จะเป็นผลมาจากการไหลของกระแสไฟฟ้า ยกกำลังสอง ซึ่งไหลในสายลวดตัวนำ ที่มีค่าความต้านทาน และส่วนที่สอง จะเป็นผลมาจากกระแสเอ็ดดี้ที่ไหลวนในขดลวด โดยค่ากำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสเอ็ดดี้ี้จะมีค่าประมาณ 15% ของค่ากำลังงานสูญเสียในขดลวดทั้งหมด ค่ากำลังงานสูญเสียในขดลวดส่วนมากจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของขดลวดซึ่งค่าความต้านทานนี้จะเปลี่ยนแปลงเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับอุณหภูมิของขดลวด แต่ค่ากำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสเอ็ดดี้ี้จะเป็นปฏิกิริยาแบบผกผันกับอุณหภูมิของขดลวด

ผลรวมของกำลังงานสูญเสียทั้งสองนี้สามารถทำการหาค่าโดยทำการลัดวงจรขดลวดทุติยภูมิและทำการวัดค่าพารามิเตอร์ในด้านขาเข้า ซึ่งจะวัดกำลังไฟฟ้าที่กระแสหลักซึ่งกำลังงานไฟฟ้าที่วัดได้นี้จะเป็น กำลังงานสูญเสียในขดลวดที่โหลดพิกัด

2.8 การพิจารณาประสิทธิภาพของหม้อแปลง

ประสิทธิภาพ(η)ของหม้อแปลง คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังงานจ่ายออก และกำลังงานจ่ายเข้า โดยส่วนใหญ่ จะบอกเป็นค่าเปอร์เซ็นต์

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{\text{กำลังงานขาออก} \times 100}{\text{กำลังงานขาเข้า}} \\ &= \frac{\text{กำลังงานขาออก} \times 100}{\text{กำลังงานขาออก} + \text{กำลังงานสูญเสีย}} \\ &= \frac{(\text{กำลังงานขาเข้า} - \text{กำลังงานสูญเสีย}) \times 100}{\text{กำลังงานขาเข้า}}\end{aligned}\quad (2.9)$$

การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสเอ็ดดี้ และกำลังงานสูญเสียฮิสเทอรีซิส ค่ากำลังงานสูญเสียทั้งสองนี้เปลี่ยนแปลงตามค่ายกกำลังสองของความหนาแน่นของฟลักซ์ และความถี่ แต่ถ้าฟลักซ์ในแกนเหล็กของหม้อแปลงมีค่าแรงดันคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กก็ถือว่ามีความคงที่ตลอดทุกค่าของโหลด ทั้งนี้เป็นเพราะว่าขณะที่โหลดของหม้อแปลงมีขนาดเพิ่มขึ้นค่าฟลักซ์รวม ตามปกติจะน้อยลงแต่ฟลักซ์รั่วจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยมาก จึงถือว่าค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กมีความคงที่

และเมื่อหม้อแปลงทำการจ่ายโหลดก็จะเกิดกำลังงานสูญเสียในขดลวดโดยกำลังงานสูญเสียชนิดนี้ส่วนมากเกิดเนื่องมาจากกระแสที่ไหลในขดลวดยกกำลังสอง ซึ่งกำลังงานสูญเสียชนิดนี้จะเกิดเนื่องจากขดลวดทั้ง ด้านปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ โดยค่ากำลังงานสูญเสียในสองส่วนจะมีค่าประมาณเท่ากัน ดังนั้นการออกแบบหม้อแปลง สามารถเขียนสมการของประสิทธิภาพได้ว่า

$$\begin{aligned}\text{ประสิทธิภาพ } (\eta) &= \frac{V_2 I_2 \cos \theta_2}{V_2 I_2 \cos \theta_2 + I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + \text{core.loss}} \\ \text{core loss} &= P_h + e \\ \text{ประสิทธิภาพ } (\eta) &= \frac{V_2 I_2 \cos \theta_2}{V_2 I_2 \cos \theta_2 + P_h + e + I_2^2 \left(R_2 + \frac{R_1}{a^2} \right)}\end{aligned}\quad (2.10)$$

$\cos \theta_2$ = ค่าตัวประกอบกำลังของโหลด

∴ หาค่าประสิทธิภาพสูงสุดโดยการหาค่าผลต่างอนุพันธ์ $\frac{d\eta}{dI_2} = 0$ ซึ่งจะได้ว่า

$$\begin{aligned}
\frac{d\eta}{dI_2} &= \frac{-V_2 I_2 \cos \theta_2 \left[V_2 \cos \theta_2 + 2I_2 \left(R_2 + \frac{R_1}{a^2} \right) \right] + V_2 \cos \theta_2 \left[V_2 I_2 \cos \theta_2 + (P_h + e) + I_2^2 \left(R_2 + \frac{R_1}{a^2} \right) \right]}{\left[V_2 I_2 \cos \theta_2 + (P_h + e) + I_2^2 \left(R_2 + \frac{R_1}{a^2} \right) \right]^2} \\
&= 0 \\
V_2 \cos \theta_2 \left[V_2 I_2 \cos \theta_2 + (P_h + e) + I_2^2 \left(R_2 + \frac{R_1}{a^2} \right) \right] &= V_2 I_2 \cos \theta_2 \left[V_2 \cos \theta_2 + 2I_2 \left(R_2 + \frac{R_1}{a^2} \right) \right] \\
V_2^2 I_2 \cos^2 \theta_2 + V_2 I_2^2 \left(R_2 + \frac{R_1}{a^2} \right) \cos \theta_2 + V_2 (P_h + e) \cos \theta_2 &= V_2^2 I_2 \cos^2 \theta_2 + 2I_2^2 V_2 \left(R_2 + \frac{R_1}{a^2} \right) \cos \theta_2 \\
V_2 \cos \theta_2 (P_h + e) &= I_2^2 V_2 \left(R_2 + \frac{R_1}{a^2} \right) \cos \theta_2 \\
P_h + e &= I_2^2 \left(R_2 + \frac{R_1}{a^2} \right). \tag{2.11}
\end{aligned}$$

จากสมการที่(2.11) จะบ่งชี้ได้ว่าหม้อแปลงจะมีประสิทธิภาพสูงสุดตรงค่าที่หม้อแปลงจ่ายกำลังงานให้กับโหลดที่ทำให้กำลังงานสูญเสียของขดลวดเท่ากับ กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก

2.9 สรุป

ทฤษฎีพื้นฐานและภูมิหลังของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีความสำคัญในการออกแบบและสร้างหม้อแปลง โดยหม้อแปลงไฟฟ้าได้มีการพัฒนามาจากการทดลองของฟาราเดย์ในเรื่องแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งจะทำหน้าที่ส่งถ่าย แรงดัน, กระแส และค่าอิมพีแดนซ์ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งในหม้อแปลงไฟฟ้านั้น สนามแม่เหล็กจะถูกสร้างโดยผลจากกระแสในขดลวด และฟลักซ์แม่เหล็กส่วนมากจะไหลในแกนเหล็กเชื่อมกันระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ โดยผลของฟลักซ์ร่วมจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำระหว่างขดลวด โดยจะเป็นสัดส่วนกับจำนวนรอบในการพันขดลวดนั้น ซึ่งจะเป็นคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงแรงดัน แต่ฟลักซ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงนั้นไม่ใช่ฟลักซ์ร่วมทั้งหมดแต่จะเกิดฟลักซ์รั่วด้วยซึ่งผลของการเกิดฟลักซ์รั่วนี้อาจทำให้เกิดแรงดันตกเนื่องจากค่ารีแอคแตนซ์รั่ว แต่ฟลักซ์รั่วนั้นส่วนมากจะอยู่ในอากาศ ซึ่งจะทำให้ฟลักซ์รั่วมีค่าแปรผันโดยตรงเป็นเชิงเส้นกับกระแสที่เหนี่ยวนำ และค่ารีแอคแตนซ์รั่วที่เกิดขึ้นนั้นจะมีค่าประมาณคงที่

สำหรับในส่วนของขดลวดนั้น ปรากฏการณ์แรงดันเหนี่ยวนำในหม้อแปลงนั้นเกิดขึ้นเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์กับเวลา โดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นและลดลงของสนามไฟฟ้า และผลจากฟลักซ์ในแกนเหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดค่า แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้า (emf.) ในด้านปฐมภูมิ และค่าแรงดันตกเนื่องจาก ค่ารีแอคแตนซ์รั่ว(Leakage reactance) จะต้องทำให้เกิดความสมดุลกับแรงดันที่จ่ายเข้า ซึ่งส่ง

ผลให้ ค่าความต้านทานและค่าแรงดันตกเนื่องจากรีแอคแตนซ์มีค่าน้อย แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าย้อนกลับ(Counter emf.) จะมีค่าประมาณเท่ากับแรงดันจ่ายเข้าและฟลักซ์ในแกนเหล็กจะปรับตัวเองตามลำดับ ส่วนค่าผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก(mm.f.) ของกระแสไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะปรับตัวเองให้สร้างฟลักซ์ที่จะทำให้แรงดันเกิดความสมดุล

ในส่วนของกระแสด้านขดลวดทุติยภูมินั้นสามารถหาได้โดยแรงดันเหนี่ยวนำในด้านทุติยภูมิ , ค่าอิมพีแดนซ์รั่วด้านทุติยภูมิ และโหลด ส่วนค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นสามารถหาได้จากกำลังงานขาเข้าและกำลังงานขาออก หรือหาจากค่ากำลังงานสูญเสียในหม้อแปลง ซึ่งกำลังงานสูญเสียในหม้อแปลงนี้จะแบ่งเป็นส่วนใหญ่ๆ ได้ 2 ส่วนคือ กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก และกำลังงานสูญเสียในขดลวด

บทที่ 3

ความรู้เบื้องต้นในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

3.1 กล่าวนำ

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้นสามารถหาได้โดยใช้ทฤษฎีในการคำนวณหา และการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จำเป็นในการออกแบบนั้น สามารถหาได้โดยใช้ทฤษฎีที่จะกล่าวถึงดังในหัวข้อต่อไป

ในการออกแบบหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้านั้น จะประกอบด้วยขดลวดอยู่ 2 ขด คือ ขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding) และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding) ซึ่งขดลวดทั้งสองจะเกี่ยวข้องกับ สนามแม่เหล็ก เพราะว่า ขดลวดทั้งสองพันรอบแกนเหล็กเดียวกัน ดังนั้น ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Emf) จึงเกิดขึ้นจาก ฟลักซ์ใน ขดลวดปฐมภูมิ และ ทุติยภูมิ ซึ่งจะสัมพันธ์กับจำนวนรอบของการพันขดลวดด้วย

ค่าเฉลี่ยของ Emf ในขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding) คือ

$$E_{\text{ava}} = \frac{4 \Phi f T_p}{10^8} \quad \text{โวลต์}$$

เมื่อ T_p = จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ

เมื่อพิจารณาว่าเป็นแบบคลื่นไซน์
$$= \frac{4.44 f \Phi T_p}{10^8} \quad \text{โวลต์}$$

ดังนั้น
$$E_s = \frac{4.44 f \Phi T_s}{10^8} \quad \text{โวลต์}$$

เมื่อ T_s = จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ

จากความสัมพันธ์ตามสมการข้างต้นนำมาเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์กันแล้ว ได้ความสัมพันธ์ของ ความต่าง ศักย์และจำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ และ ทุติยภูมิดังนี้

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{T_p}{T_s} \quad \text{และ} \quad I_p T_p = I_s T_s$$

ดังนั้น
$$\frac{T_p}{I_s} = \frac{T_s}{I_p}$$

3.2 ชนิดของหม้อแปลง

3.2.1. หม้อแปลงกำลัง (Power transformer)

3.2.2 หม้อแปลงระบบจำหน่าย (Distribution transformer)

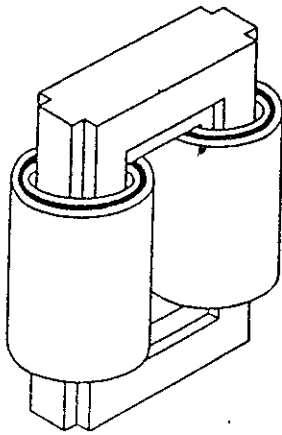
3.2.1. หม้อแปลงกำลัง (Power transformer) เป็นหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ ใช้ใน สถานีไฟฟ้าย่อย (Substation)

ซึ่งในการสร้างจะออกแบบให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อทำงานที่พิกัด เพราะว่าต้องทำงานตลอดเวลา

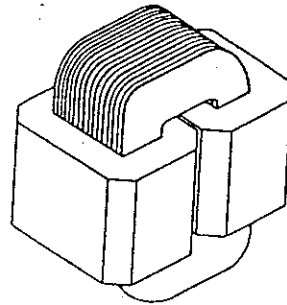
3.2.2 หม้อแปลงระบบจำหน่าย (Distribution transformer) เป็นหม้อแปลงที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ซึ่งในการสร้างจะออกแบบให้ได้ ประสิทธิภาพตลอดวัน (All-day efficiency) สูง แต่ประสิทธิภาพเมื่อทำงานที่พิกัดจะไม่สูงมากนัก ในการสร้างจะใช้ แผ่นเหล็กอัด (Laminate) เป็นแกนเหล็ก ซึ่งเมื่อใช้แกนเหล็กในการแบ่งชนิดของหม้อแปลงแล้วสามารถแบ่งหม้อแปลงออกเป็น 2 ชนิดคือ

- หม้อแปลงชนิดขดลวดล้อมแกน (Core type transformer)
- หม้อแปลงชนิด แกนล้อมขดลวด (Shell type transformer)

การวางแผ่น เหล็กอัด จะวางต่างกัน ในหม้อแปลงชนิดขดลวดล้อมแกน และ แกนล้อมขดลวด ดังแสดงในรูป



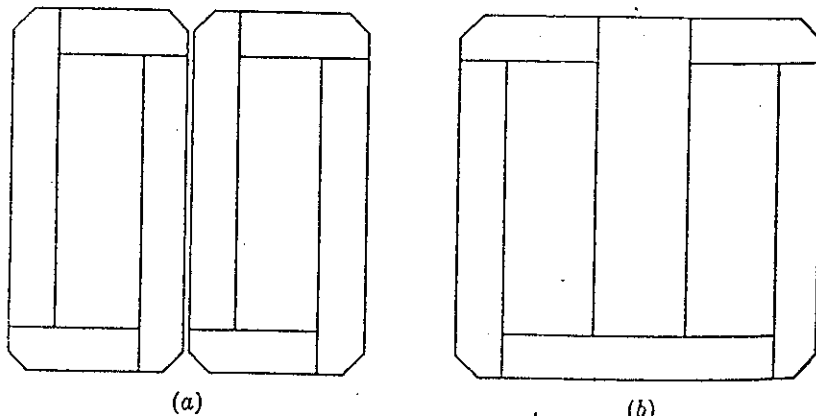
Core type



Shell type

รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของหม้อแปลงชนิดต่าง ๆ

การวางแผ่น เหล็กอัดจะใช้แผ่นเหล็กวางกันแบบ โดยมีการวางโดยปิดหัว - ท้าย สลับกันไป ดังรูป



(a) (b)
Two methods of assembling stampings (straight pieces) in shell-type transformers.

รูปที่ 3.2 แสดงการจัดวางแผ่นเหล็ก Laminate

3.3 สมการขาออก (โวลท์ / รอบ) Output equation : (Volts/ Turn)

$$\text{Volt- amperes} = \frac{4.44 f \Phi T_p I_p}{10^8}$$

แต่ $T_p I_p = T_s I_s$ โดยประมาณ และเมื่อเราใช้ความสัมพันธ์ $T I$ แทนลงในสมการ แล้ว ทำให้ได้สมการที่เป็นความต่างศักย์ขาออก (โวลท์/รอบ) ซึ่งใช้แทนสมการได้ทั้งขดลวดปฐมภูมิ และทุติยภูมิ คือ

$$\text{Volts - amperes} = \frac{4.44 f \Phi T I}{10^8} \quad (3.1)$$

จากสมการข้างต้นเราสามารถกำหนดค่าต่าง ๆ เพื่อให้เหมาะสมได้ โดยค่า ฟลักซ์ (Φ) วัดจากพื้นที่ หน้าตัด ของแกนเหล็ก และปริมาณ $T I$ หาได้จากพื้นที่หน้าตัดของขดลวด โดยขนาดของขดลวด และแกนลวดต้องให้เหมาะสมกับขนาดน้ำหนักรและประเภทของการใช้งาน

V_t (Volts/turn)

$$V_t = \frac{E}{T} = \frac{E I}{T I} = \text{Volts - ampere Output}$$

จากสมการ

$$E = \frac{4.44 f \Phi T}{10^8}$$

$$V_t = \frac{4.44 f \Phi}{10^8} \quad \text{คูณ } V_t \text{ เข้ากับสมการจะได้}$$

$$\begin{aligned} V_t^2 &= \frac{4.44 f \Phi E I}{10^8 T I} \\ &= K_1 \frac{f \Phi \times \text{Volt-ampere}}{T I 10^8} \\ &= \frac{1 \times \sqrt{\text{Volt-ampere}}}{K \sqrt{T I / f \Phi}} \end{aligned}$$

จากการวิเคราะห์สมการพบว่า

- ค่า f คงที่
- Ampere - turn เป็นสัดส่วนกันกับ Volts - ampere
- Φ เป็นสัดส่วนกลับกับ Volts - ampere

จะเห็นว่าในส่วนของการเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง สำหรับการออกแบบ หม้อแปลง โดยจะขึ้นอยู่กับชนิด และขนาดของ เาท์พุท อาจจะเขียนสมการโดยรวมได้ดังนี้

$$V_t = \frac{1}{c} \sqrt{\text{Volt - ampere}} \quad (3.2)$$

จากสมการในการออกแบบหม้อแปลง นั้น ค่าคงที่ (c) จะมีค่าดังต่อไปนี้

- หม้อแปลงชนิดขดลวดล้อมแกน (Core type) ระบบจำหน่าย (Distribution) c = 40-70
- หม้อแปลงชนิดขดลวดล้อมแกน (Core type) กำลัง (Power) c=30-35
- หม้อแปลงชนิดแกนล้อมขดลวด (Shell type) ระบบจำหน่าย (Distribution) c=25-40
- หม้อแปลงชนิดแกนล้อมขดลวด (Shell type) กำลัง (Power) c=20-30

โดยการพิจารณาในการเลือกใช้ค่าคงที่ (c) นั้นจะสัมพันธ์กับความต่างศักย์และความถี่คือ ค่า c ที่มีค่าน้อย นั้นจะสัมพันธ์กับ ความต่างศักย์ที่ต่ำ ๆ และความถี่ สูง ๆ

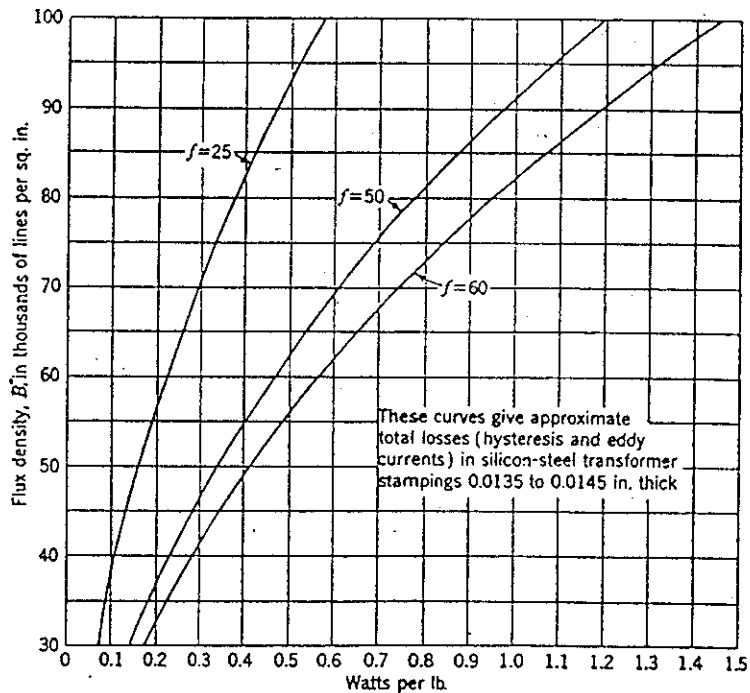
3.4 ข้อจำกัดการในการใช้ค่า ความหนาแน่นของฟลักซ์ และความหนาแน่นกระแส (Usual limits of flux density and current density)

ค่าความหนาแน่นของ ฟลักซ์ (B'') ในการออกแบบสามารถเลือกใช้ได้ตามตารางที่ 3.1

ชนิดของหม้อแปลง	f=25	f=50-60
หม้อแปลงระบบจำหน่าย (Distribution transformer)	75,000-90,000	70,000- 85,000
หม้อแปลงกำลัง (Power transformer)	85,000-95,000	80,000-95,000

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความหนาแน่นฟลักซ์ที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลง

ค่า กำลังสูญเสียในขดลวด ต่อ น้ำหนัก (Watt/pound) ที่ใช้ในการสร้าง หม้อแปลงจะเป็นไปตามกราฟ



Curves for calculating core loss in transformers.

