

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 200 kV 20 kVA

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A TESTING TRANSFORMER 200 kV 20 kVA



T144664

โดย

นายวราร

ชลปฐมพิกุลเลิศ

นายศาควัต

เสถียรสามัคคี

นายอริศ

เลาหวัณเสรี

นายอนรรฆ

คำบา

เลขหมู่ 296 17  
2508  
เลขทะเบียน 144664

เลขทะเบียน 144664

วัน,เดือน,ปี 2.9.11. 2559

b. 12821603

i. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A TESTING TRANSFORMER  
20kVA 200kV



Mr. Warakorn Chonpathomphikunloed  
Mr. Sasawat Sathainsamakee  
Mr. Atit Laowhawatanasaseree  
Mr. Anuk Kumba

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE  
BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2558

การออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบ 20kVA 200kV  
DESIGN AND CONSTRUCTION OF A TESTING TRANSFORMER 20kVA 200kV



โดย

นายวรากร

ชลปฐมพิกุลเลิศ

นายศาศวัต

เสถียรสามัคคี

นายอริศ

เลาหวิฒนเสรี

นายอนรรฆ

คำบา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.พีรวุฒิ

ยุทธโกวิท

รศ.ศิริวัฒน์

โพธิเวชกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบ 20kVA 200kV

ผู้จัดทำ

- 
1. นายวรากร ชลปฐมพิกุลเลิศ
  2. นายศาศวัต เสถียรสามัคคี
  3. นายอธิศ เลาหัตถนเสรี
  4. นายอนรรฆ คำบา

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรฤทธิ ยุทธโกวิท)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 200 kV 20 kVA

นาย วรากร ชลปฐมพิกุลเลิศ

นาย ศาสวัต เสถียรสามัคคี

นาย อธิศ เลหาวัฒน์เสรี

นาย อนรรฆ คำบา

ผศ.ดร. พีรวุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2558

### บทคัดย่อ

โครงการฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและการสร้างหม้อแปลงทดสอบแบบจุ่มน้ำมันขนาด 20 kVA 200 kV ถูกวิเคราะห์โดยโปรแกรมไฟไนลิเมนต์เพื่อดูการกระจายและความเครียดสนามไฟฟ้าในแต่ละจุดของหม้อแปลงทดสอบ ซึ่งหม้อแปลงทดสอบด้านแรงสูงมี 2 ระดับแรงดันคือ 100 kV ต่ออนุกรมและ 200 kV ต่อขนานที่ด้านขั้วแรงต่ำ หม้อแปลงทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด IEC 60076 เช่น การวัดความต้านทานฉนวน, การทดสอบขั้วและอัตราส่วนแรงดันของขดลวด, การวัดค่าสูญเสียกำลังไฟฟ้ามีโหลดและไม่มีโหลด, การทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำที่พิกัด 200 kV และการทดสอบวาบไฟตามผิวขนาด 100 kV ของฉนวนลูกถ้วยไฟฟ้า โดยหม้อแปลงผ่านการทดสอบและปราศจากการเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้า การออกแบบและสร้างหม้อแปลงจัดทำขึ้นซึ่งมีจุดประสงค์นำไปใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการทดสอบวาบไฟตามผิวแรงดันขนาด 100 kV และการทดสอบความคงทนต่อแรงดันขนาด 200 kV

## Design and construct the testing transformer 200 kV 20kVA

Mr. Warakorn	Chonpathomphikunloed
Mr. Sasawat	Sathainsamakee
Mr. Atit	Laowhawatanasaseree
Mr. Anuk	Kumba
Asst.Prof.Dr.Peerawut	Yuttagowit Advisor
Assoc.Prof.Siriwat	Potivejkul Advisor

### ABSTRACT

This project presents design and construction of a 20-kVA 200-kV oil-immersed testing transformer. The electric field stress of the testing transformer calculated by the finite element method (FEM) was employed in design. There are two options in low voltage winding connections. One is that two low voltage winding is connected in parallel and the voltage of the high voltage winding can increase upto 200 kV. The other is that two low voltage winding is connected in series and the voltage of the high voltage winding can increase upto 100 kV. The transformer was tested according to the IEC 60076 in the following topics, i.e. winding resistance measurement, turn ratio measurement, load loss test, no-load loss test, induced voltage test at the rating voltage of 200 kV, flashover test on an insulator at the voltage of about 100 kV, and so on. The transformer can pass all tests without damage. It can be concluded that the developed transformer can be used as the testing transformer in the high-voltage laboratory, KMITL for flashover test upto the voltage of 100 kV and withstand voltage test upto the voltage of 200 kV.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงด้วยดี เนื่องด้วยคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมืออย่างดียิ่งจากหลายๆ ฝ่าย

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ผศ.ดร.พีรวิทย์ ยุทธโกวิท, รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำโครงการ ด้วยดีมาโดยตลอด นอกจากนี้ยังสนับสนุนทางด้านค่าใช้จ่ายในการจัดซื้ออุปกรณ์ในการทำโครงการอีกด้วย

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.นรเศรษฐ วัฒนเดช ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะ แนะนำข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา

ขอขอบคุณ คุณศักดิ์ดา มณีโรจน์ กรรมการผู้จัดการบริษัท Lamool Transformer Co.,Ltd ที่ให้คำชี้แนะในการออกแบบหม้อแปลงทดสอบและข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์ รวมไปถึงการช่วยติดต่อขอความร่วมมือไปทางบริษัท Lamool Transformer Co.,Ltd เพื่อนำข้อมูลการออกแบบหม้อแปลงทดสอบที่เสร็จเรียบร้อยแล้วไปประกอบสร้างที่บริษัท

ขอขอบคุณ คุณปยุณวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ รวมไปถึงการตรวจสอบแก้ไขปริญญาานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณพี่ๆในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน โดยเฉพาะนายณัฐพล มฤคทัต ให้คำแนะนำในการจัดทำปริญญาานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคนที่ช่วยกันดูแลห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงิน และเป็นกำลังใจในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 นิยามหม้อแปลงทดสอบ	5
2.1.1 ขนาดแรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ	6
2.1.2 พิกัดกระแสของหม้อแปลงทดสอบ	6
2.1.3 ขนาดกำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ	7
2.1.4 แรงดันและกำลังไฟฟ้าลัดวงจร	9
2.1.5 ขนาดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด	13
2.1.6 ขนาดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดและน้ำหนักของขดลวด	14
2.1.7 คุณลักษณะทางความร้อนของหม้อแปลง	16
2.1.8 การคำนวณหาค่าอินดักแตนซ์ของหม้อแปลงทดสอบ	16
2.2 โครงสร้างและการฉนวนหม้อแปลงทดสอบ	16
2.2.1 น้ำมันหม้อแปลง	18
2.2.2 กระดาษฉนวน	20

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.3 เส้นลวดอาบน้ำยาฉนวน	20
2.2.4 ปลอกฉนวนนำสาย	20
2.2.5 ตัวถัง	21
2.2.6 แกนเหล็ก	21
2.3 แรงดันกระจายของขดลวด	21
<b>บทที่ 3 การออกแบบสร้างชิ้นงาน</b>	<b>23</b>
3.1 การออกแบบแกนเหล็ก	23
3.2 การออกแบบขดลวด	30
3.2.1 การออกแบบขดลวดแรงต่ำ	30
3.2.2 การออกแบบขดลวดแรงสูง	35
3.3 การออกแบบแคลมป์ยึดแกนเหล็ก	39
3.4 การออกแบบตัวถัง	40
3.5 การคำนวณปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง	41
3.6 การคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร	42
3.7 กำลังไฟฟ้าลัดวงจร	42
3.8 การประกอบสร้าง	43
3.8.1 แกนเหล็ก	43
3.8.2 การพันขดลวดแรงต่ำ	44
3.8.3 การพันขดลวดแรงสูง	47
3.8.4 การสวมขดลวดลงแกนเหล็ก	48
3.8.5 การต่อขั้วสาย	49
3.8.6 ประกอบตัวถัง ปิดฝาและเติมน้ำมัน	51
<b>บทที่ 4 การทดสอบ</b>	<b>52</b>
4.1 การวัดค่าความต้านทานฉนวน	52
4.2 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนแรงดัน	53
4.3 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด	54

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะลัดวงจร	55
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	56
5.1 สรุป	56
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	57
เอกสารอ้างอิง	58
ภาคผนวก	59
ภาคผนวก ก บทความวิชาการ	60
ภาคผนวก ข รายละเอียดอุปกรณ์	65
ประวัติผู้เขียน	81

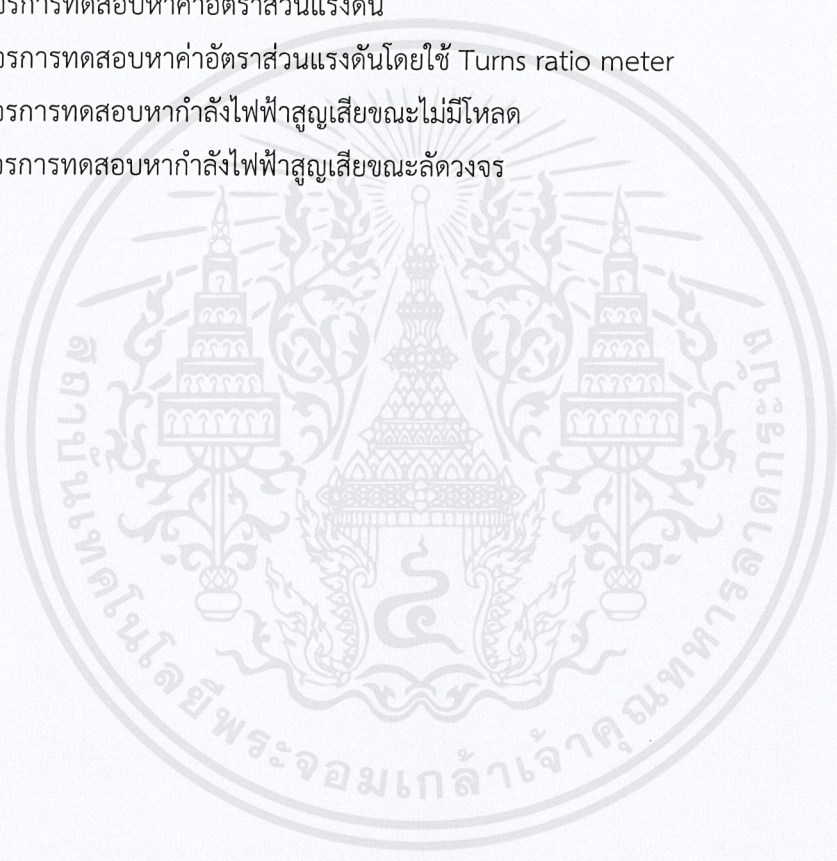


## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า	4
2.2 วงจรทดสอบแรงดันกระแสสลับ	7
2.3 วงจรสมมูลของหม้อแปลงทดสอบแบบไม่คิดกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	9
2.4 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงทดสอบ	10
2.5 หม้อแปลงแบบหุ้มด้วยฉนวนแห้ง	17
2.6 หม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน	18
3.1 ภาพตัดขวางพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก	27
3.2 การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดแผ่นเหล็ก	28
3.3 ขนาดของแกนเหล็ก	28
3.4 ภาพตัดขวางของขดลวดแรงต่ำ	31
3.5 ภาพตัดขดลวดแรงสูง	35
3.6 ตำแหน่งการพันของขดลวดแรงสูง	36
3.7 ภาพตัดของขดลวดตามแนวขวางแกนเหล็ก	39
3.8 แคลมป์ยึดแกนเหล็ก	40
3.9 ตัวถังโลหะ	40
3.10 ฝาถังโลหะ	41
3.11 เหล็กม้วน M-4 หนา 0.27 mm	43
3.12 ขั้นตอนการตัดเหล็ก	43
3.13 เหล็กแผ่นที่ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว	43
3.14 แคลมป์ที่ยึดกับแกนเหล็ก	44
3.15 mandrel ของขดลวดแรงต่ำ	44
3.16 พันผ้าดิบรอบขดลวดแรงต่ำ	45
3.17 ขั้นตอนการพันขดลวดแรงต่ำ	45
3.18 กระดาษฉนวนที่พันทับ mandrel	47
3.19 การพันขดลวดแรงสูง	47
3.20 ขดลวดแรงสูง 1 ชุด	47
3.21 สวมขดลวดแรงต่ำลงแกนเหล็ก	48
3.22 สวมขดลวดแรงสูงครอบขดลวดแรงต่ำ	49
3.23 เรียงแกนเหล็กปิดด้านบน	49
3.24 ขั้วสายด้านแรงต่ำ	49
3.25 ขั้วสายด้านแรงสูง	50

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.26	ไส้หม้อแปลง	50
3.27	ตู้หม้อแปลง	50
3.28	นำไส้ใส่ตัวถังโลหะ	51
3.29	นำหม้อแปลงเข้าห้องสุญญากาศและเติมน้ำมัน	51
3.30	หม้อแปลงที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว	51
4.1	วงจรการทดสอบความต้านทานฉนวนระหว่างขั้วแรงต่ำกับขั้วแรงสูง	52
4.2	วงจรการทดสอบหาค่าอัตราส่วนแรงดัน	53
4.3	วงจรการทดสอบหาค่าอัตราส่วนแรงดันโดยใช้ Turns ratio meter	54
4.4	วงจรการทดสอบหาค่าลิ่งไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด	55
4.5	วงจรการทดสอบหาค่าลิ่งไฟฟ้าสูญเสียขณะลัดวงจร	55



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินโครงการ	3
2.1 กระแสสูงสุดที่ใช้ทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำ	7
2.2 ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า	9
2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันหม้อแปลง	19
2.4 คุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันหม้อแปลง	19
3.1 สรุปลักษณะของแกนเหล็ก	30
3.2 สรุปลักษณะของขดลวดแรงต่ำ	34
3.3 สรุปลักษณะของขดลวดแรงสูง	38
4.1 การวัดค่าความต้านทานฉนวน	52
4.2 ผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด	55
4.3 ผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะลัดวงจร	55
5.1 ค่ากำหนดหม้อแปลง	56
5.2 ผลของการทดสอบ	56

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการทดสอบวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ทางไฟฟ้าแรงสูง ภายในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีการทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ โดยหม้อแปลงทดสอบ เช่น ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า หม้อแปลงวัดกระแส และหม้อแปลงวัดแรงดัน ซึ่งหม้อแปลงทดสอบที่มีอยู่ไม่สามารถทดสอบวาวไฟตามผิวได้ตามจุดประสงค์การทดสอบ ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบที่มีคุณสมบัติตามต้องการ

หม้อแปลงทดสอบที่สร้างขึ้นเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการจ่ายแรงดันทดสอบกระแสสลับความถี่พลังงาน เพื่อใช้ในการทดสอบวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ทางไฟฟ้าแรงสูง โดยวัสดุและอุปกรณ์เหล่านี้จะต้องได้รับการทดสอบคุณสมบัติให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60076 - 1 , IEC 60076 - 2 และ IEC 60076 - 3 ดังนั้นหม้อแปลงทดสอบจึงมีความสำคัญในการศึกษาวิจัยด้านไฟฟ้าแรงสูง รวมถึงการแก้ปัญหาและพัฒนาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูง จึงนับว่าหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญยิ่ง

ในปริญญานิพนธ์นี้ได้มีการออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 200 kV 20 kVA ซึ่งได้รับความร่วมมือจากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ บริษัท Lamool Transformer Co., Ltd โดยจะนำหม้อแปลงทดสอบดังกล่าว มาทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 200 kV 20 kVA
- 2) เพื่อรองรับการทดสอบด้านไฟฟ้าแรงสูง
- 3) เพื่อเพิ่มศักยภาพการทดสอบของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 4) ส่งเสริมการวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

- 1) ทำการออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงขนาด 200kV 20kVA โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 60076 , IEC 60296 และ IEC 60060
- 2) ใช้โปรแกรมไฟไนลิเมนต์ในการวิเคราะห์การกระจายและความเครียดของสนามไฟฟ้าในแต่ละจุดของหม้อแปลงทดสอบ
- 3) ทำการทดสอบการใช้หม้อแปลงตามมาตรฐานข้างต้น

### 1.4 วิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับหม้อแปลงทดสอบแบบใช้น้ำมันเป็นฉนวนและหม้อแปลงชนิดถังโลหะ
- 2) ศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคของฉนวน คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง แรงดันกระจายของขดลวด
- 3) ออกแบบแกนเหล็ก ขดลวดพร้อมฉนวนและตัวถังของหม้อแปลงทดสอบขนาด 200kV 20kVA
- 4) ประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบที่ได้ออกแบบไว้ในข้อที่ 3 ที่บริษัท Lamool Engineering Co., Ltd.
- 5) ทดสอบคุณสมบัติการใช้งานตามมาตรฐาน IEC 60076 , IEC 60296 และ IEC 60060
- 6) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- 7) จัดทำปริญญานิพนธ์ ฉบับสมบูรณ์

## 1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2558											
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	ก.ค.	
1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	←-----→											
2. การออกแบบหม้อแปลงทดสอบ		←-----→										
3. การประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบ				←-----→					←-----→			
4. การทดสอบหม้อแปลงทดสอบ							←-----→					
5. สรุปผลการทำโครงการ									←-----→			
6. จัดทำปริญญานิพนธ์		←-----→						←-----→				

←-----→ การดำเนินงานที่กำหนดไว้

←-----→ การดำเนินงานจริง

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

- 1) ได้หม้อแปลงทดสอบ พิกัด 200 KV 20 KVA เพื่อนำมาใช้ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2) นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์และนักวิจัย สามารถที่จะศึกษาและทำการวิจัยเกี่ยวกับปรากฏการณ์ไฟฟ้าแรงสูงเพื่อทำให้เกิดองค์ความรู้ที่แท้จริง
- 3) เพิ่มศักยภาพในการทดสอบของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

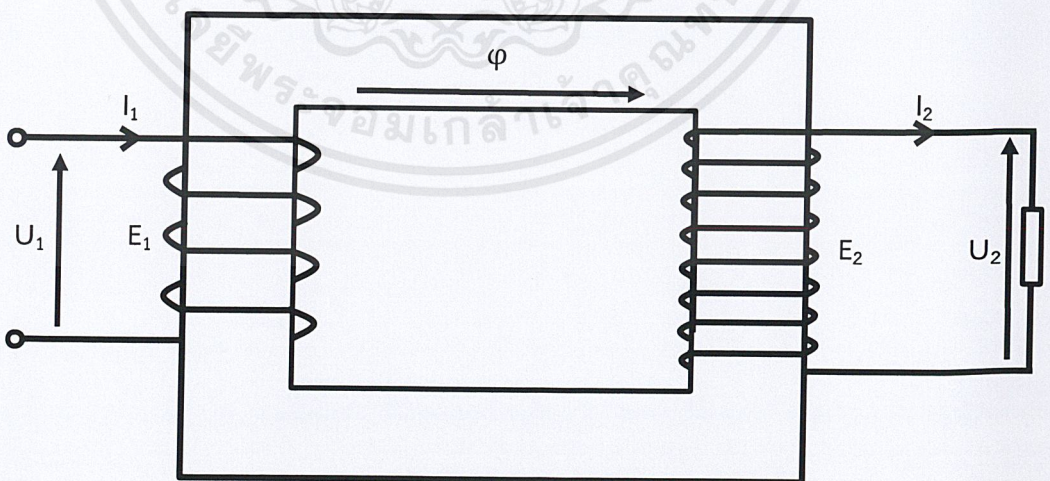
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแรงดันระดับหนึ่งไปยังแรงดันอีกระดับหนึ่ง อาจสูงขึ้นหรือต่ำลง หรือเท่าเดิมก็ได้ เช่น หม้อแปลงขดลวดแยก หลักการทำงานของหม้อแปลงอาศัยการเหนี่ยวนำของขดลวด ที่อยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลง ประกอบด้วย แกนเหล็ก เป็นทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็ก และมีขดลวดสองชุด ชุดหนึ่งเป็นด้านป้อนแรงดันเข้า อีกชุดหนึ่งเป็นด้านจ่ายแรงดันออก พันอยู่บนแกนเหล็ก ดังรูป นอกจากนี้แกนเหล็กและขดลวดแล้ว ก็มีฉนวนซึ่งถือเป็นส่วนประกอบสำคัญในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทุกชนิด [1]