รูปที่ 3.3 แสดงค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก

3.5 ความหนาแน่นของกระแสในขดลวด (Current density)

ความหนาแน่นของกระแสในขดลวดจะถูกจำกัดโดยอุณหภูมิ เพราะถ้ากำลังงานสูญเสีย ต่อ ปอนด์ ของขดลวด สูงจะทำให้เป็นอันตรายต่อขดลวด เพราะอุณหภูมิสูงจะทำให้การฉนวนเสียหาย ค่าความหนาแน่นของกระแสที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ในการออกแบบหม้อแปลงนั้น จะเป็นไปตามข้อกำหนดดังตารางที่ 3.2

Standard distribution transformer	(A / in ²)	900-1,100
Tranformer for use in central generating or substation	(A / in ²)	1,500-2,100
Larg , carfully design transformer	(A / in ²)	1,800-2,600

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความหนาแน่นของกระแสในขดลวด

ในการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสีย ต่อ ปอนด์ (Watts lost / pound)

ทองแดงมีความต้านทาน 1 Ω / cir-mil ที่ 60 องศาเซลเซียส

$$= \frac{234.7 + 75}{234.5 + 60}$$

$$= 1.05 \text{ } \Omega \text{ ที่ 75 องศาเซลเซียส}$$

ดังนั้น 1 ลูกบาศก์ นิ้วของทองแดง,ความยาว 1 นิ้ว และ 1 ตาราง นิ้ว ของพื้นที่หน้าตัด

$$\text{พื้นที่หน้าตัด} = \frac{4 \times 10^6}{\pi} \text{ cir - mil}$$

ดังนั้นค่าความหนาแน่นของกระแส (Δ) หาได้ดังสมการ

$$\text{Watts lost per cubic inch of copper} = \frac{\Delta^2 \times 1.05}{\pi / 4 \times 10^6}$$

$$= \frac{0.825\Delta^2}{10^6}$$

เมื่อ 1 ลูกบาศก์ นิ้ว = 0.32 ปอนด์

$$\begin{aligned} \text{watts lost per pound} &= \frac{0.825\Delta^2}{0.32 \times 10^6} \\ &= \frac{3.75\Delta^2}{10^6} \quad \text{watts/ pound} \end{aligned} \quad (3.3)$$

3.6 การฉนวน (Insulation)

ในการสร้างหม้อแปลงนั้นในขั้นตอนของการพันขดลวดไม่ว่าจะเป็นขดลวดปฐมภูมิ หรือ ขดลวดทุติยภูมินั้นระหว่างชั้นของการพันจะต้องมีการฉนวน และฉนวนที่ใช้ในหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนโดยใช้น้ำมัน ฉนวนที่ใช้จะต้องไม่ละลายในน้ำมัน และต้องแข็งแรง อาจจะใช้เทปขาวหรือกระดาษก็ได้ในหม้อแปลงที่ความต่างศักย์ไม่สูงมากนัก และความหนาของการฉนวนนั้นต้องเป็นไปตามข้อตกลง ดังตารางที่ 3.3

ความต่างศักย์ (โวลท์)	ความหนาของฉนวน (mils)
220	40
440	45
1000	55
2000	80

ตารางที่ 3.3 แสดงความหนาของการฉนวน

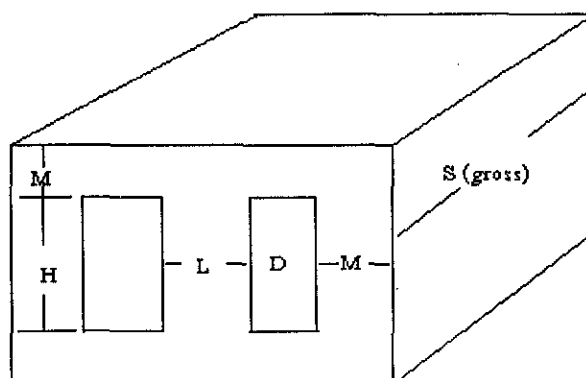
ค่าที่ใช้ในตารางนี้เป็นการฉนวนระหว่างชั้นภายในขดลวดปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ แต่ในการฉนวนระหว่างชั้นของปฐมภูมิ และทุติยภูมินั้นการฉนวนต้องใช้กระดาษฉนวนที่หนากว่าปกติ

3.7 ตัวประกอบพื้นที่ (Space factor : sf)

ค่า ตัวประกอบพื้นที่ (Space factor) คือค่าอัตราส่วนระหว่าง พื้นที่หน้าตัดของทองแดง และผลรวมของพื้นที่หน้าตัดของขดลวด ฉนวน และพื้นที่ว่างต่าง ๆ ด้วย ซึ่งค่าตัวประกอบพื้นที่ (Space factor) มีความสำคัญมากในการออกแบบหน้าต่าง (Windows) ของหม้อแปลง ซึ่งค่า ตัวประกอบพื้นที่สามารถหาได้โดยสมการ

$$sf = \frac{10}{30 + kv} \quad (3.4)$$

3.8 การออกแบบโครงสร้างแกนเหล็ก (Usual porpotions of built-up cores)



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของแกนเหล็กของหม้อแปลงชนิดแกนล้อมขดลวด

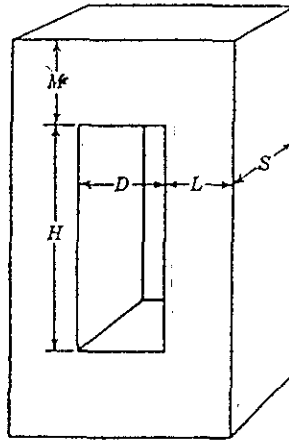
จากรูปแสดงโครงสร้างของหม้อแปลงแบบเฟสเดียว ชนิด แกนล้อมขดลวด

$$\text{พื้นที่หน้าตัด} = \frac{L(TI)}{\Delta \times sf} \quad (3.5)$$

อัตราส่วนของ H/D คือ H มากกว่า D $= 2.5-3.5$ เท่า

s = 2-3 เท่า ของ L

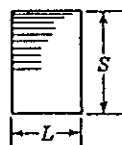
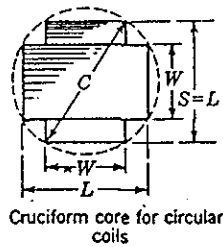
m = 0.5-0.75 เท่าของ L



รูปที่ 3.5 แสดงหม้อแปลงเฟสเดียวชนิดขดลวดล้อมแกน

ขนาดของหน้าต่าง เป็นไปตามอัตราส่วนระหว่าง H/D คือ

$$H/D = 2.5-3.5$$



Assembled stampings of single-phase core-type transformer.

รูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า C,W,L

ความสัมพันธ์ระหว่าง C, W, L

พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก $= 2WL - W^2$

differentiate สมการข้างต้นจะได้ $= 2\left(W \frac{dL}{dW} + L\right) - 2W$

และให้สมการข้างต้นมีค่าเท่ากับ 0 จะได้คำตอบอยู่ในรูป

$$= W^2 + L^2 = C^2$$

นำค่า dL/dW แทนในสมการ $= 2WdW + 2LdL = 0$

ดังนั้น $\frac{dL}{dW} = -\frac{W}{L}$

ความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ จะเป็นไปตามข้อตกลงคือ

$$W = 0.618 L$$

$$W = 0.525 C$$

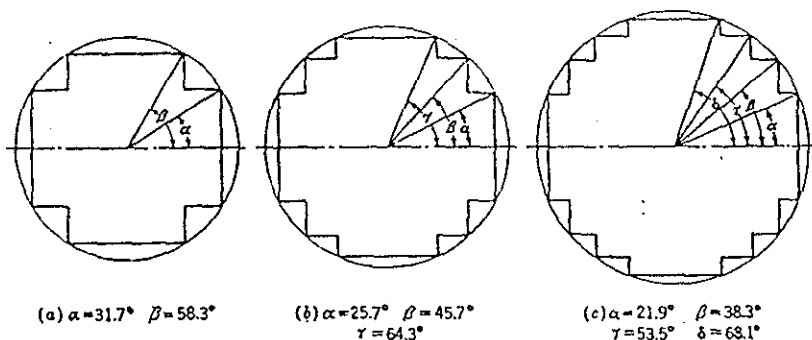
$$L = 0.85 C$$

เราสามารถหาความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ เหล่านี้คือ $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ ได้ดังนี้ในชนิดแกนเหล็กที่เป็นแบบ Cruciform section คือ

$$\begin{aligned} \alpha &= \tan^{-1} \frac{1/2W}{1/2L} \\ &= \tan^{-1} \frac{0.525}{0.85} \\ &= 31.7^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta &= \tan^{-1} \frac{0.85}{0.525} \\ &= 58.3^\circ \end{aligned}$$

แต่ถ้าต้องการ Cruciform ที่มีหลาย ๆ ชั้น เพื่อให้ แกนเหล็กมีค่าใกล้เคียงกับทรงกลมมากที่สุด ซึ่งค่าต่าง ๆ ในการกำหนดแต่ละชั้นของแกนเหล็กมีดังรูปข้างล่างคือ



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กชนิด Cruciform section

ในการคำนวณทุกครั้ง จะใช้ค่า Stacking factor 0.86 - 0.9

ในการออกแบบหม้อแปลงตัวเล็ก ๆ ชนิดขดลวดล้อมแกน แบบ Cruciform section อัตราส่วนที่เหมาะสมในการออกแบบคือ

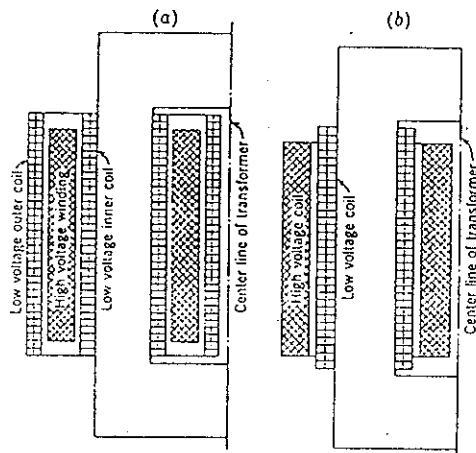
$$S = 1.5 L$$

$$H = 2.5 D$$

$$m = 1 - 1.5 \text{ เท่า ของ } L$$

3.9 Arrangement of coil - leakage reactance

สำหรับหม้อแปลงชนิดขดลวดล้อมแกน จะมีการจัดวางขดลวด เป็นไปตามรูปคือ ประกอบด้วย ขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิ วางรอบแกนเหล็กทั้ง 2 ด้าน โดยการวางจะให้ด้าน ความต่างศักย์สูง (High volts) อยู่รอบนอกของแกนเหล็ก เป็นไปตามรูป



Alternative arrangement of windings in core-type transformer.

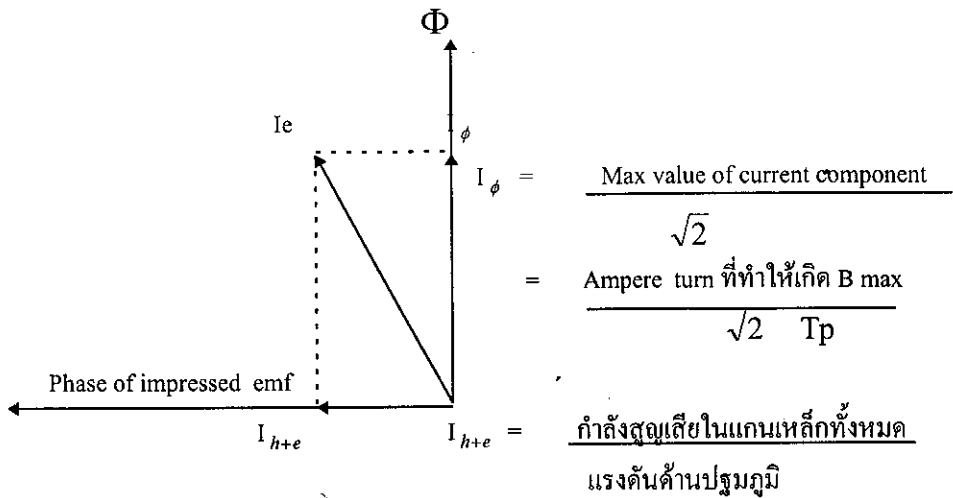
รูปที่ 3.8 แสดงการจัดวางขดลวดในหม้อแปลงชนิดขดลวดล้อมแกน

3.10 การคำนวณค่า กระแสกระตุ้น (Exciting current)

ถ้าเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทมอเตอร์ ค่า Reluctance ของเหล็กจะไม่นำมาคิดด้วย เพราะถือว่ามีความน้อยมาก แต่ในหม้อแปลงไฟฟ้า ค่า Reluctance มีความสำคัญมากในการคิดค่าอื่น ๆ ในการคำนวณค่ากระแสกระตุ้น (Exciting current) ขึ้นอยู่กับตัวประกอบสำคัญ 2 ชนิดคือ

1. I_ϕ (Magnetizing)
2. I_{h+e} (Energy) โดยค่านี้จะนำหน้า I_ϕ อยู่ 90 องศา

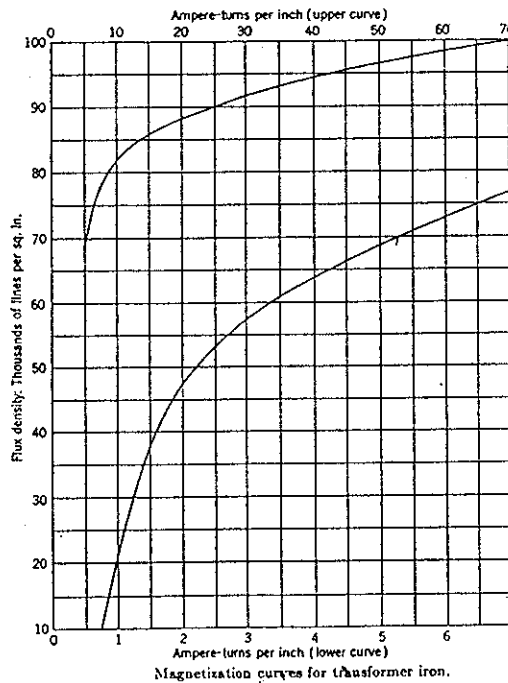
ซึ่งค่า I_w ขึ้นอยู่กับค่าพลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก เพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถแสดงการหาได้โดยใช้เวกเตอร์ดังนี้



รูปที่ 3.9 แสดงเวกเตอร์แสดงค่ากระแสกระตุ้น

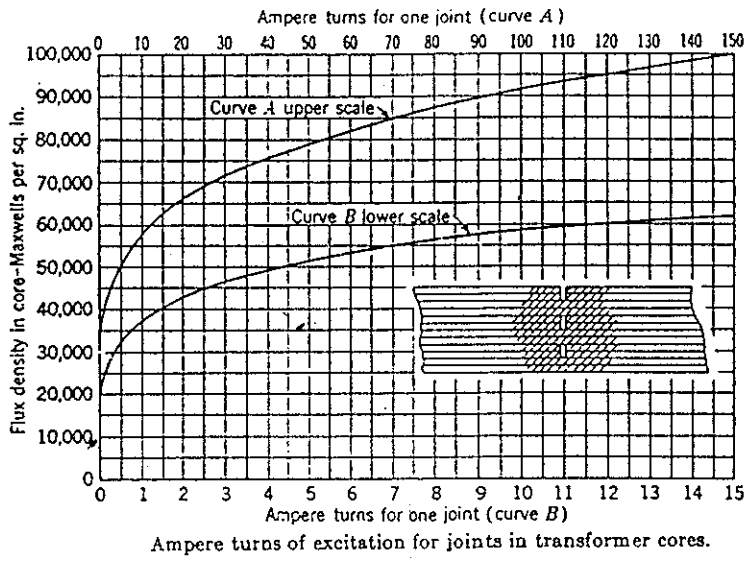
3.11 Magnetic leakage in transformer -voltage regulation

เมื่อพิจารณาว่าความต่างศักย์ที่ขั้วของ หม้อแปลงมีค่าคงที่แล้ว เมื่อมีกระแสไหลในแกนเหล็กทำให้เกิด ฟลักซ์ ซึ่งทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ขึ้นที่ขั้วของหม้อแปลง (Back emf) ซึ่งสามารถหาได้โดยใช้การหาทางเวกเตอร์คือ ผลต่างระหว่าง Applied voltage และ Induced voltage มีค่าเท่ากับค่า ความต่างศักย์ที่หายไปในความต้านทานของหม้อแปลง (IR drop) ซึ่งค่าเหล่านี้จะสัมพันธ์กับค่า Ampere - turn ของหม้อแปลงโดยความสัมพันธ์ดังกราฟที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะของสนามแม่เหล็ก

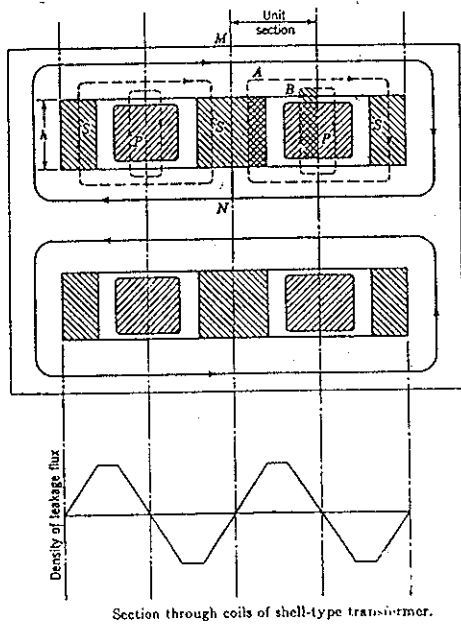
ในส่วนของแกนเหล็ก ค่า Ampere turn จะมีค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของฟลักซ์ ซึ่งรอยต่อของแกนเหล็กในการวางเหล็กนั้นมีความสำคัญมากในการคำนวณค่า การควบคุมแรงดัน Voltage regulation เพราะค่าเหล่านี้เป็นคุณสมบัติของหม้อแปลงที่ต้องการในการออกแบบ



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะของสนามแม่เหล็กบริเวณรอยต่อ

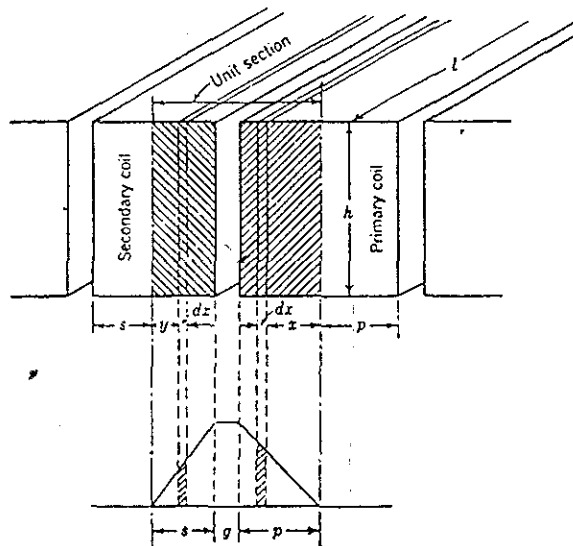
3.12 การคำนวณค่าแรงดันตก (IR drop)

เพราะว่าการพันขดลวดที่สมมาตรกันนั้นทำให้แบ่งจำนวนขดลวด ความต่างศักย์ หรือคำนวณขึ้นที่รวมกับจำนวนแล้ว ถูกแบ่งเป็นในลักษณะดังรูป 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงพื้นที่หน้าตัดของหม้อแปลงชนิดขดลวดล้อมแกน

จะเห็นว่ารูปที่ 3.12 แสดงหม้อแปลงชนิด แกนล้อมขดลวด ที่ประกอบด้วยขดลวดแรงสูง 2 ชุด และขดลวดแรงต่ำ 2 ชุด โดยเส้นประในรูปข้างบน แสดงค่าการกระจายของฟลักซ์รั่ว ที่ผ่านขดลวดและช่องว่างระหว่างขดลวด ผลของฟลักซ์รั่วทำให้เกิด Back emf ในขดลวด และ เส้น B ตั้มีพื้นที่กับรอบของปฐมภูมิ



Representing one high-low section of transformer winding.

รูปที่ 3.13 แสดงพื้นที่หน้าตัด และรายละเอียดการจัดวางขดลวด

จากรูปที่ 3.13 เป็นภาพหน้าตัดของรูปที่ 3.12 สมมติว่าความยาวด้านต่าง ๆ สามารถวัดได้ 1 ซม. ฟลักซ์รั่วมีทิศตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก และมีทิศทางการพันขดลวด สามารถคำนวณหาค่า IX drop ได้โดยพิจารณาพื้นที่ ซึ่งยาว 1 ซม. กว้าง h ซม. หนา (s+g+p) ซม.

เมื่อ p และ s = ความหนาของส่วนของปฐมภูมิและทุติยภูมิโดยเป็นเพียง ส่วนหนึ่งของทั้งหมด ที่สมมาตรกัน

g = พื้นที่ว่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

h = ความสูงของขดลวดที่รวมการฉนวนแล้ว

$$\text{จากสมการ} \quad E = \frac{4.44 f T \Phi}{10^8}$$

$$IX = 4.44 f T \Phi \times 10^{-8} \quad (3.6)$$

$$\text{แต่ค่า} \quad \Phi = \text{mmf} \times \text{permeance}$$

$$= 0.4 \pi T I_{\text{max}} \times P$$

$$= 0.4 \pi T (\sqrt{2} I) P \quad (3.7)$$

แทนค่า (3.7) ใน (3.6) ได้

$$IX = \left(\frac{4.44 \times 0.4 \pi \times \sqrt{2f}}{10^8} \right) (TI) T P$$

$$= \frac{7.88 f}{10^8} (TI) P \times T$$

ให้

$$m = \frac{7.88 f}{10^8}$$

$$IX = m(TI) P \times T \quad (3.8)$$

T_1 = จำนวนขดลวดทางคานปฐมภูมิ

T_2 = จำนวนขดลวดทางคานทุติยภูมิ

พิจารณาพื้นที่หน้าตัด g จะได้

$$(IX)_g = m (T_1 I_1) \frac{lg}{h} \times T_1 \quad (3.9)$$

พิจารณาพื้นที่หน้าตัด p ค่า mmf เกิดขึ้นจากส่วนประกอบของฟลักซ์ ในที่ว่างของความกว้าง dx กระแส I_1 ใน

$\frac{xT_1}{p}$ รอบ ดังนั้นฟลักซ์ที่สัมพันธ์กับค่า $\frac{xT_1}{p}$ รอบจะได้สมการคือ

$$d(IX)_p = m \left[\left(\frac{x}{p} \right) T_1 I_1 \right] \frac{ldx}{h} \times \frac{x}{p} T_1$$

$$(IX)_p = m \left[\frac{T_1^2 I_1 l}{p^2 h} \right] \int_0^p x^2 dx$$

$$= m \left(T_1^2 I_1 \right) \times \frac{lp}{3h} \quad (3.10)$$

ในพื้นที่หน้าตัด s ค่า mmf เกิดขึ้นจากส่วนของ ฟลักซ์ ในช่วงกว้าง dy สัมพันธ์กับ T_s ใน (y/s) T_s รอบ ดังนั้นจะ

$$d(IX)_s = m \left[\left(\frac{y}{s} \right) T_2 I \right] \frac{ldy}{h} \times \left(\frac{y}{s} \right) T_1$$

$$(IX)_s = m \left[\left(T_2 I_s \frac{T_1 l}{s^2 h} \right) \right] \int_0^s y^2 dy$$

$$= m (T_1^2 I_1) \times \frac{ls}{3h} \quad (3.11)$$

เพราะว่าค่า $T_{I_1} = T_{I_2}$

จากสมการ(3.9),(3.10),(3.11) ได้

$$I_1 X_1 = \frac{m T_{I_1}^2 I_1}{h} \left(g + \frac{p+s}{3} \right) \quad (3.12)$$

ทำให้อยู่ในหน่วย เซนติเมตร

เมื่อ n = จำนวนของ พื้นที่หน้าตัด (high-low section)

ค่า IX drop มีค่าเท่ากับ $n I_1 x_1$ และค่าเปอร์เซ็นต์ IX drop มีค่าเท่ากับ $(n I_1 x_1 / E_p) \times 100$

$$\text{ดังนั้น } \% IX = nx \left(\frac{7.88f}{10^8} \right) \left(\frac{T_{I_1}^2 I_1}{h} \right) \left(g + \frac{p+s}{3} \right) \left(\frac{2.54 \times 100}{E_p} \right) \quad (3.13)$$

ทำให้อยู่ในหน่วย นิ้วได้ดังนี้

$$n T_{I_1} = T_s I_s \quad (3.14)$$

$$\frac{n T_{I_1}}{T_s} = \frac{E_p}{E_s}$$

$$\frac{T_{I_1}}{E_p} = \frac{T_s}{n E_s} \quad (3.15)$$

แทนสมการ (3.14) (3.15) ลงในสมการ (3.13)

$$\begin{aligned} \% IX &= \left(\frac{7.88f}{10^8} \right) \frac{T_s I_s}{h} \left(\frac{T_s}{n E_s} \right) \left(g + \frac{p+s}{3} \right) (2.54 \times 100) \\ &= \frac{2f T_s^2 I_s}{n h E_s \times 10^5} \left(g + \frac{p+s}{3} \right) \end{aligned}$$

จากสมการจะเห็นว่าค่า IX drop เป็นสัดส่วนผกผัน กับค่า n (high-low section)

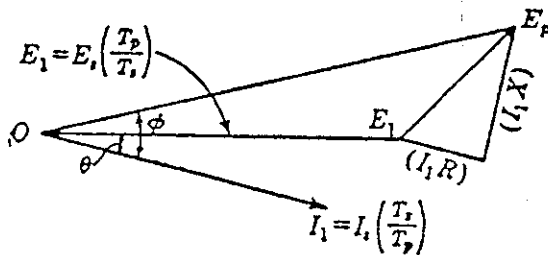
3.14 การคุมค่าแรงดัน (Voltage regulations : VR)

ในการคำนวณค่า การคุมค่าแรงดัน (Voltage regulation) นั้นจะทำการคำนวณเมื่อคิดการเทียบวงจรสมมูลมาทางด้านปฐมภูมิ โดยค่า R คือ ค่าผลรวมของความต้านทานรวมทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเมื่อเทียบมาทางด้านปฐมภูมิดังนั้น

$$I_p R = I_p R_p + I_s R_s \left(\frac{T_p}{T_s} \right)$$

$$I_s = I_p \left(\frac{T_p}{T_s} \right)$$

$$R = R_p + R_s \left(\frac{T_p}{T_s} \right)^2$$



$$E_p = \frac{I_1 R + E_1 \cos \theta}{\cos \Phi}$$

θ = ค่าตัวประกอบกำลัง ของ external load

Φ = ค่าตัวประกอบกำลังของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

รูปที่ 3.15 แสดงเวกเตอร์แสดงการคุมค่าแรงดัน

$$\begin{aligned} \tan \Phi &= \frac{I_1 X + E_1 \sin \theta}{I_1 R + E_1 \cos \theta} \\ \% \text{ Regulation} &= \frac{100 \times (E_p - E_1)}{E_1} \\ &= \frac{\% \text{equivalent IR drop} + 100 (\cos \theta - \cos \phi)}{\cos \phi} \end{aligned}$$

$$= \frac{\text{percent IR} \cos \theta + \text{percent IX} \sin \theta + (\text{percent IX} \cos \theta - \text{percent IR} \sin \theta)^2}{200}$$

สำหรับ ตัวประกอบกำลังที่มีค่าเท่ากับ 1 (Unity factor) จะได้ค่าควบคุมแรงดันดังนี้คือ

$$\text{VR} = \frac{\text{percent IR} + (\text{percent IX})^2}{200}$$

$$\text{VR (approx)} = \text{percent IR} \cos \theta + \text{percent IX} \sin \theta$$

ถ้าหม้อแปลงต่อกับโหลดที่เป็นชนิด ตัวประกอบกำลังนำหน้า (leading power factor) ในสมการต้องเปลี่ยนจากเครื่องหมายบวกเป็นเครื่องหมาย ลบ

3.15 ประสิทธิภาพ (Efficiency)

ค่าเอาต์พุต ของหม้อแปลง เฟสเดียว ในหน่วย Watts คือ $W = E_s I_s \cos \theta$

ถ้า w = ผลรวมของการสูญเสียในขดลวด และในแกนเหล็ก แล้ว เราสามารถเขียนสมการแทนความสัมพันธ์ของ ประสิทธิภาพได้ดังนี้

$$\eta = 1 - \frac{w}{W+w}$$

และผลรวมของการสูญเสียพลังงานคือ

$$w = \frac{1 - \eta}{\eta} \times W$$

เมื่อค่าตัวประกอบกำลังเปลี่ยนไปค่าประสิทธิภาพหาได้โดยสมการ

$$\eta = \frac{\cos \theta}{\cos \theta + \left(\frac{1 - \eta}{\eta} \right)}$$

เมื่อ

W = Full load output ; watts

a = ประสิทธิภาพที่พิกัด

x = กำลังสูญเสียในขดลวดที่พิกัด ; watts

y = กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ; watts

w = กำลังสูญเสียทั้งหมดที่พิกัด

$$\begin{aligned} w &= (x+y) \\ &= \left(\frac{1 - a}{a} \right) W \end{aligned}$$

b = ประสิทธิภาพเมื่อทำการวัดเอาต์พุต n ครั้งที่ พิกัด

nW = เอาต์พุต ; watts

$n^2 x$ = กำลังสูญเสียในขดลวด ; watts

W_n = การสูญเสียทั้งหมดเมื่อโหลดคือ nW

เมื่อ

$$\begin{aligned} W_n &= (n^2 x + y) \\ &= \left(\frac{1 - b}{b} \right) nW \end{aligned}$$

เมื่อทำการแทนค่าเข้าไปในสมการแล้วจะได้

$$w - \frac{w_n}{n} = x - n^2 x$$

เมื่อ

$$\text{กำลังสูญเสียในขดลวดที่พิกัด} = x = \frac{w - \frac{w_n}{n}}{1 - n^2}$$

ค่าประสิทธิภาพตลอดวัน (All - day efficiency) สามารถหาได้จาก

$$\frac{\text{Secondary out - put in watts-hours}}{\text{Secondary watts- hours + watt hours iron loss + watt-hours iron loss}}$$

ซึ่งในการคำนวณการสูญเสียเหล่านี้สามารถหาได้โดยการทดลอง โดยใช้ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ปกติในการทดลอง ในชนิดที่เป็นหม้อแปลงในระบบส่งจ่าย นั้น จะทดลองโดยใช้ 4 ชั่วโมง ที่พิกัด และ 20 ชั่วโมง ที่ไม่มีโหลด (no load)

3.16 สรุป

ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จำเป็นมากในการออกแบบเพื่อการสร้าง หม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณประกอบด้วย

1. ค่าความต้งศักย์/รอบ (Volts /Turn)
2. จำนวนรอบของขดลวดทั้งทางด้นปฐมภูมิ และทุติยภูมิ
3. กระแสที่พิกัด
4. ความหนาแน่นกระแส
5. พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กและขดลวด
6. ขนาดของเส้นลวดที่ใช้ในการพันหม้อแปลงไฟฟ้า
7. การฉนวน
8. กำลังสูญเสียในแกนเหล็กและขดลวด

9. ขนาดของหน้าต่างของหม้อแปลงไฟฟ้า
10. ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก
11. น้ำหนักของแกนเหล็ก
12. ค่าประสิทธิภาพที่ตัวประกอบกำลังต่าง ๆ
13. ค่าการคุมค่าแรงดัน

ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ใช้ในการสร้างและสั่งซื้ออุปกรณ์ในการสร้างหม้อแปลงต่อไป

บทที่ 4

ข้อมูลการออกแบบสำหรับหม้อแปลง

4.1 กล่าวนำ

ในการออกแบบหม้อแปลงเฟสเดียวชนิดขดลวดล้อมแกนเหล็กนั้นการออกแบบจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการออกแบบ ซึ่งการออกแบบเป็นการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างหม้อแปลงซึ่งข้อมูลที่ได้จากการคำนวณนั้นอาจจะไม่ตรงกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลง ในห้องปฏิบัติการ เพราะเหตุผลทางด้านการสร้าง และวัสดุที่ใช้อาจจะไม่ตรงกับข้อมูลในการคำนวณ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ

Single - phase distribution core type with cruciform section

Guaranteed losses, watts - Copper (full load).....31.26.....

- Iron.....14.77.....

ลำดับที่	รายละเอียดในการออกแบบ
1	Volt per turn : 0.545

ขดลวด		แรงสูง	แรงต่ำ
2	จำนวนรอบ	5505	404
3	จำนวนขดลวด	2	2
4	จำนวนรอบต่อขดลวด	2752	202
5	กระแสที่ลัดฟักัด ,Amp	0.333	4.545
6	ความหนาแน่นของกระแส , Amp/sq.in	700	700
7	พื้นที่หน้าตัดของแต่ละขดลวด , sq.in	0.000501	0.00664
8	ขนาดของขดลวด	AWG22	AWG13
9	จำนวนรอบ/ชั้น/ขดลวด	290	80
10	จำนวนชั้น/ขดลวด	10	2.5
11	Taps	ไม่มี	ไม่มี
12	ความต่างศักย์/ขดลวด	1500	110
13	ความต่างศักย์ระหว่างชั้น	150	44
14	ความหนาของเส้นลวดรวมกับกระดาษฉนวน, in	0.34	0.49
15	ความหนาของกระดาษฉนวนระหว่างขดลวด , in	0.04	
16	ฉนวนในขดลวด	กระดาษฉนวน	กระดาษฉนวน
17	ความยาวแต่ละรอบ, in	10.93	8.31
18	ความยาวรวมเมื่อรวมกันทั้งขดลวด ,ft	5014.2	279.77

19	น้ำหนักรวมของขดลวด ,lb	9.65	7.13
20	ความต้านทานในขดลวด ,ohm	81.0	0.352
21	แรงดันตก (IR drop) ,volts	26.97	1.6
22	การสูญเสียกำลังในขดลวด (Full load Copper loss)	8.98	7.27

วงจรสนามแม่เหล็ก

23	ขนาดของหน้าต่าง , in	7.245×2.898	
24	Flux รวม , maxwells	2.454×10 ⁵	
25	ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก , line per sq.in	75000	
26	พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก , gross	3.44 ตารางนิ้ว	
27	น้ำหนักรวมของแกนเหล็ก ,lb	24.13	
28	กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก , watts	18.88	
29	กำลังสูญเสียที่ค่าพิกัด , watts	42.78	

Efficiency and Exciting Current

30	ประสิทธิภาพที่ ค่า PF=1		
	ที่ 1 ¼ ค่าพิกัด	96.6	
	ที่ ค่าพิกัด	95.6	
	ที่ ¾ ค่าพิกัด	96.4	
	ที่ ½ ค่าพิกัด	95.6	
	ที่ ¼ ค่าพิกัด	92.6	
31	ประสิทธิภาพตลอดวัน	88.5	
32	Exciting Current ทางด้านปฐมภูมิ , Amp	0.457	

Regulation

33	ค่า IR Drop ,%	1.70	
34	ค่า Reactive Drop ,%	0.956	
35	ค่า Regulations at unity power factor ,%	1.70	
36	ค่า Regulations at 0.8 power factor ,%	1.934	

ขั้นตอนในการออกแบบ

ในการออกแบบหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า 220/3000 โวลต์ นั้น สามารถออกแบบได้โดยวิธีการดังต่อไปนี้

4.2 Specification

เอาต์พุต (kVA)	= 1 kVA
แรงดันทางด้านปฐมภูมิ	= 220 โวลต์
แรงดันทางด้านทุติยภูมิ	= 3000 โวลต์
ความถี่	= 50 เฮิรท์
ประสิทธิภาพเมื่อตัวประกอบกำลัง = 1	- Full load 0.956
	- 1/4 Full load 0.926
ประสิทธิภาพในการทนความร้อนของฉนวน	55 องศาเซลเซียส

หม้อแปลงที่ต้องการออกแบบเป็นชนิด ขดลวดล้อมแกน (Core type) ซึ่งหน้าตัดของแกนเหล็กจะเป็นแบบ Two-step cruciform section และแกนเหล็กของหม้อแปลงทำมาจาก Silicon steel ซึ่งเป็นเหล็กอบน้ำยา ใช้การระบายความร้อนโดยวิธี Self - cooling ไม่มี Tap เพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนแรงดัน โดยความหนาของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นคือ 0.014 นิ้ว