โดยที่

$\varphi$	คือ	ฟลักซ์แม่เหล็ก (Wb)
$N_1$	คือ	จำนวนรอบขดลวดด้านป้อนเข้า (Turn)
$N_2$	คือ	จำนวนรอบขดลวดด้านจ่ายออก (Turn)
$U_1$	คือ	แรงดันที่ป้อนเข้า (V)
$U_2$	คือ	แรงดันที่จ่ายออก (V)
$E_1$	คือ	แรงดันที่เหนี่ยวนำด้านป้อนเข้า (V)
$E_2$	คือ	แรงดันที่เหนี่ยวนำด้านจ่ายออก (V)
$I_1$	คือ	กระแสด้านป้อนเข้า (A)
$I_2$	คือ	กระแสด้านจ่ายออก (A)



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำบนขดลวดเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์

$$e(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

เมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ให้กับขดลวดทางด้านกำลังไฟฟ้าเข้าทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กเป็นรูปคลื่นไซน์ด้วย

$$\phi(t) = \phi_{\max} \sin \omega t \quad (2.2)$$

ดังนั้นแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดอีกชุดหนึ่งในทางด้านจ่ายกำลังไฟฟ้าออกเปลี่ยนไปตามเวลา คือ

$$e(t) = -N\omega \phi_{\max} \cos \omega t \quad (2.3)$$

ซึ่งจะเห็นว่าได้แรงดันเหนี่ยวนำ  $e(t)$  นำหน้าเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก  $\phi(t)$  เป็นมุมทางไฟฟ้า  $90^\circ$  ( $\pi/2$ ) แรงดันเหนี่ยวนำค่า r.m.s. คือ

$$E = \frac{2}{\sqrt{2}} \pi f n \phi_{\max}$$

$$E = 4.44 \pi f n \phi_{\max} \quad (2.4)$$

โดย  $\phi_{\max} = B_{\max} A$  จะได้สมการพื้นฐานของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดของหม้อแปลงคือ

$$E = 4.44 \pi f n B_{\max} A \quad (2.5)$$

## 2.1 นิยามหม้อแปลงทดสอบ [2]

หม้อแปลงทดสอบเป็นหม้อแปลงที่ใช้สร้างแรงดันสูงสำหรับการทดสอบวัสดุฉนวนหรืออุปกรณ์ที่จะนำไปใช้ในระบบส่งจ่ายแรงสูง เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ที่ใช้ในงานด้านไฟฟ้าแรงสูง อุปกรณ์วัดแรงดันและกระแสที่ระดับแรงสูง วิจัยปัญหาความเปราะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวน วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิซซาร์จบางส่วนในวัสดุฉนวนก๊าซ ฉนวนเหลว และฉนวนแข็ง หรือผสมกัน แรงดันของหม้อแปลงทดสอบสามารถปรับแรงดันได้ตั้งแต่ค่าต่ำๆ ขึ้นไปจนถึงค่าที่ต้องการ หม้อแปลงทดสอบส่วนใหญ่จะเป็นหนึ่งเฟส มีกำลังไฟฟ้าต่ำเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง แต่มีแรงดันสูง แรงดันทางด้านจ่ายออกสามารถปรับโดยปรับแรงดันทางด้านแรงดันต่ำ ด้วยหม้อแปลงปรับแรงดัน (regulator) หม้อแปลงทดสอบจะกำหนดด้วย

### 2.1.1 ขนาดแรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

การกำหนดขนาดแรงดันของหม้อแปลงทดสอบ ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบสูงสุดที่มีโอกาสจะใช้ อย่างน้อยที่สุดจะต้องสูงกว่าค่าแรงดันคงทนอยู่ได้ของวัสดุทดสอบ ที่ใช้กับระบบแรงดันที่กำหนดให้ ในกรณีที่ต้องการทดสอบให้เกิดความไปตตามผิว เกิดเบรกดาวนหรือเจาะทะลุผ่าน แรงดันที่ใช้ทดสอบจะต้องสูงมากขึ้น ให้เพียงพอที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์นั้นและเมื่อคำนึงถึงประสิทธิภาพและอายุการใช้งาน แรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบควรจะสูงกว่าแรงดันทดสอบประมาณ 10-20%

ทางด้านแรงดันป้อนเข้าของหม้อแปลงทดสอบด้านแรงดันต่ำ ควรเลือกกำหนดตามระบบแรงดันที่มีให้ เช่น 220 , 380 หรือ 500 V ในกรณีที่หม้อแปลงทดสอบมีกำลังสูงๆ เช่น 500 kVA ขึ้นไป แรงดันป้อนเข้าอาจสูงถึง 2,000 หรือ 3,000 V

รูปคลื่นแรงดันทดสอบกระแสสลับที่เปลี่ยนไปตามเวลา  $U(t)$  อาจแตกต่างไปจากรูปคลื่นไซน์ได้ ฉะนั้นลักษณะของแรงดันทดสอบอาจอธิบายได้ด้วยค่ายอด และค่า r.m.s. ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.6

$$U_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (2.6)$$

โดยที่  $T$  คือ เวลาช่วงคาบของแรงดัน (s)

รูปคลื่นแรงดันนี้อาจแตกต่างไปจากรูปคลื่นไซน์ได้ไม่เกิน 5% ของค่ายอดรูปคลื่นพื้นฐาน

### 2.1.2 พิกัดกระแสของหม้อแปลงทดสอบ

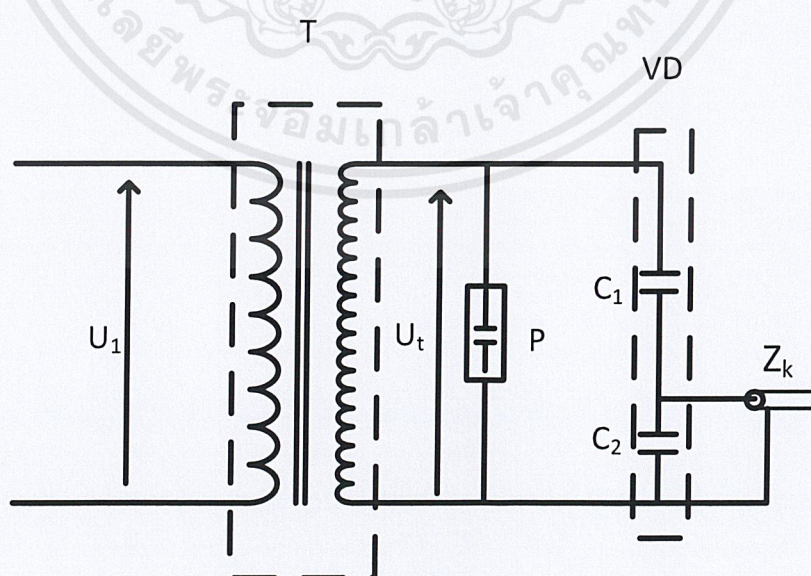
พิกัดกระแสของหม้อแปลงทดสอบ ขึ้นอยู่กับวัสดุทดสอบ กล่าวคือ วัสดุทดสอบบางชนิดใช้กระแสมาก บางชนิดใช้กระแสน้อย ฉะนั้นหม้อแปลงทดสอบจะต้องสามารถจ่ายกระแสให้กับวัสดุทดสอบได้ ตัวอย่างกระแสสูงสุดที่ใช้ทดสอบแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กระแสสูงสุดที่ใช้ทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำ

วัสดุทดสอบ	กระแสที่ต้องการใช้ทดสอบ
ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า (insulators) ปลอกฉนวนตัวนำ (bushing) หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับมิเตอร์ (Current Transformer, Potential Transformer) เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker)	0.1 ถึง 0.5 A
หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer) ตัวเก็บประจุ (Capacitor)	0.5 ถึง 1 A
สายเคเบิล (Cable)	1 A หรือมากกว่า

### 2.1.3 ขนาดกำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุหรืออุปกรณ์ จะต้องทดสอบโดยการติดตั้งให้เหมือนกับสภาพการใช้งานจริง แรงดันควรเป็นรูปคลื่นไซน์ อุปกรณ์หรือวัสดุฉนวนทางด้านไฟฟ้าแรงสูงนั้นจะถือว่าเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า ดังนั้นภาระทางไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบจึงเป็นตัวเก็บประจุ หากการฉนวนไม่ดีพอไม่ทนต่อแรงดันไฟฟ้าก็จะเกิดการเบรกดาวน์ สปาร์กเจาะทะลุ ลัดวงจร กระแสลัดวงจรจะต้องสูงมากพอเพื่อให้เห็นความบกพร่องของการฉนวนได้ชัดเจน แต่กำลังไฟฟาลัดวงจรไม่ควรสูงมากเกินไป เพราะจะทำให้เกิดการระเบิดได้ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบและกำลังไฟฟาลัดวงจรต้องสอดคล้องกัน กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงอาจหาได้จากวงจรดังรูป



รูปที่ 2.2 วงจรทดสอบแรงดันกระแสลัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	T	คือ	หม้อแปลงทดสอบ
	P	คือ	วัสดุทดสอบ
	C <sub>1</sub>	คือ	ตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง
	C <sub>2</sub>	คือ	ตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำ
	VD	คือ	โวลเตจดีไวเดอร์
	Z <sub>k</sub>	คือ	สายเคเบิล

ความจุทางไฟฟ้าหรือค่าเก็บประจุ ที่เป็นภาระไฟฟ้าของหม้อแปลง ประกอบด้วยความจุทางไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ อุปกรณ์วัด รวมทั้งค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ ดังในรูป 2.2 ฉะนั้นกำลังไฟฟ้าที่จำเป็นต้องใช้ในการทดสอบสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$S_t = \omega C U_t^2 \quad (2.7)$$

$$= 2\pi f C U_t^2 \times 10^{-9} \quad \text{kVA}$$

โดยที่	C	คือ	ค่าความจุไฟฟ้ารวม (pF)
	U <sub>t</sub>	คือ	แรงดันทดสอบ (kV <sub>rms</sub> )
	f	คือ	ความถี่ของแรงดันไฟฟ้า (Hz)

กำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ ควรจะมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องป้อนให้กับโหลด คือควรจะต้องคำนึงถึงแพกเตจ์ปลอดภัยด้วย เพื่อให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงทดสอบสามารถใช้ได้นาน ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบอาจประมาณได้ดังตารางที่ 2.2

นอกจากนี้ ถ้ามีความจุไฟฟ้าอื่นต่ออยู่ในวงจรทางด้านแรงสูง ก็ถือเป็นโหลดของหม้อแปลงทดสอบ ต้องนำมาคิดรวมด้วย เช่น ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว ที่ใช้วัดในกรณีดิสชาร์จบางส่วน ปกติมีค่า 1000 pF ตัวเก็บประจุของอุปกรณ์วัดแรงดัน โหลดของหม้อแปลงที่เป็นโอห์มความต้านทานก็มี เช่น การทดสอบสภาพเปอร์อะบิออน จะมีกระแสกำลังไหลในช่วงสั้น 2-3 วินาที

ตารางที่ 2.2 ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า

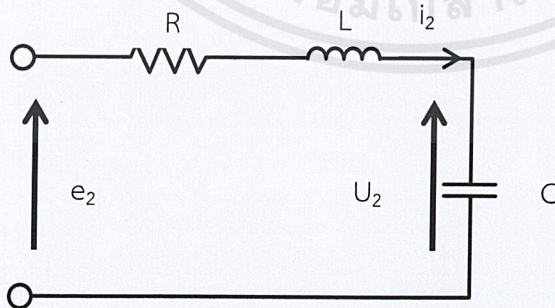
วัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า	ค่าความจุไฟฟ้า
-ลูกถ้วยธรรมดา	10-100
-ปลอกฉนวนตัวนำ	150-400
-หม้อแปลงกระแส	200-600
-เคเบิลแรงสูง (ต่อความยาว 1 เมตร)	150-300
-หม้อแปลงไฟฟ้า 1 MVA	ประมาณ 1,000
100 MVA	ประมาณ 10,000
-อุปกรณ์วัดแรงดัน (voltage divider)	50-500
-สายต่อวงจรแรงสูง (ต่อเมตร)	5-15

ในกรณีที่ไมทราบค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ การกำหนดกำลังของหม้อแปลงทดสอบ อาจคำนวณได้จากผลคูณของแรงดันของหม้อแปลงทดสอบกับกระแสทดสอบสูงสุดตามตารางที่ 2.1

การกำหนดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบนอกจากกำหนดค่าแรงดัน และกระแสสูงสุดแล้ว ยังต้องคำนึงถึงช่วงเวลาทดสอบด้วย แรงดันทดสอบกระแสสลับความถี่ต่ำ อาจจะทดสอบนาน 1 นาที หรือหลายๆนาที เป็นชั่วโมง หรือเป็นวันก็ได้ เช่นการทดสอบต่อเนื่องตาม มาตรฐาน VDE จะทดสอบแรงดัน  $1.3U_n$  เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เมื่อ  $U_n$  คือแรงดันที่กำหนดของวัสดุทดสอบ

#### 2.1.4 แรงดันและกำลังไฟฟ้าลัดวงจร [4]

เมื่อทำการทดสอบจนเกิดเบรกดาวน์หรือเกิดวาบไฟตามผิวของวัสดุทดสอบ แรงดันจ่ายออกของหม้อแปลงทดสอบจะลดลงจนเหลือเท่ากับแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงซึ่งพิจารณาได้จากวงจรสมมูลดังรูปที่ และเฟสเซอร์ไดอะแกรมดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของหม้อแปลงทดสอบแบบไม่คิดกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก

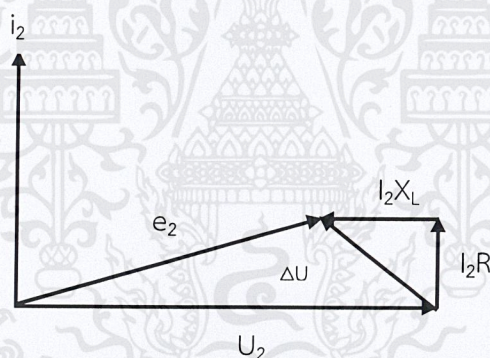
$$R = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.8)$$

$$L = L_2 + \frac{L_1}{a^2} \quad (2.9)$$

$$a = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.10)$$

$$Z = R + jX_L \quad (2.11)$$

โดยที่	$e_2$	คือ	แรงดันเหนี่ยวนำด้านจ่ายออก (V)
	$U_2$	คือ	แรงดันจ่ายออก (V)
	$R$	คือ	ความต้านทานของหม้อแปลง ( $\Omega$ )
	$L$	คือ	ตัวเหนี่ยวนำของหม้อแปลง (H)
	$C$	คือ	ความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ (F)



รูปที่ 2.4 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงทดสอบ

แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์หาได้จากสมการ

$$\Delta U = R + \frac{R_1}{a^2} \quad (2.12)$$

แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ที่กระแสกำหนด  $I_{2n}$  หาได้จากสมการ

$$\Delta U_n = \sqrt{(I_{2n}R)^2 + (I_{2n}X_L)^2} = I_{2n}Z \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันลัดวงจรหรือแรงดันอิมพีแดนซ์

$$\varepsilon_{sc} = \frac{\Delta U}{U_{2n}} = \sqrt{\varepsilon_R^2 + \varepsilon_X^2} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $\varepsilon_R$  คือ แรงดันตกคร่อมความต้านทาน (V)

$\varepsilon_X$  คือ แรงดันรีแอกแตนซ์ (V)

กำลังไฟฟ้าลัดวงจรจะมีค่าเป็น

$$\varepsilon_{sc} = \frac{U_{2n}^2}{Z} \quad (2.15)$$

เมื่อหม้อแปลงรับภาระเต็มทีที่กำหนด ( $S = S_n$ ,  $U_2 = U_{2n}$ ) แล้วเกิดการลัดวงจรที่วัสดุทดสอบกำลังไฟฟ้าลัดวงจร ( $S_{sc}$ ) หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} S_{sc} &= \frac{U_2^2}{Z} \\ &= \frac{U_2^2 \times I_{2n}}{\Delta U_n} \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} S_{sc} &= \frac{I_{2n} \times 100}{\varepsilon_{sc}} \\ &= \frac{S_n}{\varepsilon_{sc}} \end{aligned} \quad (2.17)$$

โดยทั่วไปแรงดันลัดวงจรจะกำหนดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าลัดวงจรสามารถคำนวณได้ดังสมการ

โดยที่  $S_{sc}$  คือ กำลังไฟฟ้าลัดวงจรของหม้อแปลงทดสอบ (VA)

$S_n$  คือ กำลังไฟฟ้ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบ (VA)

$\varepsilon_{sc}$  คือ เปอร์เซ็นต์แรงดันลัดวงจร (%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการข้างต้นจะพบว่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรจะแปรผกผันกับแรงดันลัดวงจร ดังนั้นแรงดันลัดวงจร ( $\mathcal{E}_{sc}$ ) จึงไม่ควรมามีค่าต่ำเกินไปเพราะจะทำให้กำลังไฟฟ้าลัดวงจรและกระแสลัดวงจรมีค่าสูงเกินไป เป็ยอันตรายต่อตัวหม้อแปลงทดสอบ

อย่างไรก็ตามแรงดันลัดวงจรก็ไม่ควรมีค่าสูงเกินไปเพื่อป้องกันการเกิดแรงดันเกินและการเกิดเรโซแนนซ์ เนื่องจากโหลดส่วนมากของหม้อแปลงทดสอบจะเป็นแบบตัวเก็บประจุ เมื่อกำหนดกระแส ( $I_n$ ) และแรงดันลัดวงจร ( $\mathcal{E}_{sc}$ ) มาให้ก็สามารถคำนวณกระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) ที่แรงดันที่กำหนด ( $U_n$ ) และกระแสเสิร์จไดนามิก ( $I_{dy}$ ) ซึ่งเป็นตัวบอกถึงขนาดของแรงระเบิดที่เกิดขึ้นกับขดลวดได้ ดังสมการ

$$I_{sc} = \frac{100I_{2n}}{\mathcal{E}_{sc}} \quad (2.18)$$

ในการใช้งานหม้อแปลงทดสอบในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง บางครั้งถ้าอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบไม่สามารถทนต่อแรงดันทดสอบก็จะเกิดการเสื่อมสภาพการเป็นฉนวนของแรงดันทดสอบสู่กราวด์อย่างรวดเร็ว ในสภาวะเช่นนี้เปรียบเสมือนว่าเกิดการลัดวงจรจากปลายขั้วของด้านแรงสูงสู่ดินกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในสภาวะเช่นนี้จะทำให้เกิดความเครียดของสภาพแรงทางกลอย่างมากกับขดลวดซึ่งหม้อแปลงทดสอบที่สร้างขึ้นนั้นจะต้องสามารถทนต่อแรงทางกลที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างได้โดยไม่ได้รับความเสียหายดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลงทดสอบจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องทราบค่ากระแสลัดวงจรเพื่อจะได้นำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างอาทิเช่นขดลวด แกนเหล็ก และการฉนวน

แรงดันลัดวงจรหรือแรงดันอิมพีแดนซ์มีค่าประมาณเท่ากับแรงดันรีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงที่จัดวางขดลวดแบบทรงกระบอกร่วมแกน หาได้จากสมการดังนี้

$$X = \frac{2\pi f \mu_0 N_2^2}{\mathcal{E}_{sc}} \left( \frac{t_1 l_1}{3} + t_g l_g + \frac{t_2 l_2}{3} \right) \quad (2.19)$$

โดยที่	X	คือ	ค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลง ( $\Omega$ )
	f	คือ	ความถี่ของแรงดันไฟฟ้า (Hz)
	$\mu_0$	คือ	ความซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ ( $4\pi \times 10^{-7}$ Wb/Am)
	$l_1$	คือ	ความยาวเฉลี่ยของขดลวดแรงดันต่ำ (m)
	$l_2$	คือ	ความยาวเฉลี่ยของขดลวดแรงดันสูง (m)
	$l_g$	คือ	ความยาวเฉลี่ยของช่องว่างระหว่างขดลวดแรงดันต่ำกับขดลวดแรงดันสูง (m)
	B	คือ	ความกว้างของขดลวด (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$t_1$  คือ ความหนาของขดลวดแรงดันต่ำ (m)