4.3 การคำนวณ

Guaranteed losses

$$\text{ค่ากำลังสูญเสีย ทั้งหมดที่ พิกัด (Full load)} = \left(\frac{1 - 0.956}{0.956} \right) \times 1000 = 46.03 \text{ Watts}$$

$$\text{ค่ากำลังสูญเสียทั้งหมดที่ } 1/4 \text{ ค่าพิกัด (1/4 Full load)} = \left(\frac{1 - 0.926}{0.926} \right) \times \frac{1000}{4} = 19.98 \text{ watts}$$

$$\text{ค่ากำลังสูญเสียในขดลวดที่พิกัด (Full load copper loss)} = \left(\frac{46.03 - 19.98}{1 - 1/6} \right) = 31.26 \text{ watts}$$

$$\text{ค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก} = 46.03 - 31.26 = 14.77 \text{ watts}$$

กำหนดให้ใช้ค่าคงที่ $c = 58$

จากสมการ

$$\begin{aligned} V_t &= \frac{\sqrt{VA}}{c} \\ &= \frac{\sqrt{1000}}{58} \\ &= 0.545 \text{ โวลต์/ รอบ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จำนวนรอบทางด้านปฐมภูมิ} &= 220 / 0.545 \\ &= 403.7 \text{ ประมาณ 404 รอบ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ค่าอัตราส่วนจำนวนรอบ (turn ratio)} &= 220/3000 \\ &= 0.0733\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{จำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิ} &= 3000/0.545 \\ &= 5504.8 \quad \text{ประมาณ 5505 รอบ}\end{aligned}$$

$$\begin{array}{ll}\text{กระแสที่ฟลักซ์} & \text{จากสมการ} \quad I = \frac{\text{kVA}}{\text{kV}}\end{array}$$

$$\begin{aligned}\text{ด้านปฐมภูมิ} &= 1000/220 \\ &= 4.545 \text{ A}\end{aligned}$$

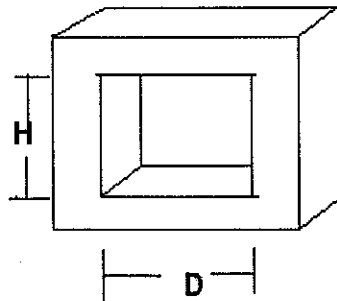
$$\begin{aligned}\text{ด้านทุติยภูมิ} &= 1000/3000 \\ &= 0.333 \text{ A}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ค่าตัวประกอบพื้นที่ (Space factor)} &= \frac{10}{30 + \text{kV}} \\ &= \frac{10}{30 + 3} \\ &= 0.303\end{aligned}$$

- อาจใช้ค่า 0.25 เพราะว่า ในการพันขดลวดที่เป็นเส้นทรงกลมนั้นจะมีช่องว่างระหว่างเส้นลวด และฉนวนอยู่ด้วย

$$\text{ความหนาแน่นกระแส} = 700 \text{ A/in}^2$$

ในการวางขดลวดในแกนเหล็กต้องออกแบบหน้าต่าง เพื่อที่จะให้การวางขดลวดไม่ซ้อนและไม่ห่างกันจนเกินไป



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของหน้าต่าง

จากสมการ

$$H \times D = \frac{2(TI)}{\Delta \times sf}$$

T = จำนวนรอบด้านปฐมภูมิ

I = กระแสที่พิกัดทางด้านปฐมภูมิ

 Δ = ความหนาแน่นกระแส

sf = ตัวประกอบพื้นที่ (Space factor)

$$H \times D = \frac{2(404 \times 4.545)}{0.25 \times 700}$$

$$= 20.98 \text{ ตารางนิ้ว}$$

ประมาณ 21 ตารางนิ้ว

ในการออกแบบหม้อแปลงที่เป็นแบบ เฟสเดียวชนิด ขดลวดล้อมแกนนั้น อัตราส่วนระหว่าง H/D นั้น เท่ากับ 2.5-3.5 ในที่นี้เลือก 2.5

$$H/D = 2.5$$

$$2.5 D = H \quad \text{แต่ } H \times D = 21 \text{ ตารางนิ้ว}$$

$$2.5 D^2 = 21 \quad ; \quad D^2 = 21/2.5$$

$$D = 2.898 \text{ นิ้ว} \quad (\text{ประมาณ } 7.36 \text{ ซม.})$$

$$H = 7.245 \text{ นิ้ว} \quad (\text{ประมาณ } 18.4 \text{ ซม.})$$

Maximum flux ในแกนเหล็ก

$$= \frac{220 \times 10^8}{4.44 \times 50 \times 404}$$

$$= 2.454 \times 10^5$$

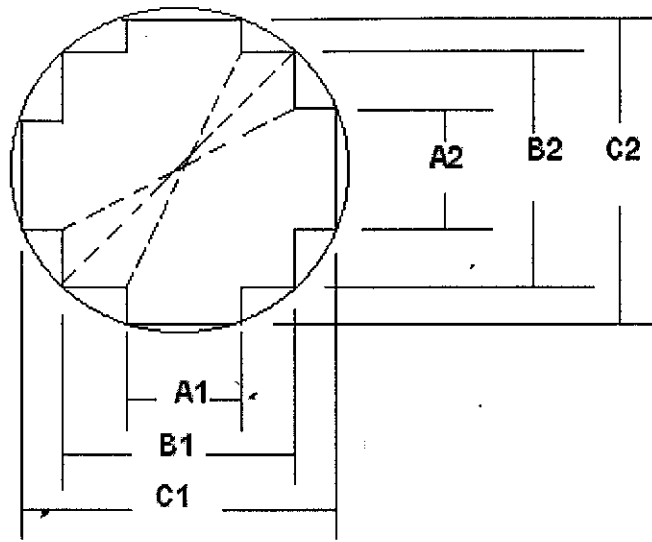
กำหนดให้ ความหนาแน่นของฟลักซ์ (Core density : B'') เท่ากับ 75000 line

$$\text{stracking factor} = 0.95$$

$$\text{Agross} = \frac{2.45 \times 10^5}{75000 \times 0.95}$$

$$= 3.44 \text{ ตารางนิ้ว}$$

4.4 พื้นที่หน้าตัด (Cross section)



รูปที่ 4.2 แสดงพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กแบบ Cruciform 2 ชั้น

D = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของแกนเหล็ก (Cross section)

$$A1 = D \cos 63.4 = 0.434 D$$

$$A2 = D \sin 25.7 = 0.434 D$$

$$B1 = D \cos 45.7 = 0.698 D$$

$$B2 = D \sin 45.7 = 0.716 D$$

$$C1 = D \cos 25.7 = 0.901 D$$

$$C2 = D \sin 63.4 = 0.901 D$$

เพราะฉะนั้นสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้โดยอาศัยสมการคือ

$$\text{พื้นที่} = A2C1 + (B1B2 - A2B1) + (A1C2 - B2A1)$$

$$= (0.434D \times 0.901D) + [(0.698D \times 0.716D) - (0.434D \times 0.698D)] + [(0.434D \times 0.901D) - (0.716D \times 0.434D)]$$

$$= 0.319D^2 + 0.5D^2 - 0.303D^2 + 0.391D^2 - 0.310D^2$$

$$= 0.699D^2$$

$$3.44 = 0.699D^2$$

$$D = 2.268 \text{ นิ้ว}$$

เพราะฉะนั้นค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ คือ

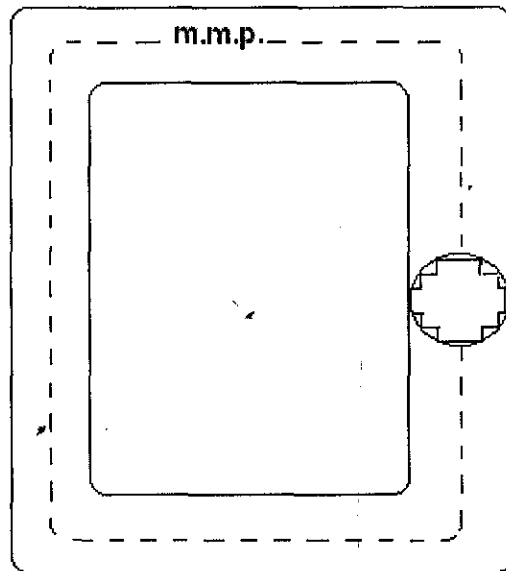
$$A1 = 0.9843 \text{ นิ้ว} \quad A2 = 0.9843 \text{ นิ้ว}$$

$$B1 = 1.583 \text{ นิ้ว} \quad B2 = 1.624 \text{ นิ้ว}$$

$$C1 = 2.043 \text{ นิ้ว} \quad C2 = 2.043 \text{ นิ้ว}$$

4.5 ความยาวเฉลี่ยของเส้นทางฟลักซ์ (Mmp :Mean magnetic flux path)

คือทางเดินของสนามแม่เหล็ก คำนวณได้จาก



รูปที่ 4.3 แสดงทางเดินของสนามแม่เหล็ก

$$\begin{aligned} mmp &= 2(H + (D - 2R)) + \pi(L + 2R) \\ &= 2(7.245 + (2.898 - 1)) + \pi(2.043 + 1) \\ &= 27.84 \text{ นิ้ว (โดยประมาณ)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักรวมของแกนเหล็ก} &= 0.28(0.9 \times 3.44 \times 27.84) \\ &= 24.13 \text{ lb} \end{aligned}$$

จากค่าในภาคผนวก ค ค่า watts / lb ที่ 75000 line / in² ได้ค่าเท่ากับ 0.76 watts/lb

$$\begin{aligned} \text{กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss)} &= 24.13 \times 0.76 \\ &= 18.88 \text{ watts} \end{aligned}$$

แต่ guaranteed loss เท่ากับ 14.77 watts อาจจะแตกต่างกันเพราะคุณภาพของเหล็กแตกต่างกันจากในกราฟและเหล็กในปัจจุบัน

4.6 ค่ากำลังสูญเสียในขดลวด (ค่าโดยการคำนวณจากคุณสมบัติของขดลวด : Approximate copper losses)

ในการคำนวณค่ากำลังสูญเสียในขดลวดโดยการประมาณคร่าว ๆ นั้น โดยการกำหนดให้ความหนาแน่นของกระแส (Current density) มีค่าเท่า ๆ กันทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ค่าเฉลี่ยของความยาวของรอบการพันขดลวด (The average mean lenght of turn :mlt.) ของ circular coils สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned}
 m.l.t &= \frac{\pi}{2} (C + D + L) \\
 &= \frac{\pi}{2} (2.268 + 2.898 + 2.043) \\
 &= 11.32 \text{ นิ้ว (โดยประมาณ)}
 \end{aligned}$$

พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดทั้งสองด้านคือ

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2 \times (5505 \times 0.333)}{700} \\
 &= 5.238 \text{ ตารางนิ้ว (โดยประมาณ)}
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นน้ำหนักของเส้นลวดคือ

$$\begin{aligned}
 &= 0.32 \times 11.32 \times 5.24 \\
 &= 18.98 \text{ lb}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นค่ากำลังสูญเสียต่อปอนด์ของขดลวด คือ

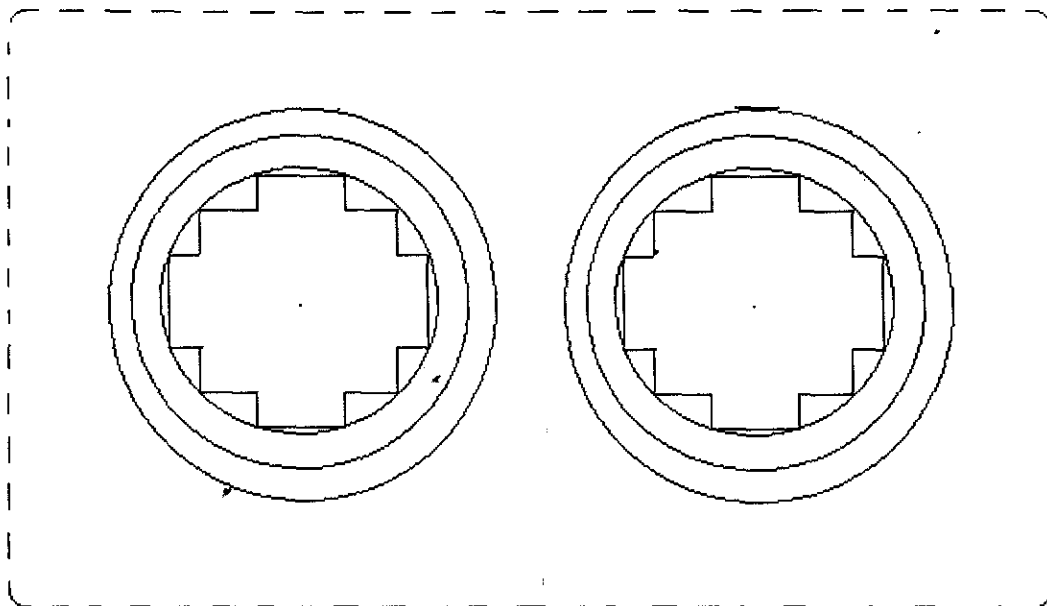
$$\begin{aligned}
 &= \frac{0.825 \Delta^2}{0.32 \times 10^6} \\
 &= \frac{2.57 \Delta^2}{10^6}
 \end{aligned}$$

เมื่อ Δ = ความหนาแน่นกระแส (Current density)

เพราะฉะนั้นค่ากำลังสูญเสียในขดลวด ทั้งหมด (Total copper loss) คือ

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2.57 \times 700^2 \times 18.98}{10^6} \\
 &= 23.9 \text{ watts}
 \end{aligned}$$

4.7 ขนาดของเส้นลวด และการจัดวางขดลวด (Size of wire and winding particulars)



รูปที่ 4.4 แสดงขนาดของขดลวดและการจัดวาง

รูปแสดงถึงลักษณะทั่วไปของขดลวด และการวางขดลวด รอบ ๆ แกนเหล็ก ซึ่งแกนเหล็กเป็นแบบ Two-step cruciform section โดยจะวางขดลวดปฐมภูมิข้างในและขดลวดทุติยภูมิด้านนอก ระหว่างแกนเหล็กกับขดลวดปฐมภูมิ จะมีกระดาษฉนวนกันอยู่ ในระหว่างชั้นของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ก็จะมีกระดาษฉนวนกันอยู่ด้วย เพื่อป้องกันการ Short turn ซึ่งจะทำให้อัตราส่วนจำนวนรอบ เปลี่ยนไปทำให้ได้หม้อแปลงไม่เป็นไปตามที่ต้องการ (Specification)

เลือก ความหนาแน่นของกระแส ≈ 700 แอมป์/ตารางนิ้ว

พื้นที่หน้าตัด $= 4.545 / 700$

$= 0.0065$ ตารางนิ้ว

จากภาคผนวก ก ในการเลือกขนาดขดลวดนั้นพื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้านปฐมภูมิคือ 0.0065 ตารางนิ้ว ซึ่งตรงกับขนาดลวด เบอร์ AWG 13 ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกันมากที่สุดคือ 0.00664 ตารางนิ้ว

ความสูงของหน้าต่าง ≈ 7.245 นิ้ว

เพราะฉะนั้น 0.00664 ตารางนิ้ว $= \pi r^2$

$r \approx 0.046$ นิ้ว

แสดงว่า ใน 1 รอบ จะมีทั้งหมด $7.245 / (0.046 \times 2)$

$= 80$ คิววินาที

แต่จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ เท่ากับ 404 รอบ เพราะฉะนั้น จำนวนชั้นในการพันขดลวดปฐมภูมิ

$$= 404 / 80$$

$$= 5 \text{ ชั้น}$$

แต่ขดลวดปฐมภูมิจะแบ่งออกเป็น 2 ด้าน ทำให้แต่ละด้านนั้นมี จำนวนชั้น เท่ากับ 2.5 ชั้น

ขดลวดแต่ละด้าน หนา 0.23 นิ้ว เมื่อรวมกับกระดาษฉนวนแล้วขดลวดปฐมภูมิในการพันแล้วก็หนาประมาณ 0.3 นิ้ว ต่อด้าน

ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding)

ความหนาแน่นกระแส (Current density) $= 700$ แอมป์/ตารางนิ้ว

พื้นที่หน้าตัด $= 0.333 / 700$

$$= 0.00047 \text{ ตารางนิ้ว}$$

จากภาคผนวก ก ตารางการเลือกขนาดของเส้นลวดนั้น เลือก เบอร์เส้นลวด คือ AWG 22

ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด คือ 0.000501 ตารางนิ้ว ซึ่งใกล้เคียงกับขนาดที่ออกแบบไว้มากที่สุด

ความสูงของหน้าต่าง $= 7.245$ นิ้ว

$$0.000501 \text{ ตารางนิ้ว} = \pi r^2$$

$$r = 0.0126 \text{ นิ้ว ; เส้นผ่าศูนย์กลาง} = 0.025 \text{ นิ้ว}$$

แสดงว่า ใน 1 รอบ จะมีทั้งหมด $7.245 / 0.025$

$$= 290 \text{ ตัวนำ}$$

แต่จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ เท่ากับ 5505 รอบ เพราะฉะนั้น จำนวนชั้นในการพันขดลวดปฐมภูมิ

$$= 5505 / 290$$

$$= 19 \text{ ชั้น}$$

แต่ขดลวดทุติยภูมิจะแบ่งออกเป็น 2 ด้าน ทำให้แต่ละด้านนั้นมี จำนวนชั้น เท่ากับ 10 ชั้น

ขดลวดแต่ละด้าน หนา 0.25 นิ้ว เมื่อรวมกับกระดาษฉนวนแล้วขดลวดปฐมภูมิในการพันแล้วก็หนาประมาณ 0.45 นิ้ว ต่อด้าน

ระหว่าง ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ จะมีกระดาษฉนวน หนา ประมาณ 0.04 นิ้ว

รวมความหนาทั้งหมดเมื่อคิดทางด้านเดียวได้ดังนี้

กระดาษฉนวนชั้นที่ 1 $= 0.04$ นิ้ว

ขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding) $= 0.3$ นิ้ว

กระดาษฉนวนชั้นที่ 2 $= 0.04$ นิ้ว

ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding) $= 0.45$ นิ้ว

กระดาษฉนวนชั้นที่ 3 $= 0.04$ นิ้ว

เพราะฉะนั้นรวมความหนาทั้งหมดเมื่อคิดเพียงด้านเดียว เท่ากับ 0.87 นิ้ว

แต่มี 2 ด้าน เพราะฉะนั้นคิดพื้นที่ทั้งหมดที่ใช้ไปในหน้าต่างที่ออกแบบไว้คือ 2×0.87 เท่ากับ 1.74 นิ้ว แต่ขนาดของ D มีค่าเท่ากับ 2.898 นิ้ว เพราะฉะนั้น จะมีช่องว่างอากาศเหลืออยู่คือ $2.898 - 1.74 = 1.158$ นิ้ว

4.8 แรงดันตก และกำลังสูญเสียในขดลวด(Voltage drop and copper losses)

$$\begin{aligned}\text{ทางด้านปฐมภูมิ m.l.t.} &= \pi \times (2.268 + (2 \times 0.04) + 0.3) \\ &= 8.31 \text{ นิ้ว}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ทางด้านทุติยภูมิ m.l.t.} &= \pi \times (2.268 + (2 \times 0.04) + (2 \times 0.3) + (2 \times 0.04) + 0.45) \\ &= 10.93 \text{ นิ้ว}\end{aligned}$$

ความยาวของแต่ละขดลวด

$$\begin{aligned}\text{ขดลวดปฐมภูมิ} &= (8.31/12) \times 404 \\ &= 279.77 \text{ ฟุต (83.5 เมตร)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ขดลวดทุติยภูมิ} &= (10.93/12) \times 5505 \\ &= 5014.2 \text{ ฟุต (1530 เมตร)}\end{aligned}$$

น้ำหนักของแต่ละขดลวด

$$\begin{aligned}\text{ปฐมภูมิ} &= 0.32 \times 0.00664 \times 279.77 \times 12 \\ &= 7.13 \text{ ปอนด์ (3.24 กิโลกรัม)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ทุติยภูมิ} &= 0.32 \times 0.000501 \times 5014.2 \times 12 \\ &= 9.65 \text{ ปอนด์ (4.39 กิโลกรัม)}\end{aligned}$$

ความต้านทานในขดลวด

$$\begin{aligned}\text{ปฐมภูมิ จากตารางในภาคผนวก ข ค่าความต้านทาน (โอห์ม/1000ฟุต = 1.26 โอห์ม)} \\ \text{ความต้านทาน} &= 1.26 \times [279.77/1000] \\ &= 0.352 \text{ โอห์ม}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ทุติยภูมิ จากตารางในภาคผนวก ข ค่าความต้านทาน (โอห์ม/1000ฟุต = 16.14 โอห์ม)} \\ \text{ความต้านทาน} &= 16.14 \times [5014.2/1000] \\ &= 81.0 \text{ โอห์ม}\end{aligned}$$

ค่ากำลังสูญเสียในขดลวดที่พิกัด

$$\begin{aligned}\text{ด้านปฐมภูมิ} &= 4.545^2 \times 0.352 \\ &= 7.27 \text{ Watts}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ด้านทุติยภูมิ} &= 0.333^2 \times 81 \\ &= 8.98 \text{ Watts}\end{aligned}$$

รวมกำลังสูญเสียในขดลวด ทั้งหมด คือ $7.27 + 8.98 = 16.25 \text{ Watts}$

ค่า IR drop ในขดลวด

$$\begin{aligned}\text{ปฐมภูมิ} &= 4.545 \times 0.352 \\ &= 1.6 \text{ V}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{หุติยภูมิ} &= 0.333 \times 81 \\ &= 26.97 \text{ V}\end{aligned}$$

การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพที่ค่าตัวประกอบกำลัง = 1

$$\text{ที่พิกัด} = \frac{100}{1000 + 18.88 + 26.97} \times 100 = 95.6\%$$

ที่ 1 ¼ ค่าพิกัด

$$= \frac{1250 \times 100}{1250 + 18.88 + [(0.333 \times 1.25)^2 \times 81] + [(4.545 \times 1.25)^2 \times 0.352]} = 96.6\%$$

ที่ ¾ ค่าพิกัด

$$= \frac{750 \times 100}{750 + 18.88 + [(0.333 \times 0.75)^2 \times 81] + [(4.545 \times 0.75)^2 \times 0.352]} = 96.4\%$$

ที่ ½ ค่าพิกัด

$$= \frac{500 \times 100}{500 + 18.88 + [(0.333 \times 0.5)^2 \times 81] + [(4.545 \times 0.5)^2 \times 0.352]} = 95.6\%$$

ที่ ¼ ค่าพิกัด

$$= \frac{250 \times 100}{250 + 18.88 + [(0.333 \times 0.25)^2 \times 81] + [(4.545 \times 0.25)^2 \times 0.352]} = 92.6\%$$

ค่าประสิทธิภาพตลอดวัน (4 ชม. ที่พิกัด และ 20 ชม. โดยไม่ต่อโหลด)

$$\eta_{ad} = \frac{1000 \times 4}{(1000 \times 4) + (18.88 \times 24) + (16.97 \times 4)} \times 100 = 88.5\%$$

ค่า Exciting Current

$$T_I = (8.0 \times 27.24) + 38 = 256 \text{ ampere-turn}$$

$$I_\phi = \frac{256}{\sqrt{2} \times 404} = 0.448 A$$

$$I_{hfe} = \frac{18.88}{202} = 0.093 A$$

$$I_o (\text{exciting current}) = \sqrt{0.448^2 + 0.093^2} = 0.457 A$$

ค่า % Regulation

$$\% \text{ IR drop} = \frac{16.97}{1000} \times 100 = 1.7\%$$

$$\begin{aligned} \% \text{ IX drop} &= \frac{2fTs^2 \text{Isl}}{nhEs \times 10^5} \left(g + \frac{p+s}{z} \right) \\ &= \frac{2(50)(5512)^2 (0.333)9.5}{2(7.245)(3000 \times 10^5)} \left(\frac{0.157 + 0.49 + 0.34}{3} \right) \\ &= 2.205 \times 0.434 \\ &= 0.956\% \end{aligned}$$

% regulation (PF=1)

$$= 1.7 + \frac{0.956^2}{200} = 1.7\%$$

% regulation (PF=0.8)

$$\begin{aligned} &= (1.7 \times 0.8) + (0.956 \times 0.6) + \left(\frac{0.956 \times 0.8 - (0.6 \times 1.7)^2}{200} \right) \\ &= 1.934 + 0.000326 = 1.934\% \end{aligned}$$

4.9 สรุป

ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากสมการต่าง ๆ เหล่านี้ บางค่าอาจจะไม่ตรงกับความเป็นจริง ในการปฏิบัติ เพราะคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างหม้อแปลง และความยืดหยุ่นในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ ใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้าย เพราะค่าเหล่านี้สามารถบอกได้ทั้งหมดว่าค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้ และที่วัดได้ในการทดสอบหม้อแปลงนั้น มีความคลาดเคลื่อนจากการสร้างและต้องปรับปรุงส่วนใดในการสร้างเพื่อให้ได้ค่าต่าง ๆ ออกมาตรงกับทฤษฎีมากที่สุด

บทที่ 5

ขั้นตอนการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า

5.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการสร้างหม้อแปลงตามข้อมูลที่ได้จากการออกแบบในบทที่ 4 ซึ่งวิธีการสร้าง, ข้อมูลหรือรายละเอียดในการสร้างอาจมีข้อแตกต่างจากการออกแบบบ้างเล็กน้อยทั้งนี้เนื่องมาจากวัสดุในการสร้างต่างๆบางชนิดไม่สามารถทำการหาซื้อได้ตามที่ได้ออกแบบ เช่น ความหนาของฉนวน, ความหนาของแผ่นเหล็ก เป็นต้น และขั้นตอนการสร้างหม้อแปลงในบางขั้นตอนจะมีเทคนิคที่ใช้นอกเหนือจากการออกแบบโดยวิธีการและกระบวนการในการสร้างสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วงใหญ่ๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.2 วัสดุอุปกรณ์การสร้างหม้อแปลง

วัสดุในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะมีส่วนที่สำคัญคือ ขดลวดกับแกนเหล็กหม้อแปลงและส่วนที่เป็นการฉนวนอีกซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดวัสดุในการสร้างต่อ หม้อแปลง 1 ตัว โดยประมาณได้ดังนี้

ขดลวดอาบนํ้ายา ชนิด A เบอร์ AWG 22 จำนวน 6 กิโลกรัม

ขดลวดอาบนํ้ายา ชนิด A เบอร์ AWG 13 จำนวน 6 กิโลกรัม

แผ่นเหล็กหม้อแปลง จำนวน 20 กิโลกรัม

แผ่นการฉนวนเบตาไลท์ ขนาด 2x2 ฟุต จำนวน 1 แผ่น

นํ้ายาการฉนวนวานิช จำนวน 1 ปีบ

Binding Post จำนวน 8 ตัว

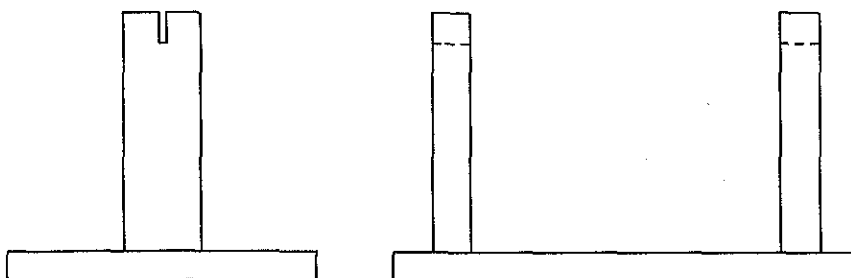
สายสปากัดดี

กระดาษฉนวนหม้อแปลงอย่างหนา (สีแดง)

กระดาษฉนวนหม้อแปลงอย่างบาง

เหล็กฉากขนาด 1.5 นิ้ว ยาว 4 ฟุต

ส่วนอุปกรณ์ในการสร้างหม้อแปลงนั้นจะเป็นอุปกรณ์พื้นฐานทั่วไป และจะมีอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในห้องปฏิบัติการเครื่องมือกลเช่น เครื่องกลึง, เครื่องตัดเหล็กแผ่นเรียบ, เครื่องตัดเหล็กชนิดไฟเบอร์ และเครื่องเจาะ เป็นต้น และจะมีอุปกรณ์ที่ทำขึ้นมาเพื่อใช้ในการพันขดลวดหม้อแปลงโดยเฉพาะซึ่งทำมาจากไม้โดยมีรูปแบบดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 อุปกรณ์การพันขดลวด

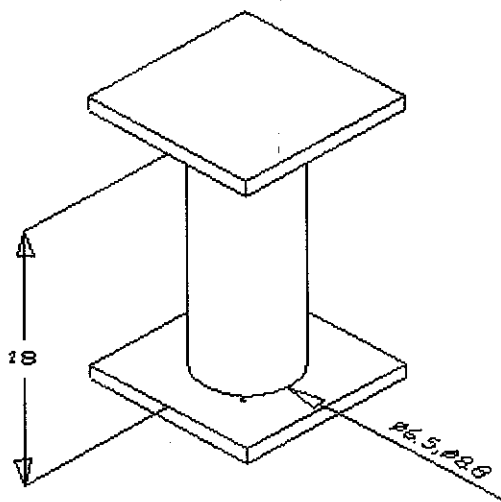
5.3 ขั้นตอนการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าระยะที่ 1

ขั้นตอนระยะที่ 1 นี้จะเป็นส่วนที่เกี่ยวกับการพันขดลวด โดยขดลวดหม้อแปลงที่จะทำการพันนี้จะมีอยู่ทั้งหมด 4 แกนด้วยกัน ซึ่งจะแบ่งเป็นแกนของขดลวดด้านปฐมภูมิ 2 แกน และขดลวดด้านทุติยภูมิ 2 แกนซึ่งจะมีรายละเอียดการพันดังนี้

5.3.1 ทำการกลึงไม้ให้เป็นรูปทรงกระบอกจำนวน 4 ท่อน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6.5 ซม. ยาว 18 ซม. จำนวน 2 ท่อน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.8 ซม. ยาว 18 ซม. จำนวน 2 ท่อน

5.3.2 ทำการตัดไม้อัดความหนา 10 มม. ขนาด 12×12 ซม. จำนวน 8 แผ่น

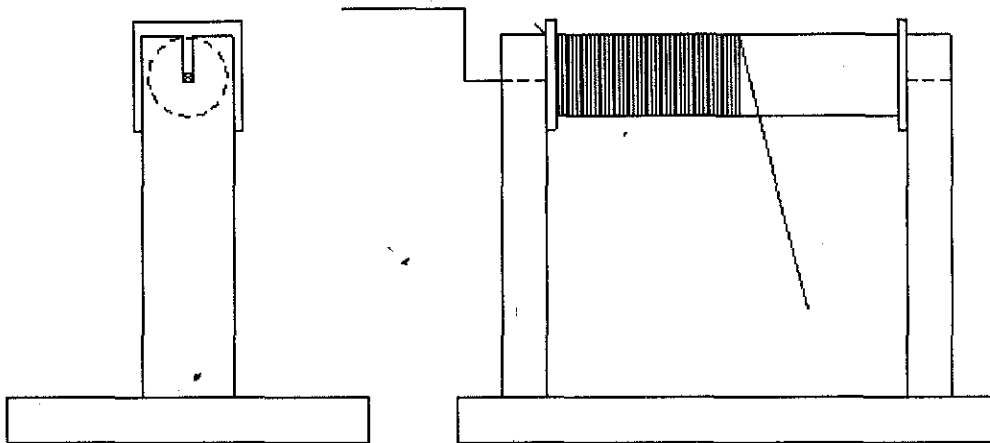
5.3.3 นำแผ่นไม้อัดจาก 5.3.2 ไปประกบหัวท้ายของท่อนไม้รูปทรงกระบอกทั้ง 4 ท่อน และทำการเจาะรูที่บริเวณแผ่นไม้อัดเพื่อสอดสายขดลวด โดยมีลักษณะดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แกนไม้กลึง

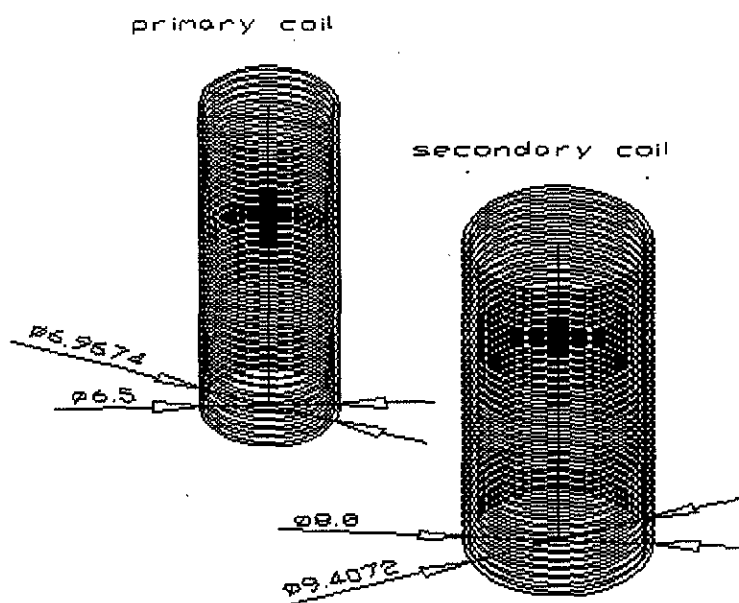
5.3.4 นำท่อนไม้ที่ประกอบเสร็จแล้วตามข้อ 5.3.3 มาทำการพันขดลวด โดยท่อนไม้ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 ซม. จะทำการพันขดลวดเบอร์ AWG 13 และท่อนไม้ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.8 ซม. จะทำการพันขดลวดเบอร์ AWG 22 โดยการพันขดลวดทั้ง 2 ชนิดนี้จะใช้อุปกรณ์การพันที่ไม่เหมือนกันโดยการพันขดลวดเบอร์ AWG 13 จะทำการพันขดลวดโดยใช้เครื่องกลึงทั้งนี้เนื่องมาจากขดลวดมีขนาดใหญ่ โดยการพันจะทำการพันขดลวดทั้งหมด 202 รอบต่อ 1 แกน จำนวน 2 แกน โดยในแต่ละแกนจะพันได้ 3 ชั้น โดยก่อนที่จะทำการพันขดลวดให้พันกระดาษฉนวนหม้อแปลงอย่างหนารอบแกนไม้ก่อน และทำการพันขดลวด และเมื่อหมด 1 ชั้นก็ให้พันกระดาษฉนวนอย่างบางรอบขดลวด 1 รอบกั้นระหว่างขดลวดด้วยกัน ส่วนการพันขดลวดเบอร์ AWG 22 จะทำการพันโดยมีลักษณะการพันเหมือนกับขดลวดเบอร์ AWG 13 แต่จะทำการพันขดลวดโดยอุปกรณ์การพันที่ได้ทำขึ้น โดยมีลักษณะดังรูปที่ 5.1 ทั้งนี้เนื่องจากว่า ขดลวดเบอร์ AWG 13 มีขนาดเล็ก และจำนวนการพันขดลวดมากซึ่งการพันด้วยมือจะสามารถจัดเรียงขดลวดได้ดีกว่าใช้เครื่องกลึง โดยการพันขดลวดเบอร์ AWG 22 นี้จะทำ

การพัน 2 แกน โดยแต่ละแกนจะทำการพัน 2752 รอบ และแต่ละแกนจะพันทั้งหมด 12 ชั้น โดยลักษณะการพันจะมีลักษณะดังรูป 5.3



รูปที่ 5.3 ลักษณะการพันขดลวด

5.3.5 เมื่อทำการพันขดลวดจากขั้นตอนที่ 5.3.4 เสร็จแล้วก็ทำการนำไม้อัด 10 มม. ออก และทำการเคาะแกนไม้ทรงกระบอกออกจากขดลวด โดยในการเคาะต้องระวังไม่ให้ค้อนไปเคาะโดนขดลวด และเมื่อนำแกนหลักออกจากขดลวด ขดลวดจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ขดลวดที่พันเสร็จเรียบร้อยแล้ว

5.4 ขั้นตอนการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าระยะที่ 2

ในขั้นตอนระยะที่ 2 นี้จะเป็นการทำในส่วนของแกนเหล็กหม้อแปลงโดยจะทำจากแผ่นเหล็กบางๆซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดแผ่นเหล็กนี้เป็นเครื่องที่ใช้ ระบบไฮดรอลิกซึ่งจะทำให้แผ่นเหล็กมีความเรียบบริเวณที่ทำการตัด โดยการตัดแผ่นเหล็กในการทำแกนหม้อแปลงจะทำการตัดอยู่ 6 ขนาด ซึ่งรายละเอียดในระยะที่ 2 จะกระทำตามลักษณะดังนี้

5.4.1 ทำการตัดแผ่นเหล็กหม้อแปลงหนา 0.014 นิ้ว ด้วยเครื่องตัดเหล็กแผ่นระบบไฮดรอลิก ตามขนาดดังนี้

แผ่นเหล็กขนาด 2.5×13 ซม. จำนวน 65 แผ่น

แผ่นเหล็กขนาด 2.5×24.7 ซม. จำนวน 65 แผ่น

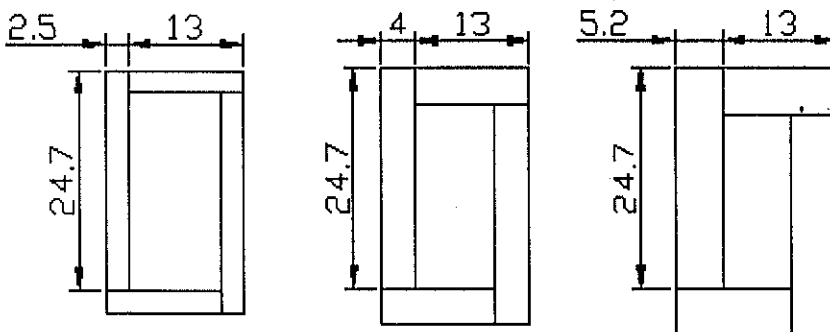
แผ่นเหล็กขนาด 4×13 ซม. จำนวน 86 แผ่น

แผ่นเหล็กขนาด 4×24.7 ซม. จำนวน 86 แผ่น

แผ่นเหล็กขนาด 5.2×13 ซม. จำนวน 140 แผ่น

แผ่นเหล็กขนาด 5.2×24.7 ซม. จำนวน 140 แผ่น

5.4.2 เมื่อทำการตัดแผ่นเหล็กแล้วในแผ่นเหล็กมาทำการเรียงเป็นแกนของหม้อแปลงซึ่งในการเรียงจะทำการเรียง 3 ขนาดและในการเรียงแผ่นเหล็กนั้นจะต้องทำการเรียงสลับกัน ตามรูป 5.5