$t_2$  คือ ความหนาของขดลวดแรงดันสูง (m)

$t_g$  คือ ความหนาเฉลี่ยของช่องว่างระหว่างขดลวดแรงดันต่ำกับขดลวดแรงดันสูง (m)

จากสมการจะเห็นว่าค่ารีแอกแตนซ์ แปรผันตรงกับจำนวนรอบของขดลวด ความหนาของขดลวด ช่องว่างระหว่างขดลวด ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวด และช่องว่างระหว่างขดลวด แต่จะแปรผกผันกับความกว้างของขดลวด ดังนั้นการออกแบบให้รีแอกแตนซ์มีค่าน้อยทำได้โดยการออกแบบให้ มีค่าต่ำและให้มีค่าสูง

### 2.1.5 ขนาดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด

กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด หรือเรียกว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (Core losses) โดยไม่คิดกำลังสูญเสียในขดลวด (Copper loss)

$$P_o = K_p K_M P_{base} \Sigma (b_1 \times G_1) \quad (2.20)$$

โดยที่	$K_p$	คือ	ค่าคงที่ เท่ากับ 1.03
	$K_M$	คือ	ค่าคงที่ เท่ากับ 0.981
	$P_{base}$	คือ	กำลังฐาน
	$b_1$	คือ	L-corner เท่ากับ 0.98
	$G_1$	คือ	น้ำหนักของแกน

#### 1. ส่วนประกอบของกำลังสูญเสียแบบไร้ภาระ

##### 1.1 การสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริก (Dielectric losses)

โดยทั่วไปกระแสกระแสด้านของหม้อแปลงทดสอบมีค่าประมาณ 3-5% ของกระแสโหลดเต็ม (Full load current) ดังนั้นการสูญเสีย  $I^2R$  ในขดลวดเนื่องจากกระแสกระแสด้านจึงจำเป็นที่จะต้องนำมาพิจารณาด้วยแต่แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงจำหน่ายมีระดับต่ำ จึงทำให้การสูญเสียเนื่องมาจาก ไดอิเล็กตริกไม่ต้องนำมาพิจารณา ดังนั้นกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดจะประกอบด้วยการสูญเสียเนื่องจากและฮิสเทอรีซิส การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก และการสูญเสียในขดลวดแรงดันสูงโดยมีสมการในการคำนวณดังนี้

$$P_{O(RHV)} = I^2R \quad (2.21)$$

##### 1.2 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิสในแกนเหล็ก (Hysteresis loss component)

เป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในการกลับทิศทางแม่เหล็ก การลดการสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส สามารถทำได้โดยการใช้แกนเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิคอน การสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพหรือ

เกรดของแกนเหล็ก และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เลือกใช้ และเป็นสัดส่วนกับความถี่ของแรงดันไฟฟ้า สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_h = f a_1 B^{c_1} \Delta P_h(B) \quad (2.22)$$

$$\Delta P_h(B) = f a_2 (B - B_h)^{c_2} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $a_1$  เท่ากับ  $2.147 \times 10^{-3}$   
 $c_1$  เท่ากับ 2.079  
 $a_2$  เท่ากับ 2.793

### 1.3 การสูญเสียในแกนเหล็กเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (Eddy current loss component)

แกนเหล็กจะเป็นทั้งตัวนำไฟฟ้าและเป็นตัวนำเส้นแรงแม่เหล็กด้วย การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกนเหล็กเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก ทำให้เกิดการการไหลของกระแสในแกนเหล็กกระแสนี้เรียกว่ากระแสไหลวน ซึ่งจะให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและเกิดความร้อนขึ้นตามมา การลดความสูญเสียนี้สามารถทำได้โดยการใช้แผ่นเหล็กบาง ๆ มาประกอบกัน และแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นต้องถูกเคลือบด้วยฉนวน กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากกระแสไหลวนนั้นจะเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับกำลังสองของความหนาของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นและกำลังสองของความถี่แรงดันไฟฟ้าจะเป็นไปตามสมการ

$$P_e(B_u) = f^2 a_e B^2 \quad (2.24)$$

ดังนั้นในการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในหม้อแปลงขณะไม่มีโหลดนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการข้างต้น

#### 2.1.6 ขนาดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดและน้ำหนักของขดลวด

กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดในหม้อแปลงอาจเรียกว่าการสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper loss) เกิดขึ้นจากการไหลของกระแสขณะมีโหลดในขดลวดของหม้อแปลงซึ่งจะประกอบด้วย การสูญเสียจากส่วนต่าง ๆ ดังนี้

##### 1. กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะต่อโหลด

ความต้านทานของขดลวดสามารถคำนวณได้ตามการ

$$R = \frac{\rho LN}{a_w} \quad (2.25)$$

โดยที่  $\rho$  คือ ความต้านทานจำเพาะของตัวนำ มีค่าเท่ากับ  $2.78 \times 10^{-8}$  ที่ 75 องศาเซลเซียส  
 $L$  คือ ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวด (m)  
 $N$  คือ จำนวนรอบของขดลวด (turn)  
 $A_w$  คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ ( $m^2$ )

ดังนั้นเมื่อหาค่าความต้านทานของขดลวดแรงต่ำและขดแรงสูงได้ก็สามารถคำนวณหา  
 กำลังไฟฟ้าสูญเสีย หาได้จากสมการ

$$P_L = I_p^2 R_p + I_s^2 R_s \quad (2.26)$$

โดยที่  $I_p$  คือ กระแสของขดลวดแรงต่ำ (A)  
 $I_s$  คือ กระแสของขดลวดแรงสูง (A)  
 $R_p$  คือ ความต้านทานของขดลวดแรงต่ำ ( $\Omega$ )  
 $R_s$  คือ ความต้านทานของขดลวดแรงสูง ( $\Omega$ )

สำหรับการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวดและการสูญเสียปลั๊กย่อยสามารถหาได้  
 จากการปฏิบัติและทดลอง โดยกำหนดแฟคเตอร์ความสูญเสียในขดลวด ( $K_d$ ) มีค่าประมาณ 7% ของ  
 การสูญเสียในขดลวด ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดคำนวณได้ตามสมการ

$$W_L = P_L + K_d P_L \quad (2.27)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิที่ 75  
 องศาเซลเซียส

## 2. น้ำหนักของขดลวด

น้ำหนักของตัวนำที่ใช้เป็นวัสดุในการพันขดลวดขึ้นอยู่กับความถ่วงจำเพาะ (Specific  
 gravity) ของวัสดุตัวนำ จำนวนรอบขดลวดและพื้นที่หน้าตัดตัวนำสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$W_{cu} = D_w a_w LN \quad (2.28)$$

$D_w$  = ความหนาแน่นของวัสดุตัวนำโดยทองแดงโดยมีความหนาแน่นเท่ากับ  
 $8.92 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  ที่อุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.7 คุณลักษณะทางความร้อนของหม้อแปลง

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็กและขดลวดของหม้อแปลง เป็นสาเหตุทำให้เกิดความร้อนขึ้น และความร้อนต้องถูกระบายออกจากหม้อแปลง โดยมีอุณหภูมิที่ไม่ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพอุณหภูมิในหม้อแปลงนั้นมีผลต่อ kVA ที่กำหนด (Rate ,kVA) และอายุการใช้งานของหม้อแปลง

#### 1. มาตรฐานของอุณหภูมิ (Temperature standards)

ตามมาตรฐาน IEC 60296 [1] ได้กำหนดขีดจำกัดอุณหภูมิของหม้อแปลงน้ำมัน ระบายความร้อนด้วยวิธีธรรมชาติ และมีอุณหภูมิแวดล้อมสูงสุดเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส

#### 2. การถ่ายเทความร้อน (Mode of heat transfer)

ความร้อนในน้ำมันหม้อแปลงน้ำมันมีระบบถ่ายเทความร้อน 2 ขั้นตอน คือ

- 1) ระบบความร้อนของแกนเหล็กและขดลวดถ่ายเทสู่น้ำมัน
- 2) ระบบความร้อนของน้ำมันถ่ายเทสู่อากาศ

โดยความร้อนจะถูกถ่ายเทด้วยวิธีใด วิธีหนึ่งในสามวิธีนี้ คือ วิธีการนำความร้อน (conduction) การแผ่รังสีความร้อน (Conduction) วิธีการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) วิธีพาความร้อน (Convection)

### 2.1.8 การคำนวณค่าอินดักแตนซ์ของหม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบจะไม่พิจารณาค่ากระแสชั่วขณะเพราะในการกระตุ้นจะทำลักษณะค่อย ๆ เพิ่มแรงดันเข้าที่ขดลวดแรงดันต่ำ สำหรับหม้อแปลงทดสอบการคำนวณค่าอินดักแตนซ์ดังต่อไปนี้

$$L = \frac{X_{sc}}{2\pi f} \quad (2.29)$$

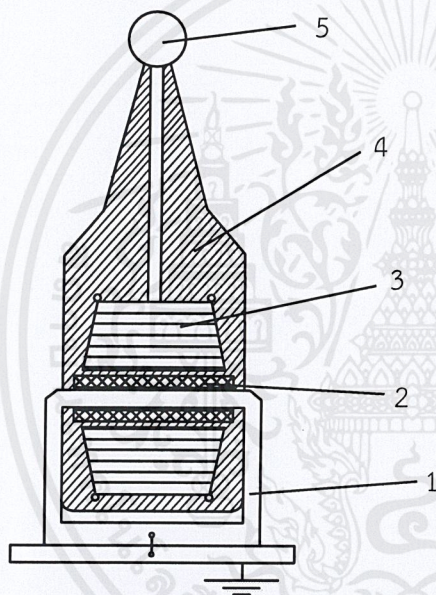
เมื่อ	L	คือ	ค่าอินดักแตนซ์ของหม้อแปลงทดสอบ (H)
	$X_{sc}$	คือ	ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวด ( $\Omega$ )
	f	คือ	ความถี่ของแรงดันไฟฟ้า (Hz)

## 2.2 โครงสร้างและการฉนวนหม้อแปลงทดสอบ [2]

หม้อแปลงทดสอบทั่วไปเป็นแบบเฟสเดียว ประกอบด้วยขดลวด 2 ขด คือ ขดป้อนแรงดันเข้า (ด้านแรงต่ำ) และขดจ่ายแรงดันออก (ด้านแรงสูง) ขดลวดทั้งสองจะพันอยู่บนแกนเหล็ก ดังที่กล่าวข้างต้นความสำคัญของหม้อแปลงทดสอบที่นอกเหนือไปจากหม้อแปลงธรรมดา คือ การฉนวนถ้าแรงดันไม่เกิน 100 kV การฉนวนอาจเป็นแบบแห้ง หรือหุ้มขดลวดและแกนเหล็กด้วยสารสังเคราะห์ได้ เช่น อีพ็อกซี หม้อแปลงที่มีแรงดันสูงขึ้น ขดลวดแต่ละขดรับแรงดัน 50 kV - 100 kV การฉนวนจะเป็นกระดาษฉนวนน้ำมัน แกนเหล็กและขดลวดจะจุ่มอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ที่บรรจุอยู่ใน

ถังโลหะหรือถังฉนวน ถ้าใช้ถังเหล็กจะมีข้อดีในเรื่องการระบายความร้อนเหมาะสำหรับหม้อแปลงที่ต้องใช้กระแสทดสอบ และกำลังไฟฟ้าสูง ๆ ถ้าตัวถังเป็นฉนวน เช่น เบกคาไลท์ หรืออีพ็อกซีเสริมใยแก้วการระบายความร้อนได้น้อยกว่าถังโลหะ แต่อาจสร้างตัวระบายความร้อน (radiator) ช่วยให้ความร้อนดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก และในขดลวด ความร้อนนี้แผ่กระจายออกผ่านน้ำมันที่สัมผัสกับขดลวดและแกนเหล็ก ถ้าความร้อนกระจายออกได้ไม่สะดวก ก็จะทำให้แกนเหล็กและขดลวดมีอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอุณหภูมิโดยรอบแต่อุณหภูมิที่ยอมให้เพิ่มขึ้นนี้มีขีดจำกัดด้วยวัสดุฉนวนที่ตามมาตราฐานสากล IEC และมาตรฐาน VDE ยอมให้อุณหภูมิมีค่าสูงต่อเนื่องไม่เกิน 105 °C เมื่อใช้น้ำมันหม้อแปลง และกระดาดเป็นวัสดุฉนวน

1. แบบหุ้มด้วยฉนวนแห้ง



1. แกนเหล็ก
2. ขดลวดแรงต่ำ
3. ขดลวดแรงสูง
4. ฉนวนแห้ง เช่น อีพ็อกซี
5. ปลายขั้วแรงสูง

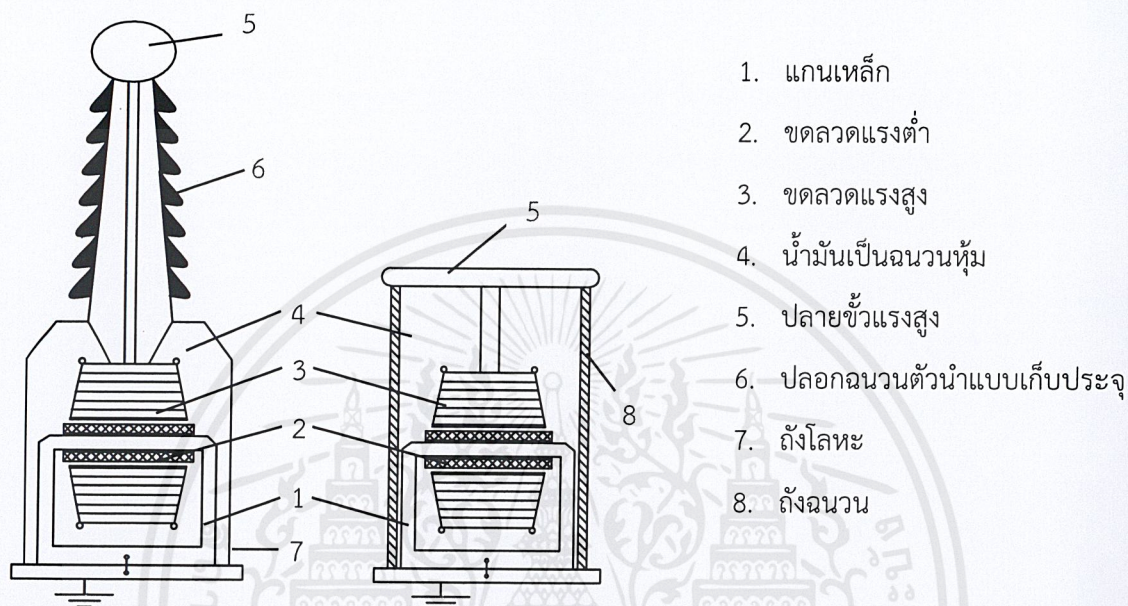
รูปที่ 2.5 หม้อแปลงแบบหุ้มด้วยฉนวนแห้ง

แกนเหล็กจะต่อลงดิน ขดลวดแรงต่ำจะพันชิดแกนเหล็ก แรงดันต่ำจะอยู่ระหว่าง 100 V – 2000 V ขดลวดแรงสูงจะพันทับขดลวดแรงต่ำ นั่นคือ ขดลวดแรงสูงจะอยู่ห่างแกนเหล็กและขดลวดรอบที่มีแรงดันสูงขึ้นก็จะอยู่ห่างจากแกนเหล็กหรือส่วนที่ต่อลงดินมากขึ้น ระดับของการฉนวนจะเพิ่มขึ้นตามแรงดัน

2. แบบจุ่มน้ำมัน

ขดลวด แกนเหล็ก และส่วนประกอบทั้งหมดจะจุ่มอยู่ในน้ำมัน ซึ่งบรรจุอยู่ในถังโลหะ หรือถังฉนวน ในกรณีที่ใช้ถังโลหะ จำเป็นต้องใช้ปลอกฉนวนนำสายแรงสูงออกมานอกถัง และปลอกฉนวนตัวนำจะเป็นแบบเก็บประจุ ถ้าใช้ตัวถังฉนวนจะไม่ต้องใช้ปลอกฉนวนนำสายออกมาด้านนอก

การใช้หม้อแปลงแบบถังโลหะจะมีข้อดีระบายความร้อน แต่ต้องการที่ว่างมากกว่า เพราะมีปลอกฉนวนตัวนำถ้าเป็นแบบตัวถังฉนวนการถ่ายเทความร้อนได้ยากกว่าฉะนั้นการออกข้อกำหนดจึงต้องพิจารณาถึงลักษณะการใช้งาน



1. แกนเหล็ก
2. ขดลวดแรงต่ำ
3. ขดลวดแรงสูง
4. น้ำมันเป็นฉนวนหุ้ม
5. ปลายั่วแรงสูง
6. ปลอกฉนวนตัวนำแบบเก็บประจุ
7. ถังโลหะ
8. ถังฉนวน

รูปที่ 2.6 หม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน

### 2.2.1 น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันหม้อแปลงนำมาใช้เป็นฉนวนภายใน โดยน้ำมันหม้อแปลงนั้นทำหน้าที่เป็นฉนวนแทรกซึมและช่วยในการระบายความร้อน จึงต้องมีคุณสมบัติทั้งทางฟิสิกส์ ทางเคมี และทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60296 ได้กำหนดคุณสมบัติดังกล่าวไว้คือ

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำมันหม้อแปลงที่ถูกกำหนดในมาตรฐานได้แก่ ความหนืด, จุดวาบไฟ, จุดติดไฟ, ความหนาแน่น, จุดเท

### ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันหม้อแปลง

คุณสมบัติ	คำอธิบายเพิ่มเติม
ความหนืด	น้ำมันหม้อแปลงต้องมีความหนืดต่ำ เพื่อให้มีการระบายความร้อนได้ดี ตามมาตรฐานกำหนดความหนืดที่ 20 °C
จุดวาบไฟ	อุณหภูมิที่ไอน้ำมันบนผิวน้ำมันติดไฟขึ้นได้เองตามมาตรฐานกำหนดจุดวาบไฟต้องไม่ต่ำกว่า 160 °C
จุดติดไฟ	อุณหภูมิที่น้ำมันเผาไหม้ ซึ่งมีค่าประมาณ 200 °C หรือ 1.25 เท่าของจุดวาบไฟ
ความหนาแน่น	น้ำมันหม้อแปลงถูกใช้เป็นตัวระบายความร้อนจึงต้องมีจุดแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำ ตามมาตรฐานกำหนดที่ 20 °C น้ำมันหม้อแปลงมีความหนาแน่น 0.865 g/cm <sup>3</sup>
จุดเท	โดยเป็นจุดที่อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันยังไหลได้ ตามมาตรฐานกำหนดไว้ที่ -30 °C

คุณสมบัติทางเคมีต่างๆ ของน้ำมันหม้อแปลงที่ต้องพิจารณาได้แก่ ค่ามุลน้ำมัน, ความเป็นกรด และปริมาณน้ำเจือปน

### ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันหม้อแปลง

คุณสมบัติ	คำอธิบายเพิ่มเติม
ค่ามุลน้ำมัน	น้ำมันทำปฏิกิริยากับอากาศเกิดสารที่มีลักษณะเป็นเมือก เมื่อเกาะตามผิวจะทำให้ประสิทธิภาพของการระบายความร้อนลดลงโดยมาตรฐานกำหนดให้มีได้สูงสุด 0.1% ของน้ำหนัก
ความเป็นกรด	มาตรฐานกำหนดให้มี KOH ได้ไม่เกิน 0.03 mg ต่อ น้ำมัน 1 g และต้องไม่มีส่วนผสมของกำมะถัน เพราะการที่มีสารกำมะถันจะทำให้เกิดการกัดกร่อนวัสดุในหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 กระดาษฉนวน

กระดาษฉนวนใช้เป็นฉนวนระหว่างชั้นขดลวดระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำและระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก เนื่องจากกระดาษมีรูพรุน จึงต้องอบแห้งและแช่น้ำมันหม้อแปลง กระดาษฉนวนที่ใช้กันทั่วไปคือ