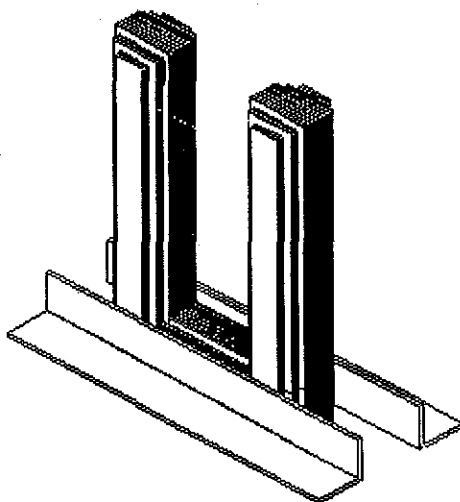
รูปที่ 5.5 การเรียงแกนเหล็ก

5.4.3 เมื่อทำการเรียงแผ่นเหล็กเสร็จแล้วนำมาประกอบเป็นแกนเหล็กหม้อแปลง โดยมีลักษณะตามรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แกนเหล็กหม้อแปลง

5.4.4 เมื่อทำการประกอบแกนเหล็กเสร็จเรียบร้อยแล้วก็นำเหล็กฉาก 1.5 นิ้ว ยาว 1 ฟุต จำนวน 2 เส้นมา บีบแกนเหล็กให้อยู่ตัว และทำการนำแกนเหล็กด้านบนออก เพื่อที่จะนำขดลวดที่ทำการพันเรียบร้อยแล้ว คล้องดังรูปที่ 5.7

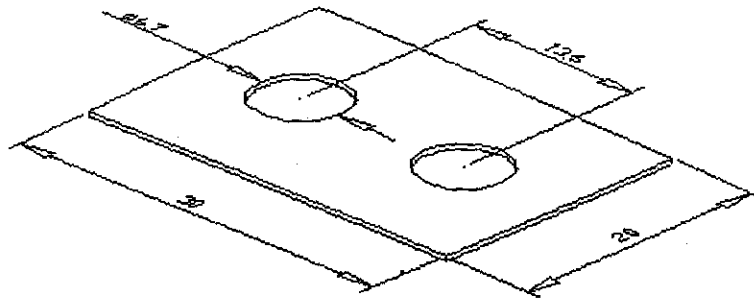


รูปที่ 5.7 แกนเหล็กหม้อแปลงที่นำส่วนบนออก

5.5 ขั้นตอนการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าระยะที่ 3

ขั้นตอนระยะที่ 3 นี้จะเป็น ลักษณะในการประกอบและการฉนวน โดยจากขั้นตอนที่ 1 และ 2 จะทำการ ส่วนขดลวดและส่วนแกนเหล็ก ซึ่งในส่วนที่ 3 จะเป็นการนำทั้ง 2 ส่วนในระยะที่ 1 และ 2 มาประกอบกันและทำการ กันฉนวน และทำการตรวจสอบความเรียบร้อยของหม้อแปลง ก่อนจะนำมาทดสอบคุณสมบัติต่างๆของหม้อ แปลงไฟฟ้า โดยจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.5.1 ทำการตัดแผ่นฉนวนเบคาไลต์จำนวน 2 แผ่น เพื่อเป็นฉนวนกันระหว่างแกนเหล็กกับขดลวดซึ่งจะ ทำการตัดโดยมีขนาดรูปที่ 5.8



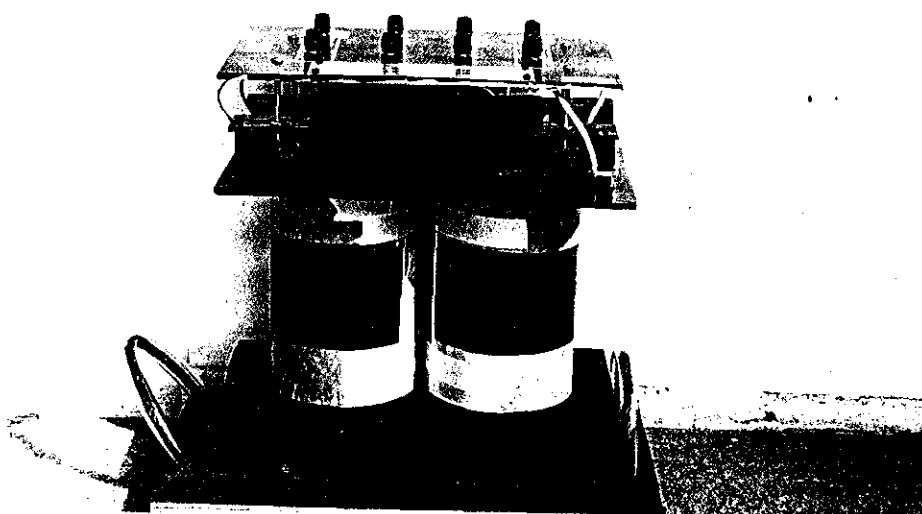
รูปที่ 5.8 แผ่นเบตาไลต์

5.5.2 นำแผ่นเบตาไลต์ในขั้นตอนที่ 5.5.1 จำนวน 1 แผ่นสอดเข้าในแกนเหล็กและทำการใส่ขดลวดปฐมภูมิ (AWG13) ในแกนเหล็กทั้ง 2 แกน โดยระหว่างแกนเหล็กกับขดลวดจะมีกระดาษฉนวนอย่างหนา กันอยู่และเมื่อใส่ขดลวด AWG13 เข้าไปแล้วก็นำกระดาษฉนวนอย่างหนามาพันรอบขดลวดอีก ต่อไปก็นำขดลวดทุติยภูมิ (AWG 22) ใส่ทับขดลวด AWG13 โดยทำการพันกระดาษฉนวน ทั้งด้านในและด้านนอกของขดลวด และเมื่อทำการใส่ขดลวด AWG 22 แล้วจะมีช่องว่างระหว่างขดลวดทั้งสอง ซึ่งจะเป็นพื้นที่การฉนวนระหว่างขดลวดทั้งสองและยังเป็นการระบายความร้อนในขดลวดด้วย โดยในช่องว่างระหว่างขดลวดนี้ก็นำไม้ไผ่มาเหลา ให้พอดีกับช่องว่าง และเสียบลงในช่องว่างนั้นให้ขดลวดทั้งสองแน่น และเมื่อเสร็จก็ทำการปิดด้วยแผ่นเบตาไลต์อีกแผ่นที่เหลือ และทำการปิดแกนเหล็กด้านบนโดยเรียงแผ่นเหล็กทีละแผ่น โดยระวังไม่ให้แต่ละแผ่นซ้อนกัน และเมื่อประกอบเสร็จแล้วจะมี ลักษณะดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 หม้อแปลงที่ประกอบแล้ว

- 5.5.3 นำหม้อแปลงที่ประกอบแล้วในขั้นตอนที่ 5.5.2 มาทำการยึดกับฐานไม้ และนำหม้อแปลงไปทำการทดลองหาค่ากระแสกระตุ้น (Exciting current) โดยทำการต่อสายเชื่อมระหว่างด้านหม้อแปลงเดียวกัน ให้มีทิศทางของฟลักซ์วงจรแม่เหล็กให้ทิศทางเดียวกัน และทำการทดลองโดยกระทำที่สถานะไร้อโหลด ที่แรงดันพิกัดซึ่งกระแสกระตุ้นจะวัดได้จากกระแสทางขดลวดปฐมภูมิ(AWG13) และทำการจัดเรียงแกนเหล็กของหม้อแปลงโดยการเคาะระหว่างทำการวัดค่ากระแสกระตุ้นซึ่งการเคาะจะทำให้แผ่นเหล็กในแกนเหล็กหม้อแปลงเรียงตัวชิดกันมากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้ค่ากระแสกระตุ้นมีค่าต่ำลง ซึ่งเคาะไปเรื่อยๆให้ ค่ากระแสกระตุ้นต่ำที่สุด โดยจะต้องระวังในการเคาะด้วย
- 5.5.4 นำหม้อแปลงไปทำการอบนํ้ายาวานิช โดยขั้นตอนในการอบนํ้ายาวานิชนี้จะต้องทำการอบนํ้ายาวานิชในขณะที่หม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงเพียงให้นํ้ายาวานิช แทรกซึมในแกนเหล็กและขดลวดได้ง่ายขึ้น ซึ่งในการทำให้หม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงนั้นทำโดย นำหม้อแปลงใส่ในปิ๊บและทำการอบด้วยหลอดไฟฟ้าชนิดหลอดกลม ขนาด 60 W. 1ดวง โดยทิ้งหม้อแปลงไว้ประมาณ 7 ชั่วโมง และนํ้ายาวานิช ราคกลงบนตัวหม้อแปลงให้ทั่ว และนำหม้อแปลงมาตากให้แห้ง กระทำซ้ำ 2 รอบ
- 5.5.5 เมื่อทำการอบนํ้ายาวานิชเสร็จแล้วก็นำหม้อแปลงมาตรวจสอบความเรียบร้อยภายนอกและทำการติด Binding post และสวมสายสปริงติดกับขดลวดที่จะนำไปใช้งานและทำการเข้าหัวสายขดลวดให้เรียบร้อยพร้อมนำไปใช้งาน โดยหม้อแปลงที่เสร็จสมบูรณ์จะมีลักษณะดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 หม้อแปลงไฟฟ้าที่เสร็จสมบูรณ์

5.6 สรุป

ขั้นตอนในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าจะแยกออกเป็นขั้นตอนหลักๆ 3 ขั้นตอน โดยเรียงตามลำดับจากขั้นตอนการพันขดลวด, ขั้นตอนการทำแกนเหล็ก และขั้นตอนการประกอบและการฉนวน ซึ่งในบางรายละเอียดของในแต่ละขั้นตอนอาจจะมีข้อแตกต่างไปจากการออกแบบเนื่องจากข้อจำกัดของวัสดุและอุปกรณ์โดยลักษณะการสร้างจะเริ่มจากการพันขดลวดตามจำนวนรอบที่ได้ออกแบบบนท่อนไม้กึ่ง และนำท่อนไม้ออก และทำการตัดเหล็กมาประกอบเป็นแกนหม้อแปลงตามขนาดที่ได้ออกแบบและนำขดลวดที่พันเสร็จแล้วใส่ในแกนขดลวด และทำการกันฉนวนและประกอบตรวจสอบดูความเรียบร้อยก่อนนำไปค่าพารามิเตอร์ต่างๆทางไฟฟ้าก่อนนำไปใช้งานต่อไป

บทที่ 6

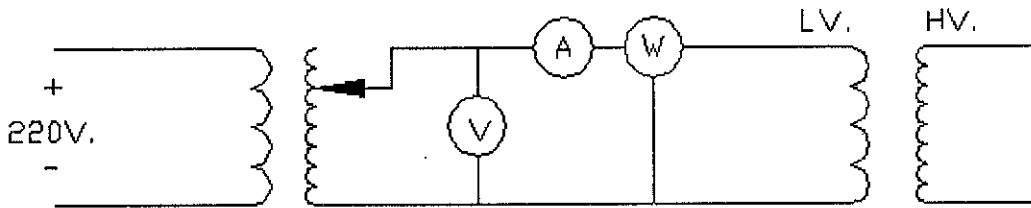
การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลง

6.1 กล่าวนำ

จากข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำการออกแบบมานั้น จะต้องทำการตรวจสอบค่าต่างๆเหล่านั้นอีกครั้งในห้องปฏิบัติการซึ่งข้อมูลที่ได้ตรวจวัดจากห้องปฏิบัติการอาจมีความแตกต่างจากข้อมูลที่ทำการออกแบบบ้างเล็กน้อย แต่จะไม่เลวร้ายไปกว่าที่ได้ทำการออกแบบไว้ ซึ่งในบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ประสิทธิภาพ, กำลังงานสูญเสีย, ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าโวลต์เตจเรกูเลชันของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นต้น และยังอธิบายวิธีการตรวจวัดค่าต่างๆ ด้วย โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.2 การทดสอบหม้อแปลงที่สถานะเปิดวงจร

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานะเปิดวงจรนี้สามารถใช้วัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางไฟฟ้าได้หลายค่าซึ่งจะมีการต่อวงจรดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.1 การทดสอบหม้อแปลงที่สถานะเปิดวงจร

ในการทำการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานะเปิดวงจรนี้จะทำการเปิดวงจรทางด้านแรงดันสูง และทำการวัดค่าทดสอบต่างๆทางด้าน แรงดันต่ำ ทั้งนี้เพราะว่าทางด้านแรงดันต่ำเครื่องมือวัดจะอยู่ในขนาดที่สามารถทำการวัดได้และในการทดสอบจะมีอันตรายน้อย แต่ต้องระมัดระวังไม่ให้ถูกด้านขั้วสายด้านแรงดันสูง และควรมีการป้องกันขั้วสายด้วย

และผลจากการทดสอบในสถานะเปิดวงจรจะใช้วัดค่าต่างๆ ทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้

ค่ากระแสกระตุ้นทางด้านปฐมภูมิ (Exciting current)

อัตราส่วนการทรานสฟอร์ม (a)

ค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss)

ค่าความต้านทานในแกนเหล็ก (Rc)

ค่ารีแอแกนซ์ของตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก (X_m)

6.2.1 การตรวจวัดค่ากระแสการกระตุ้นทางด้านปฐมภูมิ

ในการวัดค่ากระแสการกระตุ้นนี้จะทำการวัดที่สภาวะเปิดวงจร ดังรูปที่ 6.1 แต่จะต้องปลดโวลท์มิเตอร์ และวัตต์มิเตอร์ ออกเสียก่อน เพื่อให้กระแสไหลผ่านแอมมิเตอร์ได้อย่างเดียว โดยค่ากระแสการกระตุ้นที่อ่านได้คือ

$$\text{กระแสกระตุ้น(Exciting current, } I_o) = 0.295 \text{ A.}$$

6.2.2 การตรวจสอบค่าอัตราส่วนการทรานสฟอร์ม (a)

จะตรวจสอบโดยใช้ โวลท์มิเตอร์ 2 ตัวต่อระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิตามรูปที่ 6.1 แต่จะทำการปลด วัตต์มิเตอร์ออก โดยค่าอัตราส่วนการทรานสฟอร์ม (a) จะต้องมีความใกล้เคียงกับ $220/3000 = 0.0733$ ซึ่งในการทดลองจะไม่สามารถทำการวัดแรงดันที่ 3000V. โดยอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการได้ จึงต้องปรับค่าแรงดันทางปฐมภูมิมาที่ 35 V. และทำการวัดค่าแรงดันทางด้านทุติยภูมิได้ดังนี้

$$V_2 = 477 \text{ V.}$$

$$\therefore a = \frac{V_p}{V_s} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{35}{477} = 0.0734$$

6.2.3 การตรวจสอบค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก, R_c และ X_m

การหาค่าทั้ง 3 ส่วนนี้จะหาค่าได้ในการทดลองเดียวกันดัง รูปที่ 6.1 โดยจะไม่ต่อ โวลท์มิเตอร์ทางด้านทุติยภูมิ เพราะแรงดันเกินขนาดของเครื่องมือวัด ซึ่งจากการทดลองในรูปที่ 6.1 ทำการทดลองที่แรงดันพิกัด จะได้ค่าต่างๆ ดังนี้

$$P_{oc} = 10 \text{ W.}$$

$$I_{oc} = 0.295 \text{ A.}$$

$$V_{oc} = 220 \text{ V.}$$

ดังนั้นจากกำลังงานจริงที่อ่านได้จาก วัตต์มิเตอร์จะเป็นค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก ส่วนค่า R_c และ X_m จะสามารถหาได้โดยการคำนวณจากค่า P_{oc} , I_{oc} และ V_{oc} ดังนี้

$$\text{ตัวประกอบกำลัง PF} = \frac{P_{oc}}{I_{oc} V_{oc}} = \frac{10}{0.295 \times 220} = 0.154 \text{ lagging}$$

$$\theta = -\cos^{-1} PF = -81.1^\circ$$

$$Y_E = \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \angle -81.1^\circ = \frac{0.295}{220} \angle -81.1^\circ = 0.00134 \angle -81.1^\circ$$

$$= \frac{1}{R_c} - j \frac{1}{X_m} = 0.000207 - j0.001324$$

$$\therefore R_c = 4831 \Omega$$

$$X_m = 755 \Omega$$

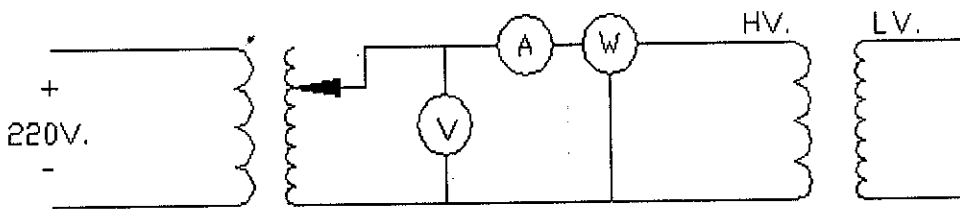
ดังนั้นจากค่า R_c และ X_m สามารถที่จะนำมาคำนวณหาค่า กระแสทำแม่เหล็ก(Magnetizing current, I_ϕ) และกระแสกระตุ้นในส่วนสูญเสียในแกนเหล็ก(Core loss current, I_{h+e}) ได้ดังนี้

$$I_{h+c} = \frac{(0.295 \angle -81.1^\circ)(755 \angle 90^\circ)}{4831 + j755} = 0.0455 \angle 0^\circ$$

$$I_\phi = \frac{(0.295 \angle -81.1^\circ)(4831 \angle 0^\circ)}{4831 + j755} = 0.291 \angle -90^\circ$$

6.3 การทดสอบหม้อแปลงที่สภาวะลัดวงจร

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจรนี้จะสามารถทำการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางไฟฟ้าได้หลายค่าซึ่งการต่อวงจรจะมีการต่อดังวงจรต่อไปนี้



รูปที่ 6.2 การทดสอบหม้อแปลง ที่สภาวะลัดวงจร

ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจรนี้ จะต้องทำการ ลัดวงจรที่ ด้านแรงดันต่ำและทำการ วัดค่าต่างๆ ทางด้านแรงดันสูง ทั้งนี้เป็นเพราะการทดสอบนี้จะกระทำ ที่แรงดันกำหนดค่ากระแสทางขดลวดแรงดันต่ำจะมีค่าสูง ดังนั้นการป้อนแรงดันและวัดค่าต่างๆ ทางด้านขดลวดแรงดันสูงจะกระทำได้สะดวกกว่า โดยการทดสอบที่สภาวะนี้จะสามารถวัดค่าต่างๆทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้

ค่ากำลังงานสูญเสียในขดลวด (Copper loss)

ค่าความต้านทานสมมูล (R_{eq})

ค่ารีแอคแตนซ์สมมูล (X_{eq})

6.3.1 การตรวจสอบค่ากำลังงานสูญเสียในขดลวด, R_{eq} , X_{eq}

การตรวจสอบค่าทั้ง 3 จะหาค่าได้โดยการทดลองตามรูปที่ 6.2 ที่กระแสฟลักซ์ (0.333A.) ซึ่งจะได้ค่าที่วัดได้ 3 ค่า คือ

$$P_{sc} = 19 \text{ W.}$$

$$I_{sc} = 0.333 \text{ A.}$$

$$V_{sc} = 63 \text{ V.}$$

จากค่ากำลังงานจริงที่อ่านได้ จากวัตต์มิเตอร์ จะเป็นค่ากำลังงานสูญเสียในขดลวดของหม้อแปลง ส่วนค่า X_{eq} , R_{eq} จะสามารถหาได้จากการคำนวณของค่าที่วัดได้ดังนี้

$$\text{ตัวประกอบกำลัง PF} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}V_{sc}} = \frac{19}{(0.333)(63)} = 0.906 \text{ lagging}$$

$$Z_{sc} = \frac{63}{0.333} \angle \cos^{-1} 0.906$$

$$= 189.2 \angle 25^\circ$$

$$= 171 + j79.9$$

$$= R_{eq} + jX_{eq}$$

$$\therefore R_{eq} = 171 \, \Omega = 0.019 \text{ pu.}$$

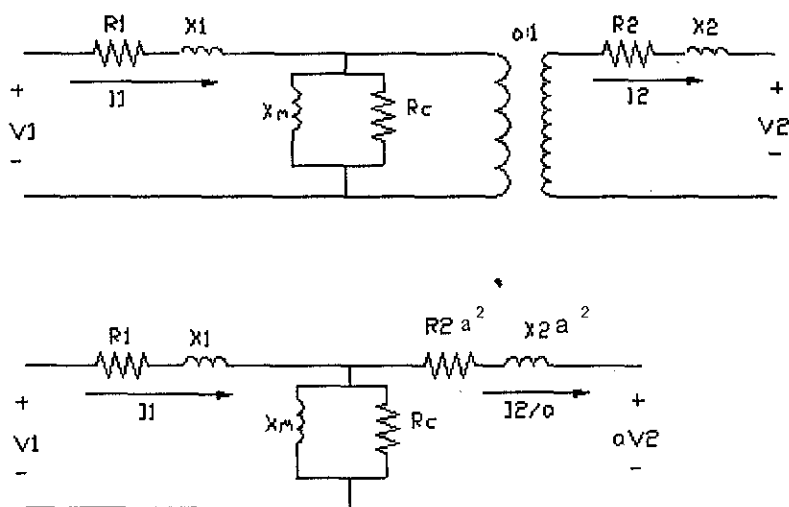
$$X_{eq} = 79.9 \, \Omega = 0.0089 \text{ pu.}$$

$$Z_{eq} = \sqrt{171^2 + 79.9^2} = 188.7 \, \Omega = 0.021 \text{ pu.}$$

(*) ค่า R_{eq} และค่า X_{eq} ที่ได้จะคิดเทียบไปทางด้านแรงดันแรงดัน (ด้านทุติยภูมิ)

6.4 การทดสอบหาพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้านั้น โดยทั่วไปจะมีรูปแบบดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 วงจรสมมูลของหม้อแปลง

จากการทดลองใน ตอนที่ 6.2 , 6.3 ผลการทดลองที่ได้จะสามารถนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลของหม้อแปลงได้ แต่ในส่วนของ X_{eq} และ R_{eq} นั้นจะต้องทำการแยกเป็นค่า X_1 , X_2 และ R_1 , R_2 เสียก่อนโดยค่า R_1 และค่า R_2 นั้นสามารถหาค่าได้โดยใช้ วงจรวิธสโตนบริดจ์ วัดซึ่งจะได้

$$R_1 = 0.479 \, \Omega.$$

$$R_2 = 83.2 \, \Omega.$$

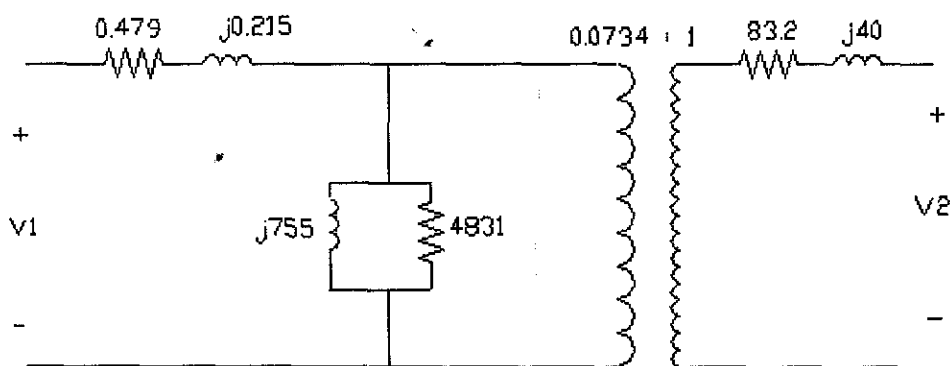
ส่วนค่า X_1 (X_L) และ X_2 (X_H) นั้นจะหาค่าได้โดยประมาณ ซึ่งหาจาก X_{eq} ดังนี้

$$X_{eq} = X_2 + \frac{X_1}{a^2} = 79.9 \Omega$$

$$X_2 \approx \frac{X_1}{a^2} \approx \frac{79.9}{2} = 39.95 \approx 40 \Omega$$

$$X_1 = 39.95 \times a^2 \approx 0.215 \Omega$$

ดังนั้นจาก การตรวจวัดและการคำนวณจากขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมดนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลของหม้อแปลงได้ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 วงจรสมมูลของหม้อแปลงที่ได้จากการทดสอบ

6.4 การทดสอบหาค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากขั้นตอน 6.2 และ 6.3 จะทราบค่า กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของหม้อแปลง ดังนั้นจะสามารถหาค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงได้ดังนี้

ที่โหลดพิกัด 100% ($PF=1.0$)

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพ}(\eta) &= \frac{\text{กำลังงานขาออก}}{\text{กำลังงานขาออก} + \text{กำลังงานสูญเสียทั้งหมด}} \times 100 \\ &= \frac{1000}{1000 + 10 + 19} \times 100 = 97.2\% \end{aligned}$$

ที่โหลด 75% ($PF=1.0$)

กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก=10 W.

$$\begin{aligned} \text{กำลังงานสูญเสียในขดลวด} &= (0.75 \times 0.333)^2 83.2 + (0.75 \times 4.545)^2 0.479 \\ &= 10.75 \text{ W.} \end{aligned}$$

$$\text{กำลังงานสูญเสียรวม} = 10 + 10.75 = 20.75 \text{ W.}$$

$$\text{ประสิทธิภาพ}(\eta) = \frac{750}{750+20.75} \times 100 = 97.3\%$$

ที่โหลด 50% (PF=1.0)

กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก=10 W.

$$\begin{aligned} \text{กำลังงานสูญเสียในขดลวด} &= (0.5 \times 0.333)^2 83.2 + (0.5 \times 4.545)^2 0.479 \\ &= 4.78 \text{ W.} \end{aligned}$$

$$\text{กำลังงานสูญเสียรวม} = 10+4.78=14.78 \text{ W.}$$

$$\text{ประสิทธิภาพ}(\eta) = \frac{500}{500+14.78} \times 100 = 97.1\%$$

ที่โหลด 25%

กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก=10 W.

$$\begin{aligned} \text{กำลังงานสูญเสียในขดลวด} &= (0.25 \times 0.333)^2 83.2 + (0.25 \times 4.545)^2 0.479 \\ &= 1.20 \text{ W.} \end{aligned}$$

$$\text{กำลังงานสูญเสียรวม} = 10+1.20=11.2 \text{ W.}$$

$$\text{ประสิทธิภาพ}(\eta) = \frac{250}{250+11.2} \times 100 = 95.7\%$$

6.5 การตรวจสอบหาค่า โวลต์เตจเรกูเลชันของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในการหาค่าโวลต์เตจเรกูเลชันนี้จะหาได้จากการคำนวณโดยอาศัยค่า X_{eq} และ R_{eq} ซึ่งในการหาค่าจะหาค่าที่ตัวประกอบกำลังของโหลดมีค่า 1.0 และ 0.8 กระแสล้าหลัง

ค่าโวลต์เตจเรกูเลชันที่ตัวประกอบกำลังของโหลด 1.0 กระแสล้าหลัง (PF=1.0)

$$\begin{aligned} \frac{V_1}{a} &= V_2(1+j0) + I_2(\cos \theta_2 - j\sin \theta_2)(R_{eq} + jX_{eq}) \\ &= 3000(1+j0) + 0.333(1 - j0)(171 + j79.9) \\ &= 3057 + j26.6 \\ &= \sqrt{3056^2 + 26.6^2} = 3056 \text{ V.} \end{aligned}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์เรกูเลชัน} = \frac{3056 - 3000}{3000} \times 100 = 1.87\%$$

ค่าโวลต์เตจเรกูเลชันที่ตัวประกอบกำลังของโหลด 0.8 กระแสล้าหลัง (PF=0.8 Lagging)

$$\frac{V_1}{a} = V_2(1+j0) + I_2(\cos \theta_2 - j\sin \theta_2)(R_{eq} + jX_{eq})$$

$$\begin{aligned}
&= 3000(1+j0) + 0.333(0.8 - j0.6)(171 + j79.9) \\
&= 3061 + j12 \\
&= \sqrt{3061^2 + 12^2} = 3061 \text{ V.}
\end{aligned}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์แรงดันขึ้น} = \frac{3061 - 3000}{3000} \times 100 = 2.03\%$$

6.6 สรุป

จากขั้นตอนจาก 6.1 ถึง 6.5 สามารถนำมาเขียนเป็นข้อมูลรวมของค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหม้อแปลงจากการทดสอบได้ดังนี้

หม้อแปลงไฟฟ้า 220/3000V. (4.545/0.333A.) 1kVA. Single Phase, 50 Hz.

ค่ากระแสทำแม่เหล็ก(Magnetizing current).....0.291A.

ค่ากระแสในส่วนสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss current).....0.045A.

ค่ากระแสกระตุ้น

แอมแปร์ 0.295.

เปอร์เซ็นต์.....6.49

เปอร์เซ็นต์

ค่าความต้านทาน.....1.90

ค่ารีแอคแตนซ์.....0.89

ค่าอิมพีแดนซ์.....2.10

ตัวประกอบกำลัง	0.8	1.0
โวลต์เตจแรงดันขึ้น	2.03	1.87

โหลด

กำลังงานสูญเสียรวม.....29 W.

กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก.....10W.

กำลังงานสูญเสียในขดลวด..... 19W.

เปอร์เซ็นต์

โหลด	25	50	75	100
ประสิทธิภาพ (PF=1.0)	95.7	97.1	97.3	97.2

ขดลวด

	LV.	HV.
ค่าความต้านทาน	0.479Ω	83.2Ω
ค่ารีแอคแตนซ์	0.215Ω	40Ω

บทที่ 7

ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อสรุป

ในเรื่องหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถที่จะพิจารณาและทำการออกแบบจัดสร้างหม้อแปลงให้มีคุณสมบัติต่างๆ จะสามารถจัดสร้างเองได้ ซึ่งกระบวนการในการออกแบบและจัดสร้างหม้อแปลงในโครงการนี้ มีการกล่าวถึงทฤษฎี และสมการที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

- 7.1.1 ทำการเลือกประเภทโครงสร้างของหม้อแปลงว่าจะเป็น โครงสร้างประเภทขดลวดล้อมแกนหรือประเภทแกนเหล็กล้อมขดลวด โดยแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติข้อดีแตกต่างกันซึ่งสามารถพิจารณารายละเอียดในการเลือกออกแบบได้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.3
- 7.1.2 ทำการกำหนดค่าแรงดันต่อรอบในการพันขดลวดทองแดง (V_t) ซึ่งสามารถหาค่า V_t ได้จากสมการ 3.2 และพิจารณาค่าในค่าคงที่ในหัวข้อ 3.3 ประกอบกัน
- 7.1.3 ทำการหาจำนวนรอบทั้งหมดที่จะต้องทำการพันขดลวดทองแดงทั้งทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ ซึ่งหาค่าได้โดย นำค่าแรงดันหารด้วยค่า V_t
- 7.1.4 หาค่ากระแสที่แรงดันพิกัดทั้งทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ
- 7.1.5 หาขนาดของหน้าต่างของแกนเหล็กหม้อแปลงจากสมการ 3.5 โดยจะต้องพิจารณาควบคู่กับค่า space factor จากสมการที่ 3.4
- 7.1.6 ทำการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก โดยเริ่มจากการหาค่าฟลักซ์สูงสุดในแกนเหล็ก จาก สมการ 2.2 และเลือกค่าความหนาแน่นของฟลักซ์ โดยพิจารณาจากตาราง 3.1 และกำหนดค่า stacking factor จากนั้นสามารถทำการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กได้จาก $A = \Phi_{max}/B$
- 7.1.7 หาค่าเฉลี่ยทางเดินของฟลักซ์ในแกนเหล็ก (m.m.p)
- 7.1.8 คำนวณค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กโดยพิจารณาจาก น้ำหนักรวมของแกนเหล็กกับค่าอัตราส่วนกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักแกนเหล็ก จากกราฟในภาคผนวก ก.
- 7.1.9 ทำการกำหนดค่าขนาดความหนาของการฉนวนต่างๆ
- 7.1.10 ทำการเลือกขนาดเบอร์ของเส้นลวดอบน้ำยาโดยพิจารณาจากค่ากระแสที่พิกัดกับค่าความหนาแน่นของกระแส โดยเลือกจากตารางในภาคผนวก ก.
- 7.1.11 ทำการคำนวณความยาวของเส้นลวดอบน้ำยาที่จะใช้พันรวมทั้งหมดทั้งทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ
- 7.1.12 ทำการหาค่าความต้านทานในขดลวดหม้อแปลงทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิโดยพิจารณาจากค่าความต้านทานจำเพาะของเส้นลวดจากตารางในภาคผนวก ข.
- 7.1.13 หาค่ากำลังงานสูญเสียในขดลวดที่โหลดต่างๆจากสมการ $P = I^2 R$
- 7.1.14 คำนวณค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่โหลดต่างๆ ซึ่งพิจารณาได้จากหัวข้อที่ 3.15
- 7.1.15 คำนวณค่ากระแสกระชุนทางด้านปฐมภูมิ ซึ่งพิจารณาได้จากหัวข้อที่ 3.10
- 7.1.16 คำนวณค่าโวลต์เตจเรกูเลชันที่โหลดต่างๆ ซึ่งพิจารณาได้ตามหัวข้อที่ 3.14

7.2 ข้อเสนอแนะ

การออกแบบและการจัดสร้างหม้อแปลงเมื่อพิจารณาถึงค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงจะมีความสำคัญในการพิจารณาเลือกใช้หม้อแปลงนั้น ซึ่งจากการออกแบบและจัดสร้างหม้อแปลงไฟฟ้านั้นยังคงสามารถที่จะเพิ่มค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงได้อีกโดยสามารถพัฒนาในขั้นตอนได้โดย

7.2.1 ในการพิจารณาออกแบบแกนเหล็กในขดลวด จะเพิ่มระดับชั้นของแกนเหล็กให้มากขึ้นโดยให้เสมือนเป็นทรงกลมมากที่สุด ซึ่งจะช่วยให้ลดความยาวของขดลวดที่จะพันและส่งผลให้ค่ากำลังงานสูญเสียในขดลวดลดลงด้วย ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงเพิ่มขึ้น

7.2.2 ในการพิจารณาค่า ความหนาแน่นของฟลักซ์ ในการออกแบบจะพบว่าหม้อแปลงในโครงงานนี้มีค่าค่าซึ่งจะส่งผลให้ต้องใช้จำนวนเหล็กที่ทำหม้อแปลงมากซึ่งส่งผลให้เกิดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กมากด้วยแต่ถ้าทำการกำหนดค่าความหนาแน่นของฟลักซ์สูงเกินไป จะทำให้เกิดค่ากระแสกระตุ้นสูง ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัดส่วนกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กนำหนักเหล็กมีค่าสูง ส่งผลให้เกิดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กสูงอีก ดังนั้นการพัฒนาต่อไปนั้นจะต้องทำการหาจุดที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด

7.2.3 ในการพิจารณาค่า ความหนาแน่นของกระแส ถ้าต้องการให้ประสิทธิภาพ สูงก็จะต้องลดค่าความหนาแน่นของกระแส ให้ต่ำ ซึ่งจะทำให้ต้องใช้ขดลวดขนาดใหญ่ขึ้น แต่จะลดค่ากำลังงานสูญเสียในขดลวดได้อีกเนื่องจากค่าความต้านทานในขดลวดลดลง แต่ค่าใช้จ่ายในการทำหม้อแปลงจะสูงขึ้นด้วย ดังนั้น ในการออกแบบควรทำการพิจารณาถึงความเหมาะสมในการใช้งานว่าคุ้มค่ากับการปฏิบัติหรือไม่

เอกสารอ้างอิง

- [1] Alpred Still, Charles S. Siskind , Element of Electrical Machine design , McGraw-Hill, 1954
- [2] S J Shapman , Electric Machinery Fundamentals , McGraw-Hill, 1991
- [3] William H Hayt, Jr Engineering Electromagnetics , McGraw-Hill, 1989

บรรณานุกรม

- [1] ไพบุลย์ ไชยนิล ,Electromechanical energy conversion II ,2529
- [2] Alpred Still,Charles S. Siskind Element of Electrical Machine design ,McGraw-Hill,1954
- [3] Fitzgerald , A.E. ,Electric Machinery ,McGraw-Hill,1990
- [4] Kenneth L.G, Kenneth R.E Transformer ,American Technical Publishers Inc ,1981
- [5] Mulukutla S Sarma, Electric Machines ,West Publishing company ,1994
- [6] S J Shapman , Electric Machinery Fundamentals ,McGraw-Hill,1991
- [7] William H Hayt,Jr Engineering Electromagnetics ,McGraw-Hill,1989
- [8] William M Flanagan ,Handbook of Transformer applications,McGraw-Hill ,1986

ภาคผนวก ก.