1. กระดาษคราฟท์ ผลิตจากเส้นใย (Fibers) ของไม้ซึ่งมีความหนาของกระดาษตั้งแต่ 0.045 mm. ถึง 0.380 mm. และมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

2. เพรสบอร์ด เป็นกระดาษแข็งและหนากว่ากระดาษคราฟท์คือหนาตั้งแต่ 0.8 mm. ถึง 3.2 mm. ซึ่งมีความคงทนความร้อนได้เท่ากับ 105 °C โดยที่ไม่ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพลงเมื่อกระดาษแห้งจะมีความคงทนของไดอิเล็กตริกได้ดีและการสูญเสียของไดอิเล็กตริกต่ำแต่กระดาษสามารถดูดซับความชื้นได้ง่าย ดังนั้นในการสร้างหม้อแปลงจะอบส่วนแกนเหล็กและขดลวดที่ประกอบขึ้นรูปให้แห้งแล้วนำไปจุ่มน้ำมันในถังหม้อแปลงเพื่อป้องกันความชื้นและรักษาความคงทนของไดอิเล็กตริกของกระดาษ และกระดาษอัดแรงมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง

### 2.2.3 เส้นลวดออบน้ำยาฉนวน

ขดลวดพันด้วยเส้นลวดออบน้ำยาฉนวน Poly Formol Rasin (PVF) ซึ่งทนน้ำมันได้ดี มีความเหนียวยืดหยุ่นเป็นพิเศษ ทนต่อการขีดถู และสามารถนำความร้อนได้ถึง 180 °C การคำนวณรอบของขดลวดสามารถประมาณได้จากการคำนวณของสมการ

$$N = \frac{E}{4.44fBA} \quad (2.30)$$

N คือ จำนวนรอบขดลวด (turn)

F คือ ความถี่ที่ใช้งาน (Hz)

B คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้อยขดลวด (T)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (m<sup>2</sup>)

การเลือกชนิดวัสดุที่นำมาทำเป็นขดพิจารณาจากน้ำหนักต่อปริมาตร สภาพต้านทาน ความแข็งแรงทางกล ความคงทนต่อความกัดกร่อน การขยายตัว ราคาของวัสดุรูปแบบและขนาดของขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำต้องคำนึงถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดต่างๆของขดลวดให้ไม่เกินค่าที่ทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนหรือเกิดเบรกดาวขึ้นในฉนวน

### 2.2.4 ปลูกฉนวนนำสาย

ปลูกฉนวนนำสายทำหน้าที่เป็นฉนวนกันระหว่างส่วนที่เป็นแรงสูงกับส่วนที่ต่อลงดิน โดยปลูกฉนวนนำสายทำมาจากวัสดุ เช่น พอร์ซเลน เส้นใยแก้ว โดยสำหรับหม้อแปลงที่ใช้ภายนอก

อาคารปลอกฉนวนนำสายไฟซึ่งทำลักษณะเป็นครีปโดยเพิ่มระยะรั้วตามผิวเพื่อป้องกันการwabไฟตามแล้ว

### 2.2.5 ตัวถัง

ตัวถังโลหะจะทำหน้าที่รับแรงทางกลที่เกิดจากน้ำมันของหม้อแปลงและทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการระบายความร้อนที่เกิดจากกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าในตัวนำไฟฟ้าที่มีค่าความต้านทานของขดลวด ฟลักซ์แม่เหล็กที่ไหลในสารเฟอร์โรแมกเนติก รวมทั้งเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลในตัวถังและฝาปิดของหม้อแปลง ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงสูงขึ้นจากอุณหภูมิรอบข้าง โดยกรณีทั่วไปจะเป็นอากาศ โดยความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ดังนั้นการออกแบบหม้อแปลงควรมีพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศเพียงพอโดยอุณหภูมิขดลวดต้องไม่เกินค่าที่กำหนด

### 2.2.6 แกนเหล็ก

แกนเหล็กจะทำหน้าที่เป็นทางของเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อให้เกิดความเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก โดยพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก จำนวนรอบขดลวดและแรงดันจะสัมพันธ์ตามสมการ 2.26 แกนเหล็กจะประกอบขึ้นจากแผ่นเหล็กบางเนื่องจากต้องการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก อันเกิดจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก การออกแบบพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กจะทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมหลายชั้นอัดกันในวงกลมเพื่อให้สามารถใช้พื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าพื้นที่หน้าตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยม และเหตุผลทางกายภาพในการพันขดลวดให้มีลักษณะเป็นวงกลมได้ง่ายขึ้น คือลดการเสียดสีระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก และเมื่อขณะใช้งานจะเกิดแรงระหว่างขดลวดก็จะไม่ทำให้ขดลวดเสียรูป และแกนเหล็กภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้เหล็กผสมซิลิคอน เพื่อเพิ่มค่าความต้านทานจำเพาะทำให้การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนลดลง (Eddy Current) เหล็กที่ผสมซิลิคอนสูงจะทำให้ฮิสเทอรีซิสลูป (Hysteresis Loop) แคบลง การสูญเสียฮิสเทอรีซิสก็จะลดลงด้วย เหล็กซิลิคอนจะมีเปอร์เซ็นต์สูงทำให้ใช้กระแสกระตุ้นในวงจรแม่เหล็กลดลง เหล็กที่ใช้อาจเป็นเหล็กกรีดร้อนหรือเหล็กกรีดเย็น เหล็กกรีดร้อนจะมีความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุด  $1.45 \text{ Wb/m}^2$  ส่วนเหล็กกรีดเย็นจะมีความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดมากกว่า  $1.8 \text{ Wb/m}^2$  โดยส่วนใหญ่แล้วโรงงานหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้เหล็กกรีดเย็นประกอบแกนเหล็ก แม้ว่าราคาแพงแต่สามารถลดน้ำหนักของแกนเหล็กได้มากกว่า

## 2.3 แรงดันกระจายของขดลวด

หม้อแปลงในภาวะคงตัว แรงดันบนขดลวดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของขดลวด ในภาวะ ทรานเซียนต์หรือแรงดันอิมพัลส์ การกระจายของแรงดันบนขดลวดหม้อแปลง จะไม่สม่ำเสมอตามแนวความยาวขดลวด เนื่องจากผลของค่าเก็บประจุไฟฟ้าสแตตริกของขดลวด จะทำให้การฉนวนของขดลวดรอบต้นทาง หรือใกล้ขั้วแรงสูงมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่ารอบที่อยู่ห่างขั้วแรงสูงออกไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงดันอิมพัลส์ที่มีความชันสูง อันเนื่องมาจากคลื่นจร จากฟ้าผ่า

หรือเกิดคลื่นตัดจากการทดสอบ ซึ่งเป็นสิ่งหนึ่งที่จะต้องพิจารณาคำนี้ถึงในการออกแบบจัดวาง  
ขดลวด

ในกรณีหม้อแปลงทดสอบปกติจะไม่มีโอกาสได้รับแรงดันอิมพัลส์จากคลื่นจรฟ้าผ่า หรือจาก  
แรงดันเสิร์จสวิตชิง แต่อาจเกิดขึ้นได้ในกรณีทดสอบแรงดันผสมระหว่างแรงดันกระแสสลับ ซ้อนด้วย  
แรงดันอิมพัลส์ หรือทดสอบการเกิดเบรกดาวนในก๊าซ ดังนั้นการออกแบบการฉนวนหม้อแปลง  
ทดสอบต้องมีประสิทธิภาพดีพอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การออกแบบสร้างชิ้นงาน

การออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาดพิกัด 220/200 kV 20 kVA ซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ แกนเหล็ก ขดลวดแรงดันต่ำ และขดลวดแรงดันสูง

ค่ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบ

กำลังไฟฟ้า ( $S_n$ )	=	20	kVA
แรงดันป้อนเข้า ( $U_1$ )	=	220	V
แรงดันจ่ายออก ( $U_2$ )			
อนุกรมด้านแรงต่ำ	=	100	kV
ขนานด้านแรงต่ำ	=	200	kV
กระแสป้อนเข้า ( $I_1$ )	=	45.45	A
กระแสจ่ายออก ( $I_2$ )	=	0.1	A
จำนวนเฟส	=	1	Phase
ความถี่ (f)	=	50	Hz

### 3.1 การออกแบบแกนเหล็ก

แกนเหล็กเป็นส่วนประกอบหลักของหม้อแปลงที่ทำหน้าที่เป็นเส้นทางเดินของแรงแม่เหล็ก ซึ่งแกนเหล็กของหม้อแปลงนั้นจะมีการเรียงแผ่นเหล็กแบบ Step Lap โดยสร้างจากแผ่นเหล็กบางๆ หลายแผ่นนำมาประกอบกัน และการเรียงแบบ Step Lap นี้จะทำให้เกิดช่องว่างอากาศระหว่างแผ่นเหล็กน้อยที่สุด เพราะช่องว่างอากาศจะมีผลทำให้เกิดกระแสและความสูญเสียสูงขณะไม่มีโหลด และทำให้เกิดระดับความดังของเสียงรบกวนที่สูง แผ่นเหล็กแต่ละแผ่นจะต้องตัดรอยต่อเป็นมุม 45 องศา และนำมาประกอบกัน เพื่อลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดจากการไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก โดยแผ่นเหล็กที่ใช้ในการประกอบสร้างจะเป็นชนิด M-4 โดยแผ่นเหล็กชนิดนี้จะมีการผสมซิลิคอน ประมาณ 3-5 % เพื่อเพิ่มค่าความต้านทานและค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กของแผ่นเหล็ก โดยจะส่งผลให้ค่ากระแสไหลวนลดน้อยลง และวงรอบฮิสเตอร์ริซิสลดลง นั่นคือลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก และลดกระแสสร้างแม่เหล็ก [6]

เนื่องจากรูปคลื่นของแรงดันทดสอบต้องใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากที่สุด ดังนั้นค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก ( $B_m$ ) จะต้องอยู่ในย่านเชิงเส้น โดยค่า  $B_m$  ของเหล็กชนิด M-4 เข้าใกล้ย่านอิ่มตัวประมาณ  $1.624 \text{ Wb/m}^2$  ในการออกแบบจึงเลือกค่า  $B_m$  เท่ากับ  $1.7 \text{ Wb/m}^2$  ซึ่งพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = 4.44NB_m A_m F_s \quad (3.1)$$

$$A_m = \frac{\left(\frac{E}{N}\right)}{4.44fB_m F_s} \quad (3.2)$$

โดย	E	คือ	ค่า r.m.s. ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด (V)
	N	คือ	จำนวนรอบของการพันขดลวด (Turn)
	f	คือ	ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ (Hz)
	B <sub>m</sub>	คือ	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (Tesla) หรือ (Wb/m <sup>2</sup> )
	A <sub>m</sub>	คือ	พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก (m <sup>2</sup> )
	F <sub>s</sub>	คือ	สแตคกิ้งแฟคเตอร์

การหาขนาดแกนเหล็กต้องมีการกำหนดค่า  $\frac{E}{N}$  ขึ้นมาโดยหาได้จากค่าที่ทางบริษัทกำหนดให้ โดย N มีค่าเท่ากับ 88 รอบต่อขดลวดแรงดันต่ำ 1 ชุด ชุดละ 220V

$$\begin{aligned} \frac{E}{N} &= \frac{220}{88} \\ &= 2.5 \text{ V/T} \end{aligned}$$

ค่าสแตคกิ้งแฟคเตอร์ มีค่าเท่ากับ 0.97 ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของเหล็กชนิด M-4 แทนค่าในสมการ 3.2

$$\begin{aligned} A_m &= \frac{2.5}{4.44 \times 50 \times 1.7 \times 0.97} \\ &= 6.829 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 6,829 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก

$$\begin{aligned} \phi &= B_m \times A_m \times F_s \quad (3.3) \\ &= 1.7 \times 6829 \times 10^{-6} \times 0.97 \\ &= 0.0113 \text{ Wb} \end{aligned}$$

การออกแบบหน้าตัดของแกนเหล็กอาจจะเป็นหลายชั้น คือ รูปสี่เหลี่ยมอัดภายในวงกลม เพื่อให้สามารถใช้พื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่าพื้นที่หน้าตัดขวางที่เป็นสี่เหลี่ยม และเหตุผลทางกายภาพในการพันขดลวดให้มีลักษณะเป็นวงกลมได้ง่ายขึ้น ลดการเสียดสีระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก และเมื่อขณะใช้งานจะเกิดแรงระหว่างขดลวดก็จะไม่ทำให้ขดลวดเสียรูป การออกแบบหน้าตัดแกนเหล็กแบบหลายชั้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพการใช้พื้นที่สูงสุดสามารถคำนวณได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์แต่การออกแบบหน้าตัดแกนเหล็กให้มีหลายชั้น จะทำให้มีความยุ่งยากในการตัดและเรียงแกนเหล็กมากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกที่จะเรียงแกนเหล็กเพียง 3 ชั้น

การออกแบบแกนเหล็กต้องคำนึงถึงขนาดความกว้างของแผ่นเหล็กที่สามารถตัดได้ในเชิงการผลิต ซึ่งความหนาของแกนเหล็ก M-4 มีขนาด 0.27 mm แกนเหล็กเป็นแบบ Core Type มีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นแบบสี่เหลี่ยม 3 ชั้น บรรจุอยู่ในวงกลมโดยเลือกใช้หน้าเหล็ก ชั้นที่ 1 (a) เป็น 90 mm ชั้นที่ 2 (b) เป็น 70 mm และชั้นที่ 3 (c) เป็น 50 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.1

แกนเหล็กแบบ 3 ชั้นนี้จะให้ค่าแฟคเตอร์พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กในวงกลม ( $F_c$ ) เป็น

$$F_c = 78.9 \%$$

$F_c$  ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบย้อนกลับ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็กหาได้จากสมการที่ 3.4

$$\frac{\pi}{4} \times D^2 = \frac{A_m}{F_c} \quad (3.4)$$

โดย  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม (mm)  
 $A_m$  คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก ( $m^2$ )  
 $F_c$  คือ Factor พื้นที่หน้าตัดในวงกลม

$$\text{ดังนั้น} \quad D = \sqrt{(A_m \times 4) / (\pi \times F_c)} \quad (3.5)$$

$$= \sqrt{\frac{6829 \times 4}{\pi \times 0.789}}$$

$$= 104.97$$

$$\approx 105 \text{ mm.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาของแกนเหล็กชั้นที่ 1

$$\begin{aligned}
 d_1 &= \sqrt{D^2 - a^2} \\
 &= \sqrt{105^2 - 90^2} \\
 &= 54 \text{ mm.}
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

แผ่นเหล็ก M-4 หนา 0.27 mm. ใช้จำนวนแผ่นเหล็ก M-4 จำนวน

$$\frac{54}{0.27} = 200 \text{ แผ่น}$$

ดังนั้น ความหนาของแกนเหล็ก = 54 mm.

ความหนาของแกนเหล็กแผ่นที่ 2

$$\begin{aligned}
 d_2 &= \sqrt{D^2 - b^2} - d_1 \\
 &= \sqrt{105^2 - 70^2} - 54 \\
 &= 24.3 \text{ mm.}
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

แผ่นเหล็ก M-4 หนา 0.27 mm. ใช้จำนวนแผ่นเหล็ก M-4 จำนวน

$$\frac{24.3}{0.27} = 90 \text{ แผ่น}$$

ดังนั้น ความหนาของแกนเหล็ก = 24.3 mm.

ความหนาของแกนเหล็กแผ่นที่ 3

$$\begin{aligned}
 d_3 &= \sqrt{D^2 - b^2} - d_1 - d_2 \\
 &= \sqrt{105^2 - 50^2} - 54 - 24.3 \\
 &= 14.03 \text{ mm.}
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

แผ่นเหล็ก M-4 หนา 0.27 mm. ใช้จำนวนแผ่นเหล็ก M-4 จำนวน

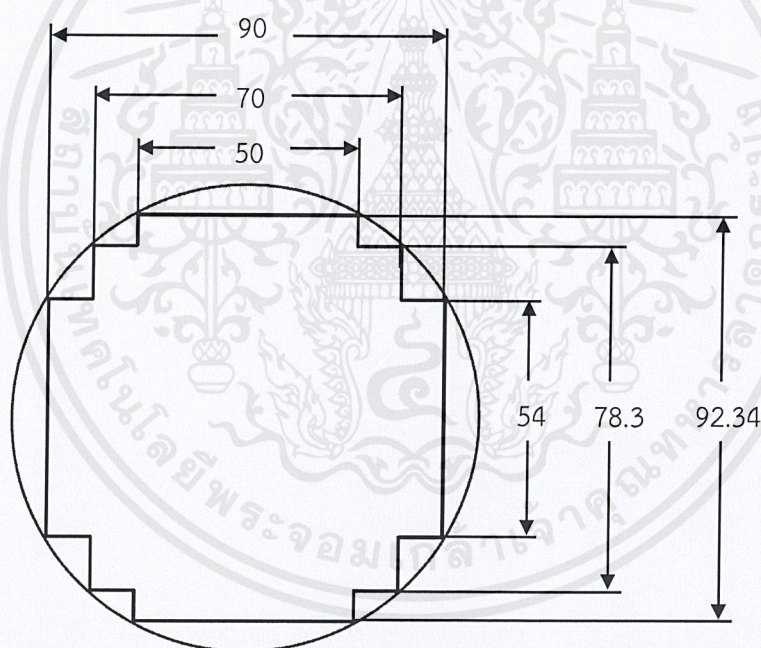
$$\frac{14.03}{0.27} = 51.96 \approx 52 \text{ แผ่น}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ความหนาของแกนเหล็ก} &= 52 \times 0.27 \\ &= 14.04 \text{ mm.} \end{aligned}$$

พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กใหม่

$$\begin{aligned} A_{m,\text{new}} &= (90 \times 54) + (70 \times 23.3) + (50 \times 14.04) \\ &= 7,263 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

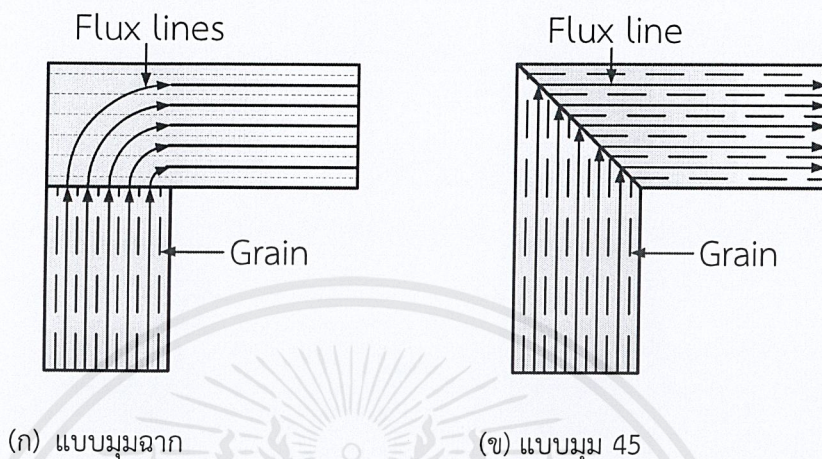
ดังนั้นจะได้ภาพตัดขวางของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพตัดขวางพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

การเรียงแกนเหล็กแบบต่อกันเป็นมุมฉากจะทำให้การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กนั้นไม่สะดวก เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กต้องวิ่งข้ามรอยต่อของแผ่นเหล็ก และการที่เส้นแรงแม่เหล็กข้ามแผ่นเหล็กจากแผ่นหนึ่งไปอีกแผ่นหนึ่งเส้นแรงแม่เหล็กจะไหลในทิศทางตั้งฉากกับการเรียงตัวของเกรนเหล็ก ซึ่งทิศทางนี้จะมีค่าความซึมซับแม่เหล็ก ( $\mu$ ) เป็นหนึ่งในสิบถึงหนึ่งในเจ็ดเท่าของทิศทางที่เกรนแม่เหล็กนั้นเรียงตัวอยู่ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะกลับทิศทางไหลเป็นผลให้กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก การ