(ตารางแสดงขนาดของเส้นลวดที่ใช้ในการพันหม้อแปลงไฟฟ้า)

ตารางแสดงขนาดของเส้นลวดที่ใช้ในการพันหม้อแปลง

ลวดเบอร์ AWG	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิล Mil)	พื้นที่หน้าตัด (ตารางนิ้ว)	ความหนาแน่นกระแสคิดเป็นแอมแปร์ต่อตารางนิ้ว				
			2000 แอมป์	2500 แอมป์	3000 แอมป์	3500 แอมป์	4000 แอมป์
1	300	0.0706	141.2	176.9	212	247.5	283
	289.3	0.0657	131.4	164.1	197.1	230	262.8
2	276	0.0598	119.6	149.5	179.4	209	239.4
	257.6	0.052	104	130	156	192	208
3	252	0.0499	99.8	124.8	149.7	174.5	199
4	232	0.0425	85	106.2	127.5	148.8	170
	229.4	0.0413	82.6	103.2	123.9	144.5	165.2
5	212	0.0352	70.4	88	105.6	123.1	140.8
	204.3	0.0328	65.6	75.5	98.4	114.8	131.2
6	192	0.0289	57.8	72.25	86.7	101.2	115.6
	181.9	0.02599	51.98	64.9	77.97	91	103.9
7	176	0.02433	48.66	60.7	72.99	85	97.3
	162	0.02073	41.5	52.4	62.25	73.25	83
8	160	0.02014	40.28	50.4	60.42	70.5	80.56
	144.3	0.01839	32.78	40.98	49.17	57.3	65.56
9	144	0.0163	32.6	40.75	48.9	57	65.2
	128.5	0.013	26	32.5	39	46.5	52
10	128	0.01237	25.74	32.2	38.71	45	51.40
11	116	0.01058	21.16	26.45	31.74	37	42.32
	114.4	0.01029	20.58	25.75	30.87	36	41.16
12	104	0.0085	17	21.25	25.5	29.75	34
	101.9	0.008158	16.316	20.04	24.474	28.55	32.632
13	92	0.00664	13.28	16.6	19.92	23.2	26.56
	90.7	0.00646	12.93	16.15	19.38	22.6	25.84
14	80	0.005027	10.054	12.58	15.081	17.6	20.018
15	72	0.004072	8.14	10.2	12.22	14.24	16.29
	64.1	0.00329	6.58	9.65	9.87	11.5	13.16
16	64	0.003217	6.43	8.05	9.65	11.3	12.87
	57.1	0.00235	5.12	6.4	7.68	8.96	9.24
17	56	0.002463	4.93	6.16	7.39	8.82	8.85
	50.8	0.002028	4.036	5.05	6.054	7.05	8.052

18	48	0.001820	3.62	4.52	5.44	6.34	7.24
	45.3	0.00161	3.22	4.025	4.83	5.64	6.44
	40.3	0.001276	2.524	3.18	3.816	4.45	5.088
19	40	0.001257	2.52	3.14	3.77	4.4	5.02
20	36	0.001018	2.04	2.55	3.05	3.56	4.065
	35.9	0.001013	2.026	2.535	3.039	3.55	4.052
21	32	0.000804	1.61	2.01	2.41	2.81	3.21
	28.5	0.000636	1.276	1.595	1.914	2.235	2.552
22	28	0.000615	1.23	1.54	1.841	2.15	2.46
	25.3	0.000501	1.01	1.257	1.575	1.76	2.1
23	24	0.000452	0.905	1.13	1.359	1.58	1.82
	22.6	0.0004	0.838	1.002	1.2057	1.405	1.6076
24	22	0.00038	0.761	0.95	1.14	1.33	1.57
25	20	0.00034	0.628	0.786	0.95	1.1	1.25
26	18	0.0002545	0.509	0.636	0.76	0.89	1.01
	17.9	0.00025	0.503	0.628	0.7545	0.88	1.0
27	16.1	0.00021	0.423	0.528	0.634	0.739	0.845
	15.9	0.000199	0.3976	0.4955	0.5988	0.695	0.795
28	14.8	0.00017	0.344	0.43	0.516	0.601	0.69
	14.2	0.000158	0.32	0.397	0.47	0.55	0.62
29	13.6	0.000145	0.291	0.363	0.436	0.509	0.581
	12.6	0.000135	0.25	0.3125	0.375	0.4375	0.5
30	12.4	0.00012	0.241	0.302	0.362	0.428	0.483
31	11.6	0.000105	0.212	0.294	0.317	0.37	0.42
	11.3	0.000099	0.2	0.248	0.3	0.348	0.4024
32	10.8	0.000031	0.183	0.229	0.275	0.32	0.365
33	10	0.000078	0.157	0.196	0.265	0.275	0.314
34	9.2	0.000066	0.133	0.166	0.2	0.233	0.266
	8.9	0.000062	0.1244	0.155	0.186	0.2175	0.2488
35	8.4	0.000055	0.111	0.139	0.176	0.194	0.22
	8	0.00005	0.105	0.1255	0.1507	0.174	0.21
36	7.6	0.000045	0.0907	0.113	0.138	0.158	0.181
	7.1	0.000039	0.07937	0.099	0.119	0.138	0.158
37	6.8	0.000036	0.0726	0.0908	0.101	0.127	0.145
	6.3	0.000031	0.0624	0.078	0.0936	0.109	0.1248

ภาคผนวก ข.

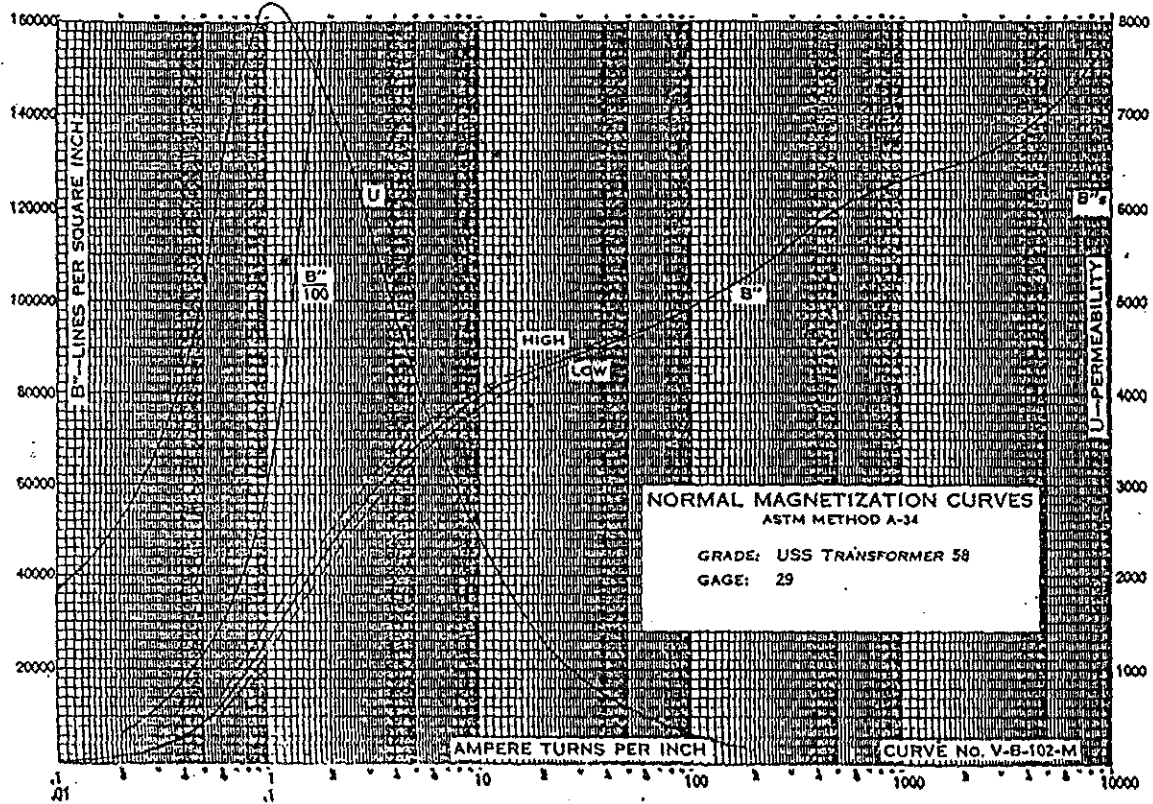
(ตารางแสดงค่าความต้านทานของเส้นลวดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

ตารางแสดงค่าความต้านทานของเส้นลวดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

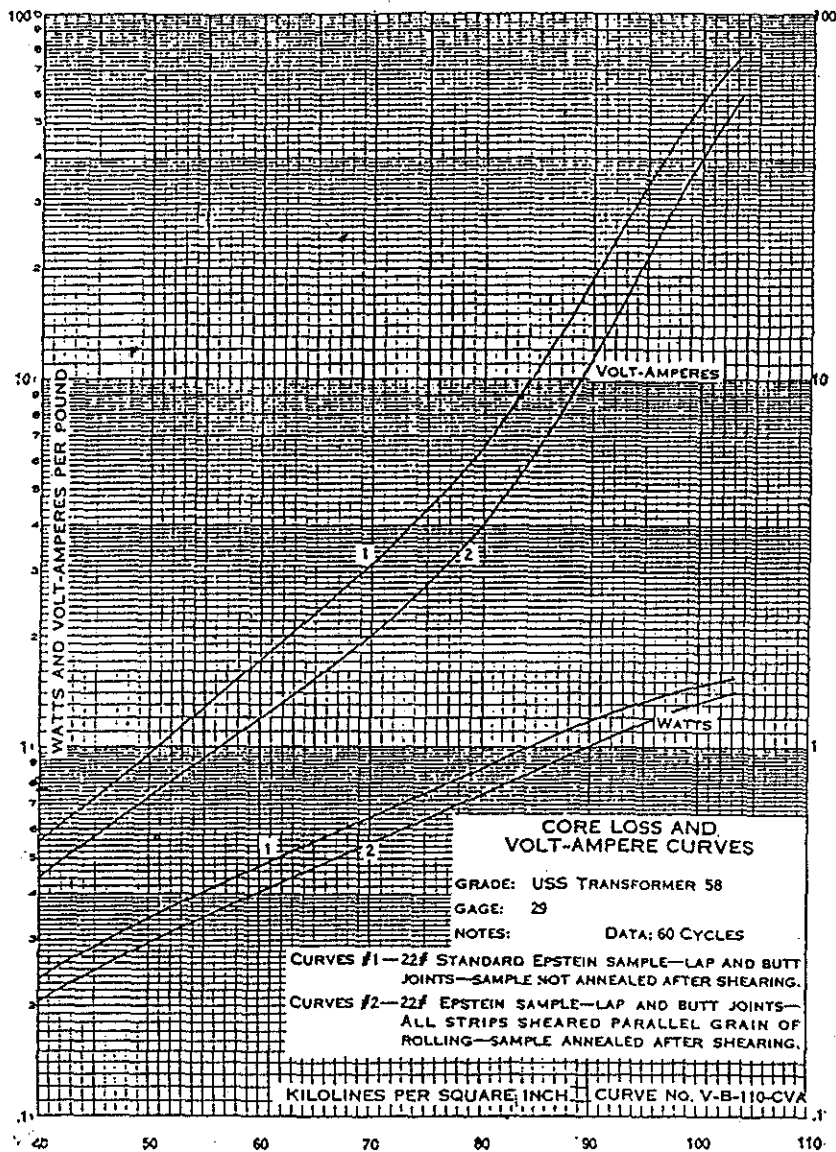
AWG	Diameter (in)	Resistance at 25 C (Ω /1000ft)
6	0.1620	0.3951
7	0.1443	0.4982
8	0.1285	0.6282
9	0.1144	0.7921
10	0.1019	0.9989
11	0.09074	1.260
12	0.08081	1.588
13	0.07196	2.003
14	0.06408	2.525
15	0.05707	3.184
16	0.05082	4.016
17	0.04526	5.064
18	0.04030	6.385
19	0.03589	8.051
20	0.03196	10.15
21	0.02846	12.80
22	0.02535	16.14
23	0.02257	20.36
24	0.02010	25.67
25	0.01790	32.37
26	0.01597	40.81
27	0.01420	51.47
28	0.01264	64.90
29	0.01126	81.83
30	0.01003	103.2
31	0.00893	130.1
32	0.00795	164.1
33	0.00708	206.9
34	0.00631	260.9
35	0.00562	329.4
36	0.00500	414.8

ภาคผนวก ก.

(กราฟคำนวณกระแสกระตุ้นและกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก)



Magnetization curves for U.S.S. Transformer Steel No. 58—29 gage.



Core loss and volt-ampere curves for U.S.S. Transformer Steel No. 58—29 gage.

ภาคผนวก ง.

(ข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้าในโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า)

ข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้า

kVA, 1 เฟส, Single Hertz, 50 แรงดัน, Volts, 220/ 30 กระแส Amperes, 4.545/ 0.333
ประเภท, Circular core

แกนเหล็ก

ขนาด:	
พื้นที่(sq.in.).....	3.446
เส้นผ่านศูนย์กลาง(in)...	2.267
ขนาด(in)....	0.985, 1.584, 2.04
น้ำหนัก(lb.).....	17.78
Core factor.....	0.95
แกนเหล็กด้านเข้าคู่(Yokes)	
พื้นที่ (sq.in).....	3.446
เส้นผ่านศูนย์กลาง(in).....	2.267
ขนาด(in).....	0.985, 1.584, 2.04
น้ำหนัก(lb.).....	6.35
ขนาดหน้าต่าง(in).....	7.24*2.90

เปอร์เซ็นต์:

ค่าความต้านทาน.....	1.9	
ค่ารีแอกแตนซ์.....	0.89	
ค่าอิมพีแดนซ์.....	2.1	
ตัวประกอบกำลัง.....	80	100
เรกูเลชั่น.....	2.03	1.87

กำลังงานสูญเสีย:

กำลังงานสูญเสียรวม.....	29
กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก.....	10
กำลังงานสูญเสียในขดลวดรวม.....	19

เปอร์เซ็นต์:

โหลด	25	50	75	100
ประสิทธิภาพ (PF1.0)	95.7	97.1	97.3	97.2

แกนเหล็กและขดลวด

ระยะทางเดินฟลักซ์เฉลี่ย(in).....	22.7	กระแสกระตุ้น	
แอมแปร์-รอบ.....	1836	แอมแปร์.....	0.295
กระแสแม่เหล็ก.....	0.29	เปอร์เซ็นต์.....	6.49
กระแสเนื่องงานกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก.....	0.05		

ขดลวด

แรงดันสูง

แรงดันต่ำ

ประเภทการพันขดลวด.....	Helical	Helical
หน้า:		
พื้นที่(sq.in).....	0.0005	0.00664
เส้นผ่านศูนย์กลาง(in).....	0.0253	0.092
ความหนาแน่นกระแส(A./sq.in).....	661	684
รอบการพันรวม.....	5504	404
จำนวนแกนขดลวด.....	2	2
รอบ:		
ต่อแกนขดลวด.....	2752	202
ต่อชั้นต่อแกนขดลวด.....	230	72
จำนวนชั้น.....	12	3
การจนวน		
ชั้น(in).....	0.004	0.004
แกนเหล็กและขดลวด(in).....	0.00371	0.00371
HV. และ LV(in).....	0.004	0.004
แรงดันต่อรอบ.....	0.545	0.545
ความยาวของเส้นลวดทองแดงต่อรอบ(in).....	14.6	10.5
ความยาวรวมของลวดทองแดง(fl.).....	6684	353
เส้นลวดทองแดง:		
น้ำหนัก(lb.).....	13	8.8
ค่าความต้านทานที่ 75 °C.....	83.2	0.479
แรงดันตก IR.....	27.7	2.177
กำลังงานสูญเสียในขดลวดที่โหลดปกติ.....	9.22	9.89

Note: หน่วยอังกฤษ

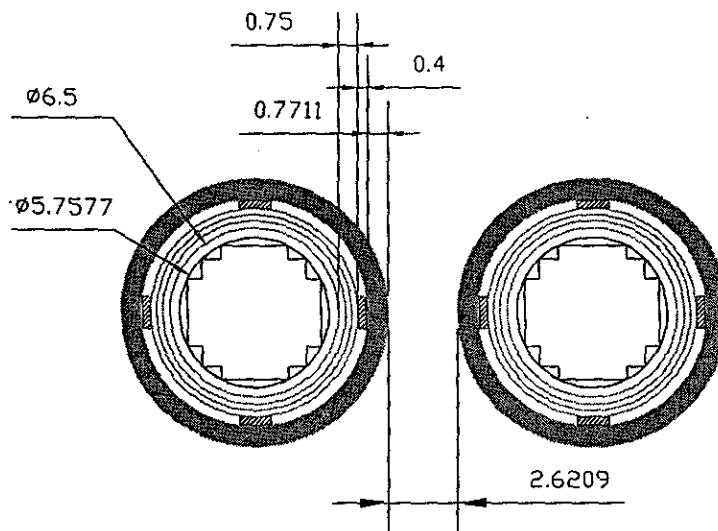
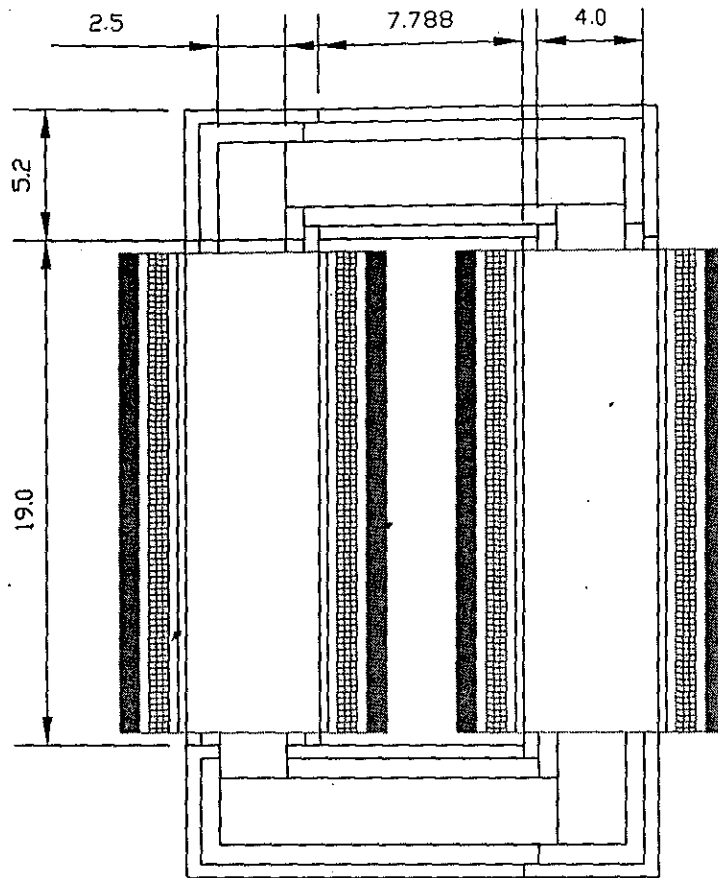


Fig. 11.

Transformer structure data

kVA, 1 Phase, Single Hertz, 50

Volts HV., 3000 LV., 220

Type, 2step cruciforms

Line Amperes HV., 0.333 LV., 4.545

ประวัติผู้ทำโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า

ปฎิวัติ หัยเจริญลักษณ์ เกิดเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2520 มีภูมิลำเนาอยู่ที่ อำเภอเมือง จังหวัดพิจิตร มีประวัติการศึกษาโดยสังเขปดังนี้

- พ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษา จากโรงเรียนลาซาลโชติรวี อ. เมือง จ. นครสวรรค์
- พ.ศ. 2536 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนลาซาลโชติรวี อ. เมือง จ. นครสวรรค์
- พ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนมัธยมวัดเบญจมบพิตร เขต ดุสิต

กรุงเทพมหานคร

- พ.ศ. 2537 - ปัจจุบัน กำลังศึกษาในระดับอุดมศึกษา ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา
- ปัจจุบัน เป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

ประวัติผู้ทำโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า

ไพศาล สุดวิลัย เกิดเมื่อวันที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2518 มีภูมิลำเนาอยู่ที่อำเภอประโคนชัยจังหวัดบุรีรัมย์ มีประวัติการศึกษาโดยสังเขปดังนี้

- พ.ศ. 2531 สำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษา จากโรงเรียนบ้านหนองเอี่ยน อ. ประโคนชัย จ. บุรีรัมย์
- พ.ศ. 2534 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนพลับพลาชัยพิทยาคม (สหมิตรพิทยาคม)

อ.พลับพลาชัย จ. บุรีรัมย์

- พ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนประโคนชัยพิทยาคม อ. ประโคนชัย จ. บุรีรัมย์

- พ.ศ. 2537 - ปัจจุบัน กำลังศึกษาในระดับอุดมศึกษา ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

- ปัจจุบัน เป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