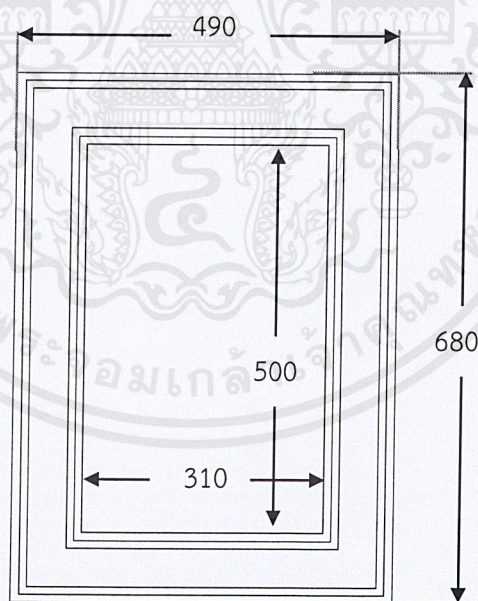
แก้ปัญหานี้จะทำได้โดยตัดแผ่นเหล็กเป็นมุม  $45^\circ$  ซึ่งจะทำให้การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กสะดวกมากขึ้น ลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กและลดค่ากระแสทำแม่เหล็ก



(ก) แบบมุมฉาก

(ข) แบบมุม 45

รูปที่ 3.2 การไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก



รูปที่ 3.3 ขนาดของแกนเหล็ก

แกนเหล็กที่ใช้เป็นแบบคอร์ (core type transformer) ซึ่งมีลักษณะการพันขดลวดเป็นแบบ พันล้อมรอบแกนเหล็ก และเนื่องจากแกนเหล็กของหม้อแปลงจะถูกต่อลงดินตั้งนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการ ฉนวนจะทำการพันขดลวดแรงต่ำไว้ด้านใน และพันขดลวดแรงสูงทับขดลวดแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวรอบเฉลี่ยของแกนเหล็ก ( $l_{FE}$ )

$$\begin{aligned} l_{fe} &= (2 \times 590) + (2 \times 400) \\ &= 1,980 \text{ mm} \end{aligned}$$

ปริมาตรแกนเหล็ก

$$\begin{aligned} V_C &= A_{m,new} \times F_s \times l_{fe} & (3.9) \\ V_C &= 7263 \times 1980 \times 0.97 \\ &= 13949317.8 \text{ mm}^3 \\ &= 13,949.32 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

น้ำหนักแกนเหล็กคิดจากความหนาแน่น  $7.65 \text{ g/cm}^3$

$$\begin{aligned} W_c &= V_{C2} \times \text{Density} & (3.10) \\ &= 13949.32 \times 7.65 \times 10^{-3} \\ &= 106.71 \text{ kg} \end{aligned}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กเหล็กหาได้จากกราฟผู้ผลิตเหล็กซิลิคอนกำหนดให้ในที่นี่ กำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อน้ำหนักแกนเหล็กที่  $1.7 \text{ Wb/m}^2$  มีค่าเท่ากับ  $1.23 \text{ W/kg}$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก ( $P_c$ )

$$\begin{aligned} P_c &= 106.71 \times 1.23 \\ &= 131.25 \text{ W} \end{aligned}$$

Exciting Volt- Ampare ในแกนเหล็ก  $1.7 \text{ Wb/m}^2$  มีค่าเท่ากับ  $3 \text{ VA/kg}$

ดังนั้น Exciting Volt-Ampare ในแกนเหล็ก ( $P_{VA}$ )

$$\begin{aligned} P_{VA} &= 3 \times 106.71 \\ &= 320.13 \text{ VA} \end{aligned}$$

ตารางที่ 3.1 สรุปลักษณะของแกนเหล็ก

ชนิดของแกนเหล็ก	M-4
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (T)	1.7
ความหนาของแผ่นเหล็ก (mm)	0.27
พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็ก (mm <sup>2</sup> )	7,263
เส้นผ่านศูนย์กลางแกนเหล็ก (mm)	105
ความกว้างของแกนเหล็ก (mm)	490
ความสูงของแกนเหล็ก (mm)	680
ความยาวเฉลี่ยแกนเหล็ก (mm)	1,980
ปริมาตรของแกนเหล็ก (cm <sup>3</sup> )	13,949.32
น้ำหนักของแกนเหล็ก (kg)	106.71 kg
ความสูญเสียในแกนเหล็ก (W)	131.25

### 3.2 การออกแบบขดลวด

#### 3.2.1 การออกแบบขดลวดแรงต่ำ

ขดลวดแรงต่ำจะกำหนดความหนาแน่นกระแสอยู่ที่ 2.5 A/mm<sup>2</sup> ซึ่งจะสอดคล้องกับขนาดของขดลวดที่มีขายในเชิงพาณิชย์ ขดลวดที่มีขนาดใหญ่กว่านี้แม้จะให้ความหนาแน่นของกระแสที่ต่ำกว่า แต่จำนวนชั้นการพันของขดลวดจะเพิ่มขึ้นอาจทำให้เปอร์เซ็นต์ลัดวงจรสูงเกินไป และต่อขดลวดด้านแรงต่ำเป็น 2 กรณี คือ ต่อแบบขนาน และ ต่อแบบอนุกรม

##### 1. ขนาดพื้นที่ของขดลวดแรงต่ำ

$$A_1 = \frac{I_1}{J_1} \quad (3.11)$$

โดย  $A_1$  คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวดแรงต่ำ (mm<sup>2</sup>)

$I_1$  คือ กระแสที่ป้อนเข้าพิกัด (A)

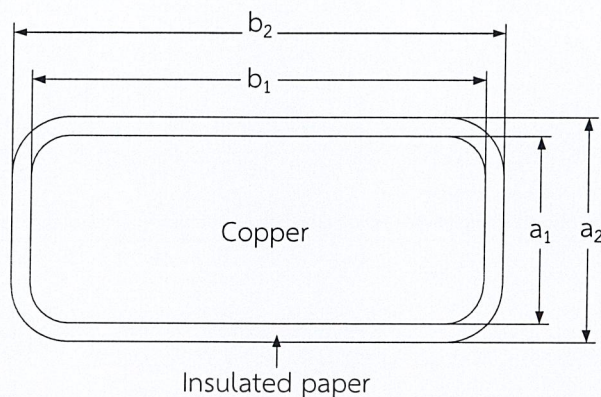
$J_1$  คือ ความหนาแน่นกระแส (A/mm<sup>2</sup>)

แทนค่าในสมการที่ (3.11)

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad A &= \frac{45.45}{2.5} \\ &= 18.18 \approx 20 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

ขดลวดแรงดันต่ำ ใช้ลวดสี่เหลี่ยมทองแดงหุ้มกระดาษ มีขนาดดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางของลวดแรงต่ำ

$$\begin{aligned} a_1 &= 2 \text{ mm} & a_2 &= 2.2 \text{ mm} \\ b_1 &= 10 \text{ mm} & b_2 &= 10.2 \text{ mm} \end{aligned}$$

พื้นที่หน้าตัดใช้งานจริง ( $A_1$ )  $20 \text{ mm}^2$

2. จำนวนรอบขดลวด

$$N = \frac{V_1}{\left(\frac{E}{N}\right)} \quad (3.12)$$

โดย  $N_1$  คือ จำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ (รอบ)

$V_1$  คือ แรงดันป้อนเข้า (V)

$E/N$  คือ แรงดันต่อจำนวนรอบ (V/T)

แทนค่าในสมการที่ 3.12

$$\begin{aligned} N &= \frac{220}{(2.5)} \\ &= 88 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

3. การพันขดลวดแรงต่ำ

จำนวนขดลวดมี 2 ชุด แต่ละชุดพัน 2 layer

layer ที่ 1 44 รอบ

layer ที่ 2 44 รอบ

รวม 88 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{ความกว้างของขดลวด} &= (\text{ความกว้างของเส้นลวดรวมกับฉนวน} + \text{ระยะห่างระหว่างเส้นลวด}) \\ &\times (\text{จำนวนรอบ/layer} + 1) \end{aligned} \quad (3.13)$$

แทนค่าในสมการที่ 3.13

$$\begin{aligned} \text{ความกว้างของขดลวด} &= (10.2 + 0.1) \times (44 + 1) \\ &= 468.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

\* $(44 + 1)$  หมายถึงจำนวน 45 รอบบวกเพื่อไว้ 1 รอบ สำหรับเริ่มต้นการพัน

\*ระยะห่างระหว่างเส้นลวด = 0.1 mm

$$\begin{aligned} \text{ความหนาของขดลวด} &= [(\text{ความหนาของเส้นลวดรวมฉนวน} + \text{ระยะห่างระหว่างเส้นลวด}) \\ &\times \text{จำนวน Layer}] + [(\text{จำนวน Layer} - 1) \\ &\times \text{ความหนาของกระดาษคราฟท์}] \end{aligned} \quad (3.14)$$

แทนค่าในสมการที่ 3.14

$$\begin{aligned} \text{ความหนาของขดลวด} &= [(2.2 + 0.1) \times 2] + [1 \times 1] \\ &= 5.6 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น} = 2 \times \text{จำนวนรอบ/layer} \times \text{Volt/turn} \quad (3.15)$$

แทนค่าในสมการที่ 3.15

$$\begin{aligned} \text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น} &= 2 \times 44 \times 2.5 \\ &= 220 \text{ V} \end{aligned}$$

#### 4. ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดแรงต่ำ

เนื่องจากแกนเหล็กมีรัศมี 52.5 mm ระหว่างแกนเหล็กกับขดลวดแรงดันต่ำมีช่องว่าง 0.5 mm และใช้ Press board หนา 1.6 mm เป็นแกนของขดลวดแรงต่ำ ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{รัศมีวงในของขดลวดแรงดันต่ำ} &= 52.5 + 0.5 + 1.6 \\ &= 54.6 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รัศมีวงนอก} &= 57.5 + \text{ความหนาของขดลวด} \\ &= 54.6 + 5.6 \\ &= 60.2 \text{ mm} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{รัศมีเฉลี่ย}(r_1) &= \frac{54.6 + 60.2}{2} \\ &= 57.4 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{ความยาวรอบเฉลี่ย} (l_{av}) = 2 \times \pi \times r_1 \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสมการที่ 3.16} \\ &= 2 \times \pi \times 57.4 \\ &= 360.65 \text{ mm} \end{aligned}$$

#### 5. น้ำหนักทองแดงและขดลวด

$$W = N \times A_1 \times l_{av} \times \text{Density} \quad (3.17)$$

โดย W คือ น้ำหนักของขดลวด (kg)  
 N คือ จำนวนรอบขดลวดแรงต่ำ (Turn)  
 A<sub>1</sub> คือ พื้นที่หน้าตัดเส้นลวด (mm<sup>2</sup>)  
 Density คือ ความหนาแน่นของทองแดง (kg/m<sup>3</sup>)  
 l<sub>av</sub> คือ ความยาวรอบเฉลี่ย (mm)

แทนค่าในสมการที่ 3.17

$$\begin{aligned} W &= 88 \times 20 \text{ mm}^2 \times 360.65 \text{ mm} \times 8900 \text{ kg/m}^3 \times 10^{-9} \\ &= 5.65 \text{ kg} \end{aligned}$$

เนื่องจากขดลวดแรงต่ำมี 2 ชุด น้ำหนักทั้งหมดของขดลวด = 11.3 kg

#### 6. ความต้านทานของขดลวด

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.18)$$

โดย R คือ ความต้านทานของขดลวด ( $\Omega$ )  
 $\rho$  คือ สภาพความต้านทานของทองแดง ( $\Omega \cdot \text{m}$ )  
 L คือ ความยาวของขดลวด (mm)  
 A<sub>1</sub> คือ พื้นที่หน้าตัดเส้นลวด (mm<sup>2</sup>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าในสมการที่ 3.18

$$R = 2 \times 0.01707 \times 10^{-6} \Omega \cdot m \times \frac{88 \times 360.65 \text{ mm}}{20 \text{ mm}^2}$$

$$= 0.0542 \Omega$$

7. กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดแรงต่ำ ( $P_{CU LV}$ )

$$P_{CU LV} = I_1^2 R \quad (3.19)$$

โดย  $P_{cu lv}$  คือ กำลังสูญเสียในขดลวดแรงต่ำ (W)  
 $I_1$  คือ กระแสป้อนเข้า (A)  
 $R$  คือ ความต้านทานของขดลวด ( $\Omega$ )

แทนค่าในสมการที่ 3.19

$$P_{CU LV} = 45.45^2 \times 0.0542$$

$$= 111.96 \text{ W}$$

ตารางที่ 3.2 สรุปลักษณะของขดลวดแรงต่ำ

ชนิดของวัสดุ	ลวดทองแดง
ขนาดของตัวนำ (mm <sup>2</sup> )	2 × 10
ฉนวนห่อหุ้มเส้นลวด	Insulated Paper
จำนวนรอบต่อขด (รอบ)	88
จำนวนขดขดลวด (ขด)	2
จำนวน layer (layer)	2
จำนวนรอบ/layer	44
รัศมีด้านในของขดลวด (mm)	54.6
รัศมีด้านนอกของขดลวด (mm)	60.2
รัศมีเฉลี่ยของขดลวด (mm)	57.4
ความกว้างของขดลวด (mm)	360.65
น้ำหนักของขดลวด (kg)	11.3
กำลังสูญเสียในขดลวด (W)	111.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การออกแบบขดลวดแรงสูง

ขดลวดแรงดันสูงเป็นขดลวดที่ถูกห่อหุ้มอย่างมิดชิด ด้วยกระดาษฉนวนเนื่องจากมีความเครียดสูงดังนั้นอุณหภูมิเพิ่มในขดลวดจะมีค่าสูง การกำหนดความหนาแน่นกระแสต้องกำหนดให้มีค่าต่ำจึงเลือกค่าที่อยู่ที 2 A/mm<sup>2</sup> เพราะเมื่อคำนวณขนาดของขดลวดออกมาแล้วมีขนาดที่เหมาะสม

#### 1. ขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดแรงสูง

$$A_2 = \frac{I_2}{J_2} \quad (3.20)$$

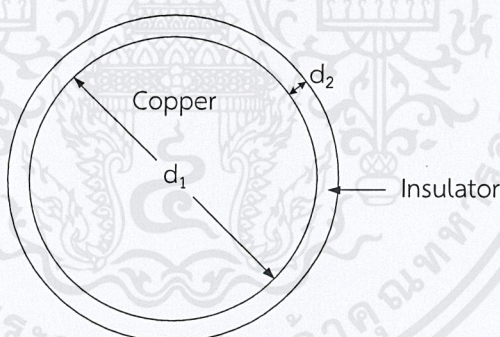
โดย  $A_2$  คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (mm<sup>2</sup>)

$I_2$  คือ กระแสจ่ายออกที่พิกัด (A)

$J_2$  คือ ความหนาแน่นกระแส (A/mm<sup>2</sup>)

แทนค่าในสมการที่ 3.20

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{0.1}{2} \\ &= 0.05 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$



รูปที่ 3.5 ภาพตัดขดลวดแรงสูง

$$d_1 = 0.25 \text{ mm}$$

$$d_2 = 0.03 \text{ mm}$$

#### 2. จำนวนรอบขดลวด

$$N_2 = \frac{V_2}{\left(\frac{E}{N}\right)} \quad (3.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $N_2$  คือ จำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ (Turn)

$V_2$  คือ แรงดันจ่ายหนัก (V)

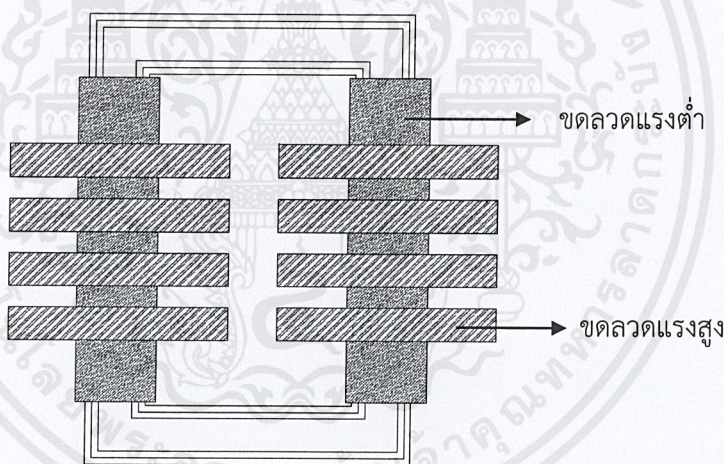
$\frac{E}{N}$  คือ แรงดันต่อจำนวนรอบ (V/T)

แทนค่าในสมการที่ 3.21

$$N_2 = \frac{200,000}{2.5}$$

### 3. การพันขดลวด

การพันขดลวดแรงดันสูงจะพันแบบชั้นทรงกระบอกโดยมีการแบ่งขดลวดแรงสูงเป็น 8 ชุด เนื่องจากถ้าหม้อแปลงได้รับแรงดันเสิร์จ จะทำให้แรงดันกระจายบนขดลวดเกิดความไม่สม่ำเสมอขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าเก็บประจุของขดลวด ซึ่งวิธีการนี้จะเหมือนกับการเกรดดิ่งขดลวด



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการพันของขดลวดแรงสูง

$$\begin{aligned} \text{ความกว้างของขดลวด} &= (\text{ความกว้างของเส้นลวดรวมฉนวน} \\ &+ \text{ระยะห่างระหว่างเส้นลวด}) \\ &\times (\text{จำนวนรอบ/layer} + 1) \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} \text{ความกว้างของขดลวดทั้ง 8 ชุด} &= (0.31) \times (170 + 1) \\ &= 53.01 \text{ mm} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมความกว้างของกระดาษปิดขอบด้านละ 2 mm

$$\begin{aligned} \text{ความกว้างของขดลวดแต่ละชุด} &= 50 \text{ mm} \\ \text{ความหนาของขดลวด} &= \text{จำนวน layer} \times (\text{ความหนาของเส้นลวดรวมฉนวน} \\ &\quad + \text{ความหนาของกระดาษกราฟท์}) \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \text{ความหนาของขดลวดทั้ง 8 ชุด} &= 59 \times (0.31 + 0.13) \\ &= 25.96 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น} &= 2 \times \text{จำนวนรอบ/layer} \times \text{Volt/Turn} \quad (3.24) \\ \text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น} &= 2 \times 170 \times 2.5 \\ &= 850 \text{ V} \end{aligned}$$

#### 4. ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดแรงดันสูง

เนื่องจากขดลวดแรงดันต่ำมีรัศมีวงนอก 59.8 mm และกระดาษฉนวนหนา 1.6 mm เป็นแกนปิดขดลวดแรงต่ำ ระหว่างขดลวดแรงต่ำและแรงสูง จะมีช่องว่างน้ำมันชั้นแรกหนา 60 mm เพื่อระบายความร้อนโดยใช้กระดาษ ใช้กระดาษฉนวนหนา 1.6 และ 0.5 mm ปิด 2 ชั้น และ 10 ชั้น ตามลำดับ จากนั้นจะมีช่องว่างน้ำมันชั้นที่สองหนา 3.2 mm จากนั้นจะเผื่อระยะเพื่อสวมขดลวดแรงสูงเข้ากับขดลวดแรงต่ำ 2 mm ขดลวดแรงสูงจะมีแกน 3.2 mm เพราะฉะนั้นขดลวดทั้ง 8 ชุด

$$\begin{aligned} \text{รัศมีวงใน} &= 59.8 + 1.6 + 60 + (1.6 \times 2) + (0.5 \times 10) + 3.2 + 2 + 1.6 \\ &= 136.4 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รัศมีวงนอก} &= \text{รัศมีวงใน} + \text{ความหนาของขดลวด} + \text{แกนปิดขดลวดแรงสูง} \\ &= 136.4 + 25.96 + 3.2 \\ &= 165.56 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รัศมีเฉลี่ย } (r_{21}) &= \frac{136.4 + 165.56}{2} \\ &= 150.98 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{ความยาวรอบเฉลี่ย } (l_{av}) = 2 \times \pi \times r_{21} \quad (3.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 2 \times \pi \times 150.98$$

$$= 948.64 \text{ mm}$$

น้ำหนักทองแดงของขดลวด

$$W = N \times A_1 \times l_{av} \times \text{Density} \quad (3.26)$$

แทนค่าในสมการที่ 3.26

$$W = 80000 \times 0.05 \text{ mm}^2 \times 948.64 \text{ mm} \times 8,900 \text{ kg/m}^3$$

$$W = 33.56 \text{ kg}$$

ความต้านทานของขดลวด

$$R = \rho \frac{l}{A_1} \quad (3.27)$$

แทนค่าในสมการที่ 3.27

$$R = 0.01724 \times 10^{-6} \times \frac{80000 \times 948.64 \text{ mm}}{0.05 \text{ mm}^2} \Omega$$

$$R = 26167.29 \Omega$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด ( $P_{Cu}$ )

$$P_{Cu} = I_{HV}^2 R$$

$$P_{Cu} = 0.1^2 \times 26167.29$$

$$P_{Cu} = 261.67 \text{ W}$$

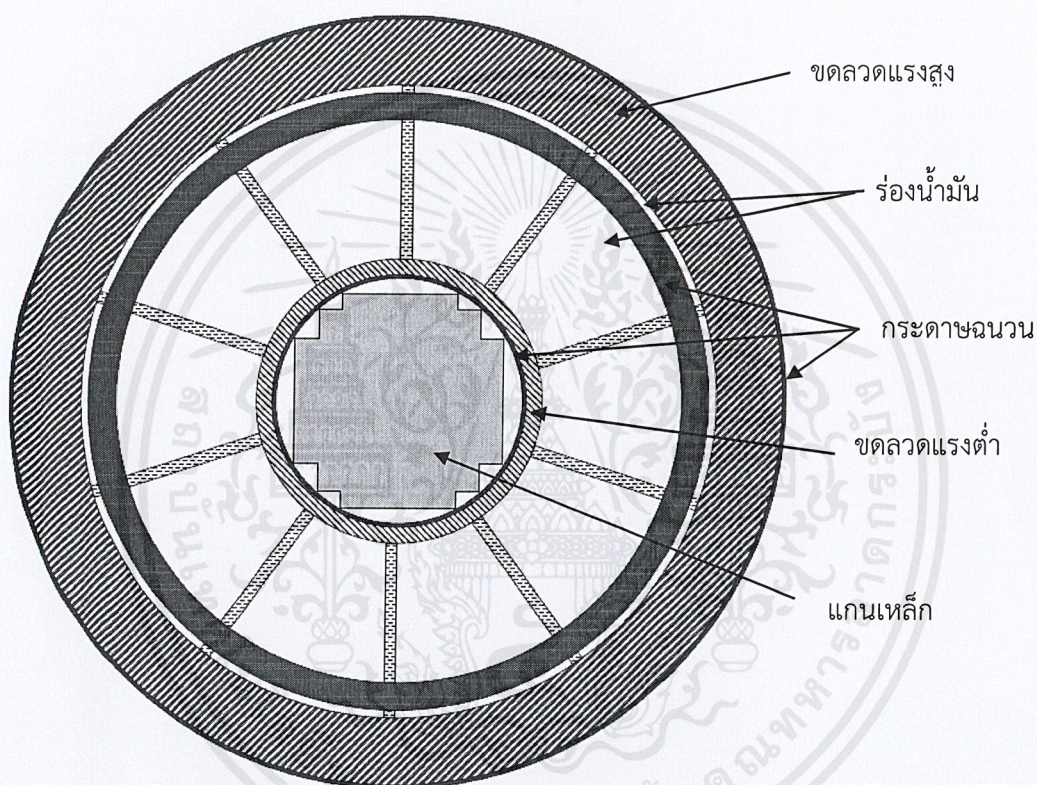
ตารางที่ 3.3 สรุปลักษณะของขดลวดแรงสูง

ชนิดของวัสดุ	ทองแดง
ขนาดของตัวนำ (mm <sup>2</sup> )	0.05
จำนวนรอบ (รอบ)	80,000
จำนวนชุดขดลวด (ชุด)	8
จำนวนรอบต่อชุด (รอบ)	10,000
รัศมีด้านในของขดลวด (mm)	136.4
รัศมีด้านนอกของขดลวด (mm)	165.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 (ต่อ) สรุปลักษณะของขดลวดแรงสูง

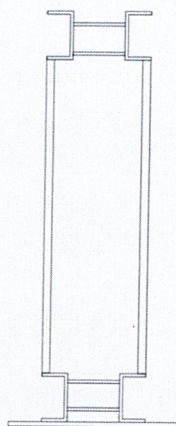
รัศมีเฉลี่ยของขดลวด (mm)	150.98
ความกว้างของขดลวด (mm)	24.19
น้ำหนักของขดลวด (kg)	33.76
กำลังสูญเสียในขดลวด (W)	261.67



รูปที่ 3.7 ภาพตัดของขดลวดตามแนวขวางแกนเหล็ก

### 3.3 การออกแบบแคลมป์ยึดแกนเหล็ก

ก่อนจะทำการเรียงแกนเหล็กนั้น จะต้องเตรียมแคลมป์ยึดแกนเหล็กก่อน ซึ่งแคลมป์นั้นจะทำหน้าที่ยึดแกนเหล็กทั้งหมดที่มีการเรียงซ้อนกันตามที่ได้ออกแบบไว้ ให้ยึดติดกันอยู่ได้และแคลมป์ยังช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับแกนเหล็กอีกด้วย เนื่องจากการประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็ก แกนเหล็กเหล็กจะเป็นส่วนที่รับน้ำหนักของขดลวดทั้งหมด โดยแคลมป์นี้จะทำการต่อลงดินเช่นเดียวกับแกนเหล็ก ดังนั้นการออกแบบแคลมป์ต้องคำนึงถึงระยะปลอดภัยระหว่างแคลมป์กับขดลวดแรงสูงด้วย ลักษณะของแคลมป์ยึดแกนเหล็กจะมีการออกแบบดังนี้



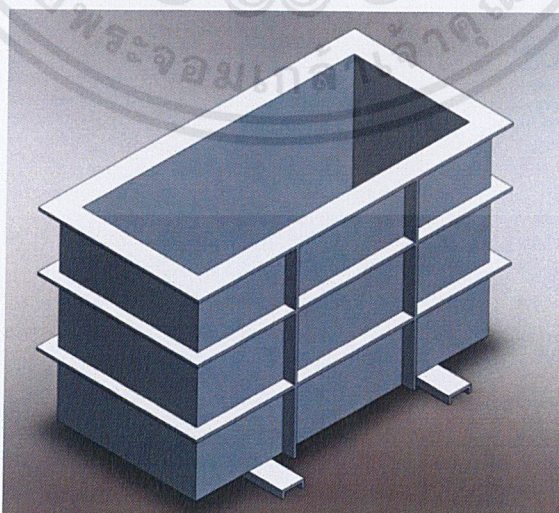
รูปที่ 3.8 แคลมป์ยึดแกนเหล็ก

ปริมาณของแคลมป์โดยประมาณ =  $2,578.27 \text{ cm}^3$

### 3.4 การออกแบบตัวถัง

ตัวถังของหม้อแปลงเป็นแบบชนิดโลหะ ซึ่งมีบุซึ่งขนาด 123 kV เป็นปลอกฉนวนนำสาย การเลือกขนาดของถังโลหะต้องทำการดูขนาดของแกนเหล็ก, ขดลวดของหม้อแปลง, และ เส้นผ่านศูนย์กลางของบุซึ่ง จากรูปใส่หม้อแปลงรูปที่ 3.6

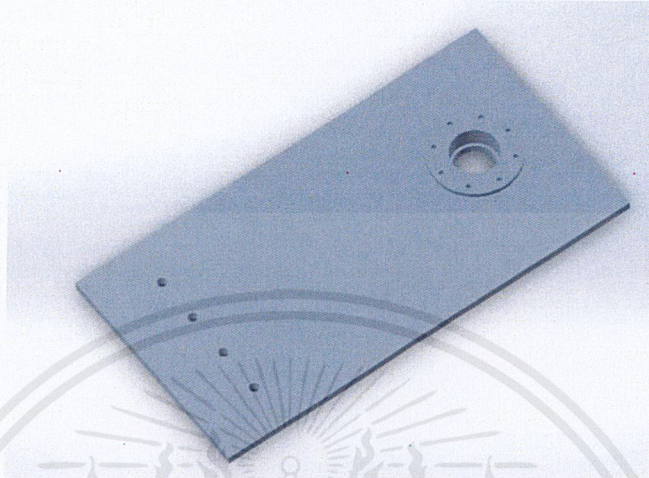
ซึ่งขนาดของหม้อแปลงของด้านกว้างเท่ากับ 260 mm., ด้านยาวเท่ากับ 800 mm., และ ด้านสูงเท่ากับ 687.5 mm. ในการเลือกขนาดของตัวถังโลหะจะคำนึงถึงระยะระหว่างแรงดันสูงและกราวด์ โดยออกแบบให้ขนาดของถังโลหะมีขนาดของด้านกว้าง 630 mm., ด้านยาวเท่ากับ 1,320 mm. และด้านสูงเท่ากับ 846 mm. ที่แสดงดังรูป



รูปที่ 3.9 ตัวถังโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการออกแบบฝาถังโลหะขนาดด้านกว้างเท่ากับ 752 mm. และด้านยาว 1,442 mm. ทำการคำนวณปริมาตรของถังได้เท่ากับ 698,544 cm<sup>3</sup>.



รูปที่ 3.10 ฝาถังโลหะ

### 3.5 การคำนวณปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง

$$\text{ปริมาตรตัวถัง} = 698,544 \text{ cm}^3.$$

$$\text{ปริมาตรแกนเหล็ก} = 13,949.32 \text{ cm}^3$$

หาปริมาตรขดลวดจาก

$$\text{ปริมาตรขดลวด} = N \times A \times l_{av} \quad (3.28)$$

แทนค่าสมการที่ 3.28

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรขดลวดแรงต่ำ (V}_{LV}) &= N_{LV} \times A_{LV} \times l_{av,LV} \\ &= 88 \times 20 \text{ mm}^2 \times 360.65 \text{ mm} \\ &= 634,691.2 \text{ mm}^3 \\ &= 634.69 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

แทนค่าสมการที่ 3.28

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรขดลวดแรงสูง (V}_{HV}) &= N_{HV} \times A_{HV} \times l_{av,HV} \\ &= 80000 \times 0.05 \text{ mm}^2 \times 938 \text{ mm} \\ &= 3,752,000 \text{ mm}^3 \\ &= 3,752 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตรของแคลมป์ = น้ำหนักของแคลมป์ × ความหนาแน่นของเหล็ก

\*ปริมาตรของกระดาดชนวน มีค่าน้อยมาก จึงไม่นำมาคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง} &= \text{ปริมาตรตัวถัง} - (\text{ปริมาตรแกนเหล็ก} + \\ &\quad \text{ปริมาตรขดลวดแรงต่ำ} + \text{ปริมาตรขดลวดแรงสูง}) \\ &= 698544 - (13949.32 + 634.69 + 3752 + 2578.27) \\ &= 677,629.72 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

เนื่องจาก 1,000 cm<sup>3</sup> เท่ากับ 1 l ดังนั้น ใช้ปริมาตรน้ำมันหม้อแปลงเท่ากับ 677.63 l

### 3.6 การคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร(I<sub>SC</sub>)

จากสมการกระแสลัดวงจร

$$I_{SC} = \frac{I_{HV}}{\%Z} \times 100$$

โดย I<sub>SC</sub> คือ กระแสลัดวงจร (A)  
I<sub>HV</sub> คือ กระแสไฟฟ้าทางด้านแรงสูง (A)  
%Z คือ แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์

$$\begin{aligned} I_{SC} &= \frac{0.1}{10} \times 100 \\ &= 10 \text{ A} \end{aligned}$$

### 3.7 กำลังไฟฟ้าลัดวงจร (S<sub>SC</sub>)

จากสมการกระแสลัดวงจร

$$S_{SC} = \frac{S_{HV}}{\%Z} \times 100$$

โดย S<sub>SC</sub> คือ กำลังไฟฟ้าลัดวงจร (VA)  
S<sub>HV</sub> คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ (VA)  
%Z คือ แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์

$$\begin{aligned} S_{SC} &= \frac{20000}{10} \times 100 \\ &= 200,000 \text{ VA} \end{aligned}$$

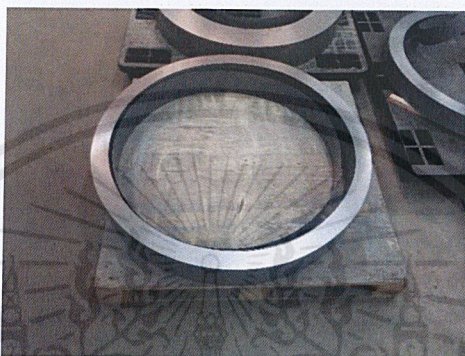
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8 การประกอบสร้าง

หม้อแปลงมีส่วนประกอบหลักเป็น แกนเหล็ก ขดลวด ตัวถัง และบุชชิ่ง ซึ่งจะนำมาประกอบกันเป็นหม้อแปลง โดยจะมีน้ำมันและกระดาษเป็นฉนวนของหม้อแปลง

#### 3.8.1 แกนเหล็ก

แกนเหล็กทำมาจากเหล็กม้วน M-4 หนา 0.27 mm โดยในการตัดแกนเหล็กนั้นจะใช้เครื่องตัดเหล็ก โดยทำการตัดให้มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.11 เหล็กม้วน M-4 หนา 0.27 mm



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการตัดเหล็ก



รูปที่ 3.13 เหล็กแผ่นที่ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้แผ่นเหล็กครบตามจำนวนที่ออกแบบไว้แล้ว จะเตรียมแคลมป์และสตั๊ดสำหรับบีบแกนเหล็กแล้วนำกระดาษขนวนมารองบนแคลมป์ทั้ง 2 ซ้างก่อนทำการเรียงเหล็ก ซึ่งแคลมป์นั้นจะต้องทำหน้าที่ยึดแกนเหล็กทั้งหมดที่เรียงซ้อนกันจนได้ขนาดที่ต้องการ ให้อยึดติดอยู่ได้และยังช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับแกนเหล็กอีกด้วย เนื่องจากการประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็กในลักษณะที่ออกแบบนี้ แกนเหล็กจะเป็นส่วนที่รับน้ำหนักของขดลวดทั้งหมด โดยแคลมป์นี้จะทำการต่อลงดินเช่นเดียวกับแกนเหล็ก ดังนั้นการออกแบบแคลมป์จึงต้องคำนึงถึงระยะความปลอดภัยระหว่างแคลมป์กับขดลวดแรงสูงด้วย

การเรียงแผ่นเหล็กนั้นจะนำแผ่นเหล็กที่ทำการตัดเสร็จแล้วมาเรียงกันตามแบบการเรียงเหล็ก โดยทำการเรียงทั้งหมด 3 ชุด ตามที่ได้ออกแบบไว้ จากนั้นจึงนำแคลมป์มาบีบแกนเหล็กเพื่อไม่ให้แผ่นเหล็กหลุดออกจากกัน และใช้ผ้าดิบพันรอบแกนเหล็กแล้วทาด้วยวานิช เพื่อให้แกนเหล็กคงสภาพเดิมและเกิดความแข็งแรงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แคลมป์ที่ยึดกับแกนเหล็ก

### 3.8.2 การพันขดลวดแรงต่ำ

การพันขดลวดแรงต่ำขั้นแรกนั้นจะมีการหักสายลวดให้มีลักษณะตั้งฉาก เพื่อนำสายต่อเข้าที่ขั้วแรงต่ำ บริเวณที่มีการหักสายนี้จะมีการพันผ้าดิบ เพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่างขดลวดแรงต่ำ แสดงได้ดังรูปที่ 3.16



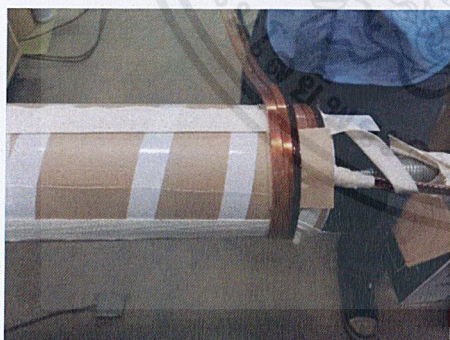
รูปที่ 3.15 mandrel ของขดลวดแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 พันผ้าดิบรอบขดลวดแรงต่ำ

จากนั้นทำการพันลวดตามแบบ โดยเริ่มจากใช้กระดาษกราฟหนา 1.6 mm พันรอบ mandrel เป็นทรงกระบอก 1 ชั้น และเริ่มพันขดลวดแรงต่ำโดยจะใช้ขดลวด 2 ชุด คือ ขดลวดทองแดงเปลือยและหุ้มฉนวน โดยขดลวดหุ้มฉนวนจะทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรระหว่างขดลวดทองแดงเปลือย หลังจากนั้นพันให้ครบ 44 รอบ จะได้ 1 ชั้น และพันกระดาษกราฟหนา 0.5 mm หักอีก 2 รอบ เพื่อเป็นฉนวนกันระหว่างชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 แล้วจึงเริ่มพันขดลวดแรงต่ำชั้นที่ 2 จำนวน 44 รอบ เมื่อพันขดลวดครบ 2 ชั้น รวมเป็น 88 รอบ ก็ให้นำเฟรสบอร์ด ขนาด 3.2 mm มาเรียงซ้อนกันจำนวน 18 ชั้น ให้มีขนาดประมาณ 60 mm ทำเป็นจำนวนทั้งสิ้น 10 ชั้น มาวางต่อรอบๆกระดาษกราฟที่หุ้มขดลวดแรงต่ำ เพื่อใช้เป็นร่องน้ำมันระบายความร้อน แล้วจึงปิดด้วยกระดาษกราฟหนา 1.6 mm จำนวน 2 ชั้น และกระดาษฉนวนหนา 0.5 mm จำนวน 10 ชั้น โดยเหลือปลายสายไว้ โดยจะทำขดลวดแรงต่ำทั้งหมด 2 ชุด



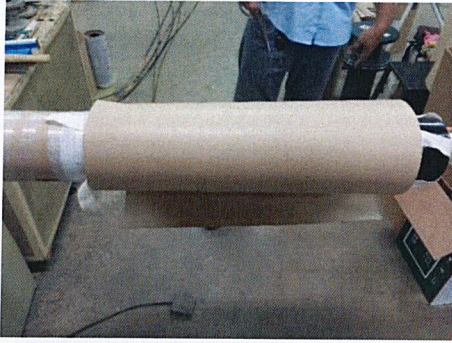
(ก)



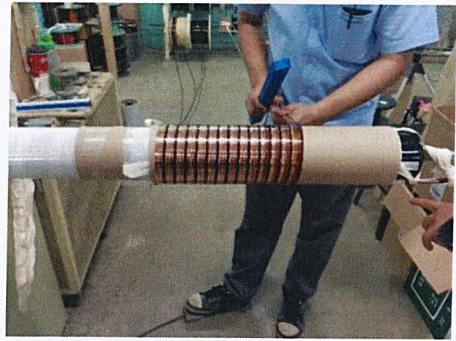
(ข)

รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการพันขดลวดแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)



(ช)

### รูปที่ 3.17 (ต่อ) ขั้นตอนการพันขดลวดแรงต่ำ

- (ก) เริ่มพันขดลวดแรงต่ำ
- (ข) พันขดลวดแรงต่ำครบ 1 ชั้น
- (ค) พันฉนวนกระดาษกั้นระหว่างชั้นขดลวด
- (ง) พันขดลวดแรงต่ำในชั้นที่ 2
- (จ) ทำร่องน้ำมันระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ฉ) พันฉนวนหุ้มทับชั้นสุดท้าย

(ช) ขดลวดแรงต่ำ 2 ชุด

### 3.8.3 การพันขดลวดแรงสูง

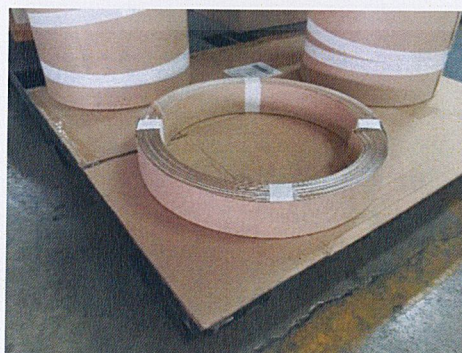
การพันขดลวดแรงสูงจะเริ่มพันบน mandrel โดยใช้กระดาษฉนวนหนา 1.6 mm หุ้มก่อน 1 ชั้น เพื่อเป็นฉนวนตั้งรูป 3.18 จากนั้นการพันขดลวดแรงสูง จะมีการพันกระดาษฉนวนหนา 0.13 mm ก่อนและหลังการพันในแต่ละชั้น



รูปที่ 3.18 กระดาษฉนวนที่พันทับ mandrel



รูปที่ 3.19 การพันขดลวดแรงสูง



รูปที่ 3.20 ขดลวดแรงสูง 1 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพันขดลวดแรงสูงสามารถแสดงได้ดังรูป 3.19 ขดลวดแรงสูงนั้นจะถูกแบ่งเป็น 8 ชุด โดยแต่ละชุดจะมีทั้งหมด 59 ชั้น ชั้นละ 170 รอบ โดยแต่ละชั้นจะถูกกั้นด้วยฉนวนกระดาษหนา 0.13 mm เพื่อป้องกันการเกิดลัดวงจรของขดลวดแรงสูงระหว่างชั้น เมื่อพันขดลวดครบ 10000 รอบ แล้วจึงลากลวดสายออกไปใช้ ดังรูป 3.20

#### 3.8.4 การสวมขดลวดลงแกนเหล็ก

วางแกนเหล็กในแนวตั้งแล้วถอดแคลมป์ด้านบนออก จากนั้นถอดแกนเหล็กด้านบนออก แล้วสวมขดลวดแรงต่ำจำนวน 2 ชุดก่อน ดังรูป 3.21 โดยรองฐานด้วยเพรสบอร์ด จากนั้นสวมขดลวดแรงสูงทับดังรูป 3.22 โดยรองด้วยเพรสบอร์ดหนา 1.6 mm จำนวน 64 แผ่น เพื่อให้มีความสูงประมาณ 102 mm จากแคลมป์ตามที่ยกแบบไว้ โดยแต่ละชุดจะกั้นด้วยฉนวนเพรสบอร์ด จำนวน 20 แผ่น หรือประมาณ 32 mm เมื่อใส่ขดลวดแรงสูงครบ 8 ชุด จะกั้นด้วยเพรสบอร์ดอีกจำนวน 64 แผ่น เพื่อให้ขดลวดแรงสูงห่างจากแคลมป์ทั้งด้านบนและด้านล่างเท่ากัน จากนั้นจึงเรียงแกนเหล็กปิดด้านบน ดังรูป 3.23 และใส่แคลมป์กลับเข้าที่เดิม



รูปที่ 3.21 สวมขดลวดแรงต่ำลงแกนเหล็ก



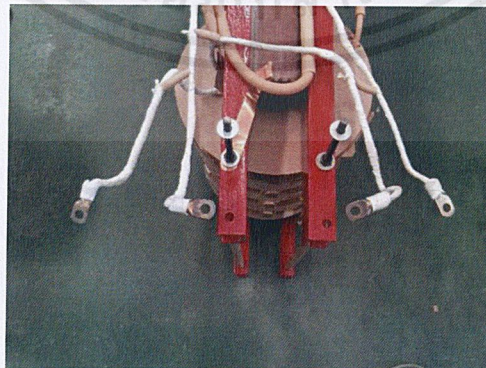
รูปที่ 3.22 สวมขดลวดแรงสูงครอบขดลวดแรงต่ำ



รูปที่ 3.23 เรียงแกนเหล็กปิดด้านบน

### 3.8.5 การต่อข้อสาย

การต่อข้อสายจะต่อทั้งทางด้านแรงต่ำและแรงสูง ในการต่อข้อสายด้านแรงต่ำนั้น จะต่อสายจากปลายขดลวดไปเข้าที่ข้อแรงต่ำบนฝาดัง ดังรูปที่ 3.24 และทางด้านแรงสูงจะมี 2 ข้อ ด้านหนึ่งต่อลงตัวถัง อีกด้านจะต่อเข้าปลอกฉนวนนำสายของหม้อแปลง ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.24 ข้อสายด้านแรงต่ำ



รูปที่ 3.25 ขั้วสายต้านแรงสูง

เมื่อทำการต่อสายทั้งหมดเรียบร้อยแล้วก็จะนำไส้หม้อแปลงดังรูปที่ 3.26 เข้าตู้อบเพื่อไล่ความชื้นที่อยู่ในชั้นฉนวนของขดลวดเพราะ เมื่อใช้งานหม้อแปลงความชื้นในฉนวนจะออกมาผสมน้ำมันและความชื้นเหล่านี้เป็นสาเหตุของการดิสชาร์จบางส่วนและนำไปสู่การเบรกดาวน์ในที่สุด โดยจะทำการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง



รูปที่ 3.26 ไส้หม้อแปลง



รูปที่ 3.27 ตู้อบหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8.6 ประกอบตัวถัง ปิดฝาและเติมน้ำมัน

เมื่อทำการอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว เราจะนำไส้ของหม้อแปลงออกมาทำการประกอบเข้าตัวถัง จากนั้นจึงเติมน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งการเติมน้ำมันหม้อแปลงนี้จะทำในห้องสุญญากาศ เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศแทรกอยู่ภายในฉนวนกระดาษและน้ำมัน โดยฟองอากาศเหล่านี้เป็นสาเหตุของการเกิดดีสชาร์จบางส่วนและนำไปสู่การเบรกดาวน์ แต่ในการเติมน้ำมันจะยังไม่ได้อายุขัยเนื่องจากบุชซึ่งมีขนาดสูงกว่าห้องสุญญากาศ เมื่อเติมน้ำมันจนเสร็จจะใส่บุชซึ่งลงในตัวถังและนำปลายสายขดลวดแรงสูงขึ้นมาด้านบนแล้วเติมน้ำมันลงในบุชซึ่ง



รูปที่ 3.28 นำไส้ใส่ตัวถังโลหะ



รูปที่ 3.29 นำหม้อแปลงเข้าห้องสุญญากาศและเติมน้ำมัน



รูปที่ 3.30 หม้อแปลงที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

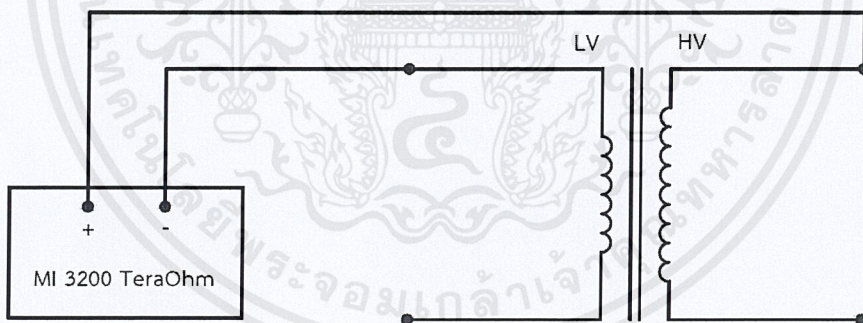
## บทที่ 4 การทดสอบ

การทดสอบหม้อแปลงที่ประกอบสร้างขึ้นเพื่อตรวจสอบว่าลักษณะคุณสมบัติของหม้อแปลงเป็นไปตามที่ออกแบบหรือไม่ แต่เนื่องจากไม่มีมาตรฐานสำหรับหม้อแปลงทดสอบโดยตรง ฉะนั้นการทดสอบจะทำตามมาตรฐาน IEC Plub.No.76-1976 Power Transformers และ IEC Plub.No. 60-2-1994 High Voltage Test Technique บางรายการและเพิ่มเติมบางรายการดังนี้

- 1) การวัดความต้านทานฉนวน
- 2) การวัดอัตราส่วนแรงดันและตรวจสอบขั้ว
- 3) การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด
- 4) การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะลัดวงจร

### 4.1 การวัดค่าความต้านทานฉนวน

การวัดค่าความต้านทานฉนวนใช้เครื่อง MI 3200 TeraOhm 10 kV โดยจะทำการวัดในส่วนของฉนวนที่กั้นอยู่ของระหว่างขดลวดแรงต่ำกับขดลวดแรงสูง ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ และ ขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ซึ่งมีวงจรการทดสอบตามรูป 4.1



รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบความต้านทานฉนวนระหว่างขั้วแรงต่ำกับขั้วแรงสูง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานฉนวน

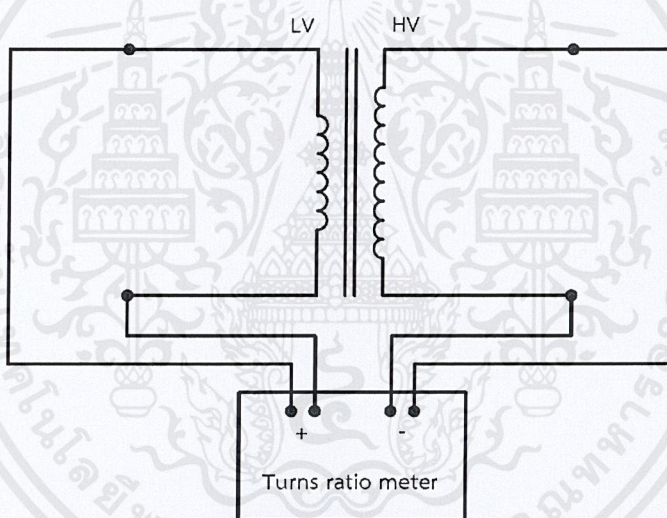
ขั้วไฟฟ้า 1	ขั้วไฟฟ้า 2	ค่าความต้านทานก่อนอบ (MΩ)	ค่าความต้านทานที่คงที่แล้ว (GΩ)
ขั้วแรงต่ำ	กราวด์	11	2.49
ขั้วแรงสูง	กราวด์	9.31	1.8
ขั้วแรงต่ำ	ขั้วแรงสูง	137	4.89

ในการทำการทดสอบค่าความฉนวนนั้น ใช้ระดับแรงดันขนาด 3000 V ในการทดสอบ โดยจะทดสอบเปรียบเทียบระหว่างขั้ว 2 ขั้ว โดยขั้วแรกจ่ายแรงดัน 3000 V และขดที่สอง 0 V เพื่อวัดความเป็นฉนวนที่กั้นอยู่ระหว่างขั้ว 2 ขั้วนั้น และในกรณีที่วัดค่าความเป็นฉนวนที่กั้นระหว่างขั้วไฟฟ้ากับกราวด์ จะจ่ายแรงดัน 3000 V ที่ขดลวด และ 0 V ที่กราวด์

หลังจากการอบ 48 ชั่วโมง และ การเติมน้ำมันหม้อแปลงลงไป จะทำให้ค่าความเป็นฉนวนเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากความชื้นในขดลวด และ กระจายฉนวน จะระเหยออกไปในขณะทำการอบ

#### 4.2 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนแรงดัน

Turns ratio meter เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการหาค่าอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลง ดังรูป 4.3 จากการทดสอบจะต่ออนุกรมที่ขั้วแรงต่ำ ซึ่งทำให้หม้อแปลงมีพิกัด 440 V / 200 kV โดยมีวงจรการทดสอบตามรูป 4.2 ดังนั้นค่าอัตราส่วนแรงดันในทางทฤษฎีสามารถคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ 4.2 วงจรการทดสอบหาค่าอัตราส่วนแรงดัน



รูปที่ 4.3 วงจรการทดสอบหาค่าอัตราส่วนแรงดันโดยใช้ Turns ratio meter

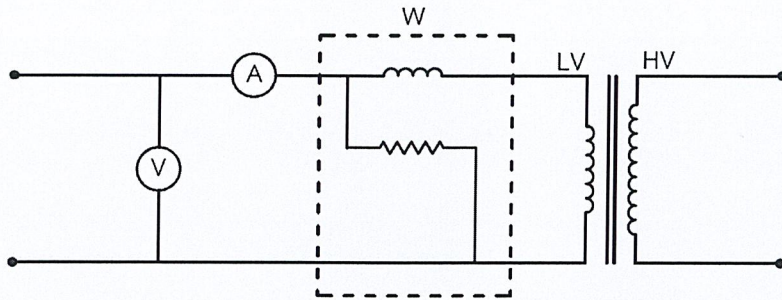
$$\begin{aligned}
 \text{ค่าอัตราส่วนแรงดันในทางทฤษฎี} &= \frac{\text{แรงดันด้านขั้วแรงสูง}}{\text{แรงดันด้านขั้วแรงต่ำ}} \\
 &= \frac{200000}{440} \\
 &= 454.55
 \end{aligned}$$

$$\text{ค่าอัตราส่วนแรงดันในทางปฏิบัติ} = 458.14$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น ค่าความคลาดเคลื่อน} &= \frac{458.14 - 454.55}{454.55} \times 100 \% \\
 &= 0.79 \%
 \end{aligned}$$

#### 4.3 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด

การทดสอบกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด ทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) ซึ่งการทดสอบนี้ จะต่ออนุกรมที่ขั้วแรงต่ำ และเปิดวงจรที่ด้านแรงสูง แล้วทำการปรับแรงดันที่ด้านแรงต่ำให้ได้เท่ากับพิกัดของหม้อแปลงหรือ 440 V นั้นเอง โดยมีวงจรการทดสอบดังรูป 4.4



รูปที่ 4.4 วงจรการทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด

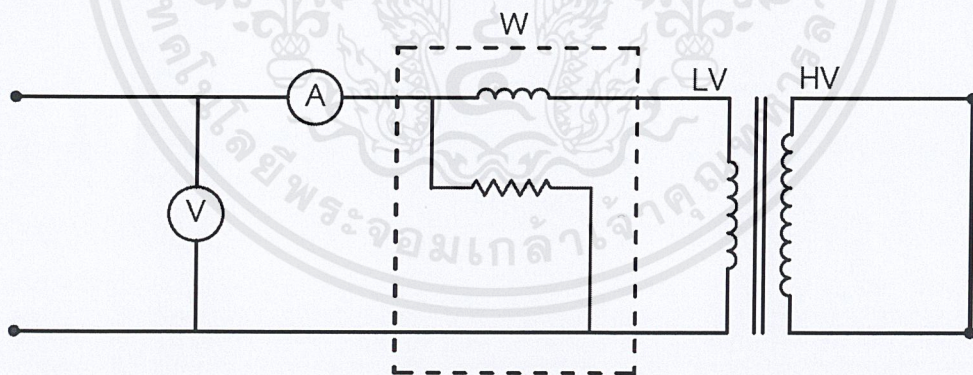
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด

$V_{oc}$ (V)	$I_{oc}$ (A)	$P_{oc}$ (W)
440	2.81	108

ดังนั้น ค่ากำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดเท่ากับ 108

#### 4.4 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะลัดวงจร

การทดสอบกำลังสูญเสียขณะลัดวงจร ทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียในขดลวด (Copper loss) ซึ่งการทดสอบนี้ จะต่ออนุกรมที่ขั้วแรงต่ำ และลัดวงจรที่ด้านแรงสูง แล้วทำการปรับแรงดันที่ด้านแรงต่ำจนกระทั่งได้กระแสเท่ากับพิกัดของหม้อแปลงหรือเท่ากับ 45.45 A โดยมีวงจรการทดสอบ ดังรูป 4.5



รูปที่ 4.5 วงจรการทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะลัดวงจร

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะลัดวงจร

$I_{sc}$ (A)	$V_{sc}$ (V)	$P_{sc}$ (W)
45.45	41.72	444

ดังนั้น ค่ากำลังสูญเสียในขดลวดเท่ากับ 444 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

หม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบและประกอบสร้างขึ้นเป็นแบบถังโลหะจุ่มน้ำมัน กระจายคราฟท์และเพอร์สบอร์ดเป็นฉนวนระหว่างชั้นขดลวด น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนแทรกซึมและระบายความร้อน ในการออกแบบหม้อแปลงนี้ได้ทำการออกแบบเพื่อใช้ในการทดสอบวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ทางไฟฟ้าแรงสูงที่ระดับแรงดัน 200 kV 20 kVA หม้อแปลงที่ได้ทำการประกอบสร้างได้ผ่านการทดสอบดังนี้ วัดค่าความต้านทานของฉนวน, วัดค่าอัตราส่วนแรงดัน, วัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสไม่มีโหลด, วัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีโหลด และการทดสอบขึ้นแรงดัน 100 kV นาน 1 นาที ปรากฏว่าหม้อแปลงทดสอบนี้มีคุณสมบัติและมีคุณภาพตามที่ได้ออกแบบไว้ทุกประการ ประการสำคัญคือ สามารถสร้างแรงดันสูงได้ตามที่กำหนดเพื่อสามารถนำไปทดสอบแฟลชโอเวอร์ของลูกถ้วย ในระดับแรงดัน 100 kV ซึ่งมีค่าที่กำหนดและรายละเอียดโครงสร้างดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 ค่ากำหนดหม้อแปลง

ค่ากำหนด	หม้อแปลง 1 ตัว
กำลังไฟฟ้า $S_n$ , kVA	20
แรงดัน – แรงดันต่ำ $U_1$ , V	220
แรงดันสูง $U_2$ , kV	100/200
กระแส – แรงดันต่ำ $I_1$ , A	45.45
แรงดันสูง $I_2$ , A	0.1
ความถี่ $f$ , Hz	50

ตารางที่ 5.2 ผลของการทดสอบ

รายละเอียด	หม้อแปลงทดสอบ
ก) อัตราส่วนแรงดันของขดลวด - แรงดันสูง : แรงดันต่ำ	458.14
ข) การทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะลัดวงจร	444 W
ค) การทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด	108 W
ง) ทดสอบการคงทนแรงดัน 200 kV นาน 1 นาที	ผ่าน

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

เนื่องจากว่าได้รับการสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์และบุคลากรจากทางบริษัท Lamool Transformer Co., Ltd ซึ่งการสร้างหม้อแปลงนี้มีลักษณะเฉพาะแตกต่างออกไปจากหม้อแปลงที่บริษัทนั้นผลิต จึงทำให้ในการจัดเตรียมของและการออกแบบใช้เวลาานกว่าที่กำหนด ขดลวดด้านแรงสูงจำเป็นต้องทำการสั่งเพิ่มเนื่องจากที่บริษัทนั้นไม่มีเส้นทองแดงตามขนาดที่ออกแบบทำให้เกิดการล่าช้ามาก และอีกทั้งบริษัทนั้นไม่สามารถสร้างบุชชิ่งได้จึงต้องทำการหาบุชชิ่งมาใช้ จึงทำให้ใช้เวลาในการหาเกินกว่าเวลาที่ตั้งไว้ ในช่วงระหว่างการพันขดลวดทางแรงดันสูงนั้น เนื่องจากที่ออกแบบมีพื้นที่หน้าตัดเล็กและจำนวนรอบในแต่ละชั้นมีมากถึง 10000 รอบ ทำให้เกิดความยากลำบากในการพัน และใช้เวลาในการพันนาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] จักรกฤษณ์ อธิธิยาภรณ์ และคณะ, การออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบพิกัด 100 kV 10 kVA, **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [2] สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, มีนาคม 2549.
- [3] ปากร ศรีธรรม และคณะ, การประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบพิกัด 200 kV 10 kVA และชุดควบคุม, **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [4] วัฒนกิจ ช่างพินิจ และคณะ, การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 150 kVA, **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [5] IEC 60060-1, **High-voltage test techniques, Part 1, General definitions and test requirements**. 2010-09
- [6] Charoenchai Transformer Co.,Ltd., การเลือกใช้เทคโนโลยีและเครื่องจักรที่ทันสมัยในกระบวนการผลิต, (ออนไลน์), แหล่งที่มา : <http://charoenchai.com/product-quality-03.html> (8 ธันวาคม 2558)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 200 kV 20 kVA

### Design and Construction of a Testing Transformer 200 kV 20 kVA

วรากร ชลปฐมพิบูลเลิศ ศาสตราจารย์เสถียรสามัคคี อธิศ เลหาวัฒน์เสรี อนรรฆ กัมปา

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: k\_anuk\_kumba@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

โครงการงานฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและการสร้างหม้อแปลงทดสอบแบบจุ่มน้ำมันขนาด 20 kVA 200 kV ถูกวิเคราะห์โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการกระจายและความเครียดสนามไฟฟ้าในแต่ละจุดของหม้อแปลงทดสอบ ซึ่งหม้อแปลงทดสอบด้านแรงสูงมี 2 ระดับแรงดันคือ 100 kV ต่อนุกรมและ 200 kV ต่อขานที่ด้านขั้วแรงต่ำ หม้อแปลงทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด IEC 60076 เช่น การวัดความต้านทานฉนวน, การทดสอบขั้วและอัตราส่วนแรงดันของขดลวด, การวัดค่าสูญเสียกำลังไฟฟ้ามีโหลดและไม่มีโหลด, การทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำที่ทักัด 200 kV และการทดสอบวาวไฟตามผิวขนาด 100 kV ของฉนวนถูกด้วยไฟฟ้า โดยหม้อแปลงผ่านการทดสอบและปราศจากการเกิดความร้อนของไฟฟ้า การออกแบบและสร้างหม้อแปลงจัดทำขึ้นซึ่งมีจุดประสงค์นำไปใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการทดสอบวาวไฟตามผิวแรงดันขนาด 100 kV และการทดสอบความคงทนต่อแรงดันขนาด 200 kV

**คำสำคัญ** หม้อแปลงทดสอบ, การสร้างหม้อแปลง, ตัวถังโลหะแบบจุ่มน้ำมัน, 200 kV 20 kVA, การทดสอบวาวไฟตามผิว

#### Abstract

This project presents design and construction of a 20-kVA 200-kV oil-immersed testing transformer. The electric field stress of the testing transformer calculated by the finite element method (FEM) was employed in design. There are two options in low voltage winding connections. One is that two low voltage winding is connected in parallel and the voltage of the high voltage winding can increase upto 200 kV. The other is that two low voltage winding is connected in series and the voltage of the high voltage winding can increase upto 100 kV. The transformer was tested according to the IEC 60076 in the following topics, i.e. winding resistance measurement, turn ratio measurement, load loss test, no-load loss test, induced voltage test at the rating voltage of 200 kV, flashover test on an insulator at the voltage of about 100 kV, and

so on. The transformer can pass all tests without damage. It can be concluded that the developed transformer can be used as the testing transformer in the high-voltage laboratory, KMITL for flashover test upto the voltage of 100 kV and withstand voltage test upto the voltage of 200 kV.

**Keyword** Insulator test, Adjust voltage, 200 kV 20 kVA, Voltage control, AC control unit

#### 1. บทนำ

ในปัจจุบันการทดสอบวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ทางไฟฟ้าแรงสูง ภายในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีการทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ โดยหม้อแปลงทดสอบ เช่น ถูกด้วยฉนวนไฟฟ้า หม้อแปลงวัดกระแส และ หม้อแปลงวัดแรงดัน ซึ่งหม้อแปลงทดสอบที่มีอยู่ไม่สามารถทดสอบวาวไฟตามผิวได้ตามจุดประสงค์การทดสอบ ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบที่มีคุณสมบัติตามต้องการ

#### 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1 นิยามหม้อแปลงทดสอบ [1]

หม้อแปลงทดสอบเป็นหม้อแปลงที่ใช้สร้างแรงดันสูงสำหรับการทดสอบวัสดุฉนวนหรืออุปกรณ์ที่จะนำไปใช้ในระบบส่งจ่ายแรงสูง เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ที่ใช้ในงานด้านไฟฟ้าแรงสูง อุปกรณ์วัดแรงดันและกระแสที่ระดับแรงสูง วินิจฉัยปัญหาความประเอื้อนของฉนวนด้วยฉนวน วัดดิสร่างบางส่วนในวัสดุฉนวนก๊าซ ฉนวนเหลว และฉนวนแข็ง หรือผสมกัน แรงดันของหม้อแปลงทดสอบสามารถปรับแรงดันได้ตั้งแต่ค่าต่ำๆ ขึ้นไปจนถึงค่าที่ต้องการ หม้อแปลงทดสอบส่วนใหญ่จะเป็นหนึ่งเฟส มีกำลังไฟฟ้าต่ำเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแต่มีแรงดันสูง แรงดันทางด้านจ่ายออกสามารถปรับโดยปรับแรงดันทางด้านแรงดันต่ำ ด้วยหม้อแปลงปรับแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2 โครงสร้างและการฉนวนหม้อแปลงทดสอบ

#### 1) หม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน [1]

ขดลวด แกนเหล็ก และส่วนประกอบทั้งหมดจะจุ่มอยู่ในน้ำมัน ซึ่งบรรจุอยู่ในถังโลหะ หรือถังฉนวน ในกรณีที่ใช้ถังโลหะ จำเป็นต้องใช้ปลอกฉนวนนำสายแรงสูงออกมาออกถัง และปลอกฉนวนตัวนำจะเป็นแบบเก็บประจุ ถ้าใช้ตัวถังฉนวนจะไม่ต้องใช้ปลอกฉนวนนำสายออกมาด้านนอก การใช้หม้อแปลงแบบถังโลหะจะมีข้อดีระบายความร้อน แต่ต้องการที่ว่างมากกว่า เพราะมีปลอกฉนวนตัวนำถ้าเป็นแบบตัวถังฉนวนการถ่ายเทความร้อนได้ยากกว่า ฉะนั้นการออกข้อกำหนดจึงต้องพิจารณาถึงลักษณะการใช้งาน



รูปที่ 1 หม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมันตัวถังโลหะ

#### 2) น้ำมันหม้อแปลง [2]

น้ำมันหม้อแปลงนำมาใช้เป็นฉนวนภายใน โดยน้ำมันหม้อแปลงนั้นทำหน้าที่เป็นฉนวนแทรกซึมและช่วยในการระบายความร้อน

#### 3) กระดาษฉนวน

กระดาษฉนวนใช้เป็นฉนวนระหว่างชั้นขดลวดระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำและระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก กระดาษฉนวนที่ใช้กันทั่วไปคือ กระดาษคราฟท์ และเพรสบอร์ด

#### 4) ขดลวด [2]

ขดลวดพันด้วยเส้นลวดอบน้ำยาฉนวน ซึ่งทนน้ำมันได้ดี มีความเหนียวยืดหยุ่นเป็นพิเศษ ทนต่อการขัดถู

#### 5) แกนเหล็ก

แกนเหล็กจะทำหน้าที่เป็นทางของเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อให้เกิดความเหนียวทางแม่เหล็ก โดยพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก จำนวนรอบขดลวดและแรงดันจะสัมพันธ์ตามสมการ 2.1

#### 6) ตัวถัง

ตัวถังโลหะจะทำหน้าที่รับแรงทางกลที่เกิดจากน้ำมันของหม้อแปลงและทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการระบายความร้อนที่เกิดจากกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง

#### 7) ปลอกฉนวนนำสาย

ปลอกฉนวนนำสายทำหน้าที่เป็นฉนวนกั้นระหว่างส่วนที่เป็นแรงสูงกับส่วนที่ต่อลงดิน

### 3. การออกแบบและประกอบสร้าง

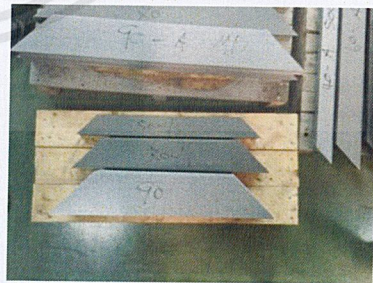
ค่ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบ

กำลังไฟฟ้า (Sn)	=	20	kVA
แรงดันป้อนเข้า (U1)	=	220	V
แรงดันจ่ายออก (U2)	=		
- อนุกรมต้านแรงต่ำ	=	100	kV
- ต่อขนานต้านแรงต่ำ	=	200	kV
กระแสป้อนเข้า (I1)	=	45.45	A
กระแสจ่ายออก (I2)	=	0.1	A
จำนวนเฟส	=	1	Phase
ความถี่ (f)	=	50	Hz

หม้อแปลงมีส่วนประกอบหลักเป็น แกนเหล็ก ขดลวด ตัวถัง และบุชซึ่ง จะนำมาประกอบกันเป็นหม้อแปลง โดยจะมีน้ำมันและกระดาษเป็นฉนวนของหม้อแปลง

#### 1) แกนเหล็ก

แกนเหล็กทำมาจากเหล็กม้วน M-4 โดยในการตัดแกนเหล็กนั้นจะใช้เครื่องตัดเหล็ก โดยทำการตัดให้มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เหล็กแผ่นที่ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว

การเรียงแผ่นเหล็กที่ทำการตัดเสร็จแล้วมาเรียงกันตามแบบการเรียงเหล็ก โดยทำการเรียงทั้งหมด 3 ชุด ตามที่ได้ออกแบบไว้ จากนั้นจึงนำแคลมป์มาบีบแกนเหล็กเพื่อไม่ให้แผ่นเหล็กหลุดออกจากกัน และ

ใช้ผ้าดิบพันรอบแกนเหล็กแล้วทาด้วยวานิช เพื่อให้แกนเหล็กคงสภาพเดิมและเกิดความแข็งแรงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แคลมป์ที่ยึดกับแกนเหล็ก

2) การพันขดลวดแรงต่ำ

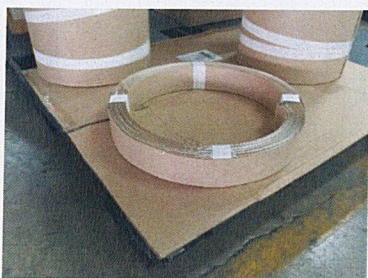
การพันขดลวดแรงต่ำจะใช้ขดลวด 2 ชุด คือ ขดลวดทองแดงเปลือยและหุ้มฉนวน โดยขดลวดหุ้มฉนวนจะทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรระหว่างขดลวดทองแดงเปลือย เมื่อพันขดลวดครบ 2 ชั้น รวมเป็น 88 รอบ ก็จะนำเพรสออร์คมาเรียงซ้อนกัน เพื่อใช้เป็นร่องน้ำมันระบบความร้อน แล้วจึงปิดด้วยกระดาษกราฟที่หนา โดยเหลือปลายสายไว้ โดยจะทำขดลวดแรงต่ำทั้งหมด 2 ชุดดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขดลวดแรงต่ำ 2 ชุด

3) การพันขดลวดแรงสูง

ขดลวดแรงสูงนั้นจะถูกแบ่งเป็น 8 ชุด โดยแต่ละชุดจะมีทั้งหมด 59 ชั้น ชั้นละ 170 รอบ โดยแต่ละชั้นจะถูกกั้นด้วยกระดาษฉนวนเพื่อป้องกันการเกิดลัดวงจรของขดลวดแรงสูงระหว่างชั้น เมื่อพันขดลวดครบ 10000 รอบ แล้วจึงลากสายออกไปใช้ดังรูป 5



รูปที่ 5 ขดลวดแรงสูง 1 ชุด

4) การสวมขดลวดลงแกนเหล็ก

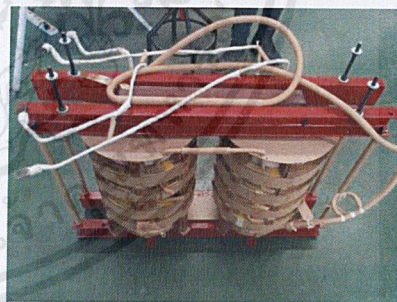
วางแกนเหล็กในแนวตั้งแล้วถอดแคลมป์ด้านบนออก จากนั้นถอดแกนเหล็กด้านบนออก แล้วสวมขดลวดแรงต่ำจำนวน 2 ชุดก่อน จากนั้นสวมขดลวดแรงสูงทับ โดยแต่ละชุดจะกั้นด้วยเพรสออร์ค เมื่อใส่ขดลวดแรงสูงครบ 8 ชุด จากนั้นจึงเรียงแกนเหล็กปิดด้านบนและใส่แคลมป์กลับเข้าที่เดิม



รูปที่ 6 เรียงแกนเหล็กปิดด้านบน

5) การต่อขั้วสาย

ขดลวดแรงต่ำจะต่อสายออกจากฝาด้านบนทางด้านแรงต่ำ ซึ่งทางด้านแรงสูงจะมี 2 ขั้ว ด้านหนึ่งต่อลงตัวถัง อีกด้านจะต่อเข้าบูชซึ่งของหม้อแปลง เมื่อทำการต่อสายทั้งหมดเรียบร้อยแล้วก็นำไส้หม้อแปลง เข้าคู่อบเพื่อไล่ความชื้นที่อยู่ในชั้นฉนวนของขดลวด โดยจะทำการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง



รูปที่ 7 ไส้หม้อแปลง

6) ประกอบตัวถัง ปิดฝาและเติมน้ำมัน

นำไส้ของหม้อแปลงออกมาทำการประกอบเข้าตัวถัง จากนั้นจึงเติมน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งการเติมน้ำมันหม้อแปลงนี้จะกระทำในห้องสุญญากาศ เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศแทรกอยู่ในฉนวนกระดาษและน้ำมัน โดยฟองอากาศเหล่านี้เป็นสาเหตุของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนและนำไปสู่การเบรกดาวน



รูปที่ 8 หม้อแปลงที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว

4. การทดสอบ

การทดสอบหม้อแปลงที่ประกอบสร้างขึ้นเพื่อตรวจสอบว่า ลักษณะคุณสมบัติของหม้อแปลงเป็นไปตามที่ออกแบบหรือไม่

4.1 การวัดค่าความต้านทานฉนวน

การวัดค่าความต้านทานฉนวน โดยจะทำการวัดในส่วนของฉนวนที่กั้นอยู่ระหว่างขดลวดแรงต่ำกับขดลวดแรงสูง ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ และ ขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานฉนวน

ขั้วไฟฟ้า 1	ขั้วไฟฟ้า 2	ความต้านทานก่อนอบ (MΩ)	ความต้านทานหลังอบ (GΩ)
ขั้วแรงต่ำ	กราวด์	11	2.49
ขั้วแรงสูง	กราวด์	9.31	1.8
ขั้วแรงต่ำ	ขั้วแรงสูง	137	4.89

4.2 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนแรงดัน

ค่าอัตราส่วนแรงดันในทางทฤษฎีสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\frac{\text{แรงดันด้านขั้วแรงสูง}}{\text{แรงดันด้านขั้วแรงต่ำ}} = \frac{100000}{220} = 454.55$$

$$\text{ค่าอัตราส่วนแรงดันในทางปฏิบัติ} = 458.14$$

$$\text{ดังนั้น ค่าความคลาดเคลื่อน} = 0.79 \%$$

4.3 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด

การทดสอบกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด ทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก ผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด

V <sub>oc</sub> (V)	I <sub>oc</sub> (A)	P <sub>oc</sub> (W)
<del>220</del> 440	2.81	108

4.4 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะลัดวงจร

การทดสอบกำลังสูญเสียขณะลัดวงจร ทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียในขดลวด ซึ่งผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะลัดวงจร

I <sub>sc</sub> (A)	V <sub>sc</sub> (V)	P <sub>sc</sub> (W)
<del>0.1</del> 45.45	41.72	444

5. สรุปผล

ในการออกแบบหม้อแปลงทดสอบนี้ ได้ทำการออกแบบเพื่อที่ใช้งานที่ระดับแรงดัน 200 kV 20 kVA หม้อแปลงที่ได้ทำการประกอบสร้างได้ผ่านการทดสอบครั้งนี้ วัดค่าความต้านทานของฉนวน, วัดค่าอัตราส่วนแรงดัน, วัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสไม่มีโหลด, วัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีโหลด และการทดสอบขึ้นแรงดัน 100 kV นาน 1 นาที ปรากฏว่าหม้อแปลงทดสอบนี้มีคุณสมบัติและมีคุณภาพตามที่ได้ออกแบบไว้ทุกประการ ประการสำคัญคือ สามารถสร้างแรงดันสูงได้ตามที่กำหนดเพื่อสามารถนำไปทดสอบแฟลชโอเวอร์ของลูกถ้วยใน ระดับแรงดันขนาด 100 kV

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยูธโกวิท, ผศ.วรกัลป์ ลิ้มเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช คุณปณชวีร์ ฉายศิริ และ นายณัฐพล มุกทัต ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำโครงการด้วยดีมาโดยตลอด

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] สาร์วย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, มีนาคม 2549.
- [2] ปากร ศรีธรรม และคณะ, การประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบพิกัด 200 kV 10 kVA และชุดควบคุม, ปริญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.



ภาคผนวก ข  
ข้อมูลอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FM-EN-10 แบบเดิมมีสายพันบนเส้นไฟฟ้า 1-Phase, 3-Phase, Standalone Core และบนแกนเหล็กคาน และ เฟอร์ไรต์

	เลขที่แบบ	เลขที่งาน	จำนวน (เครื่อง)	กำหนดเสร็จ	วันที่เขียนแบบ	<input checked="" type="checkbox"/> งานผลิต
	TR-8379				21 มีนาคม 2559	<input type="checkbox"/> งานซ่อม

รายละเอียดของสินค้า: 1-Phase Hi-Pot Testing Transformer 220V / 100-200kV, 20kVA Ins. Class A (105°C) (Cu, Fe แกน M4)

จุดต่อ	ชนิดขด	วัสดุขด	ยาว	จำนวน	ขนาดขด	รวม	สูง	รวม / ชั้น	ขนาดภายนอกสุทธิ และ ไม้ Disc
P	ปลอกสาย	-	300	11	CU (2x10)	88	1.91	46.09	2 เฟส / เครื่อง
	ปลอกสาย	-	300	12					
S	ปลอกสาย	-	300	31	CU #33	10000	58.43	171.14	8 เฟส / เครื่อง
	ปลอกสาย	-	300	32					

รวมทั้งหมด: 7111 มม. 106

TERMINALS (ขั้วต่อ)

Pri.:  Cu-Bar  AL-Bar  แกน TR-

Sec.:  Cu-Bar  AL-Bar  แกน TR-

MANDREL DIMENSIONS (ขนาดขั้ว) (มม.)

Mandrel	Ø	ยาว	เส้นผ่าศูนย์กลาง
Pri.	106.0	490.0	3.93.0
Sec.	272.0	250.0	0.97.0

TESTING (การทดสอบ) Hi-Pot, 30Sec

Maximum Ratio  
อัตรา Pri. / % Sec. 440 / 300000 V

อุณหภูมิ Testroom 30°C

Pri. Resistance	0.059943 Ω
Sec. Resistance	27328 Ω
No-Load Losses (Core losses)	136 W
No-Load Current	2.910 A / 6.18 %
กระแสรวม PRI. / % SEC.	45.45 A / 0.10 A
Load-Losses at 30°C / 75°C	434 W / 507 W
% Impedance Voltage at 75°C	10.64 %
Efficiency / Regulation at 75°C	96.88 % / 2.85 %
Inrush Current (Ipk)	16.99 kA
Hi-Pot P-B, P-S, S-B	kV

Type of core (H 1-PH Circular Core)

CORE DIAMETER (เส้นผ่านศูนย์กลาง)	105.00 มม.
X (ช่องว่างแกนเหล็ก)	90.00 มม.
Y (ช่องว่างค้ำวาง)	310.00 มม.
STACKING (ความหนา)	92.88 มม.
WH (ความสูงช่องค้ำวาง)	500.00 มม.
TH (ความกว้างแกนเหล็ก)	490.00 มม.
TW (ความสูงแกนเหล็ก)	680.00 มม.

รวมแกนค้ำวาง 1 คู่

Materials / Unit

Copper (ลวดทองแดง) PRI	200 X 10.00	=	0.00	kg
Copper (ลวดทองแดง) SEC	CU #33	=	11.54	kg
		=	33.00	kg
		=		kg

STEEL SHEET (แผ่นเหล็ก) 110.58 kg

GENERAL DIMENSIONS AND WEIGHT (ขนาดและน้ำหนัก)

W =	800.00	mm	ST-1 =	510.00	mm
D =	379.00	mm	ST-2 =	400.00	mm
H =	745.00	mm	Hole-1 =		mm
WF =	400.00	mm	Hole-2 =	10.00	mm
DF =	132.88	mm	Weight =	173.90	kg

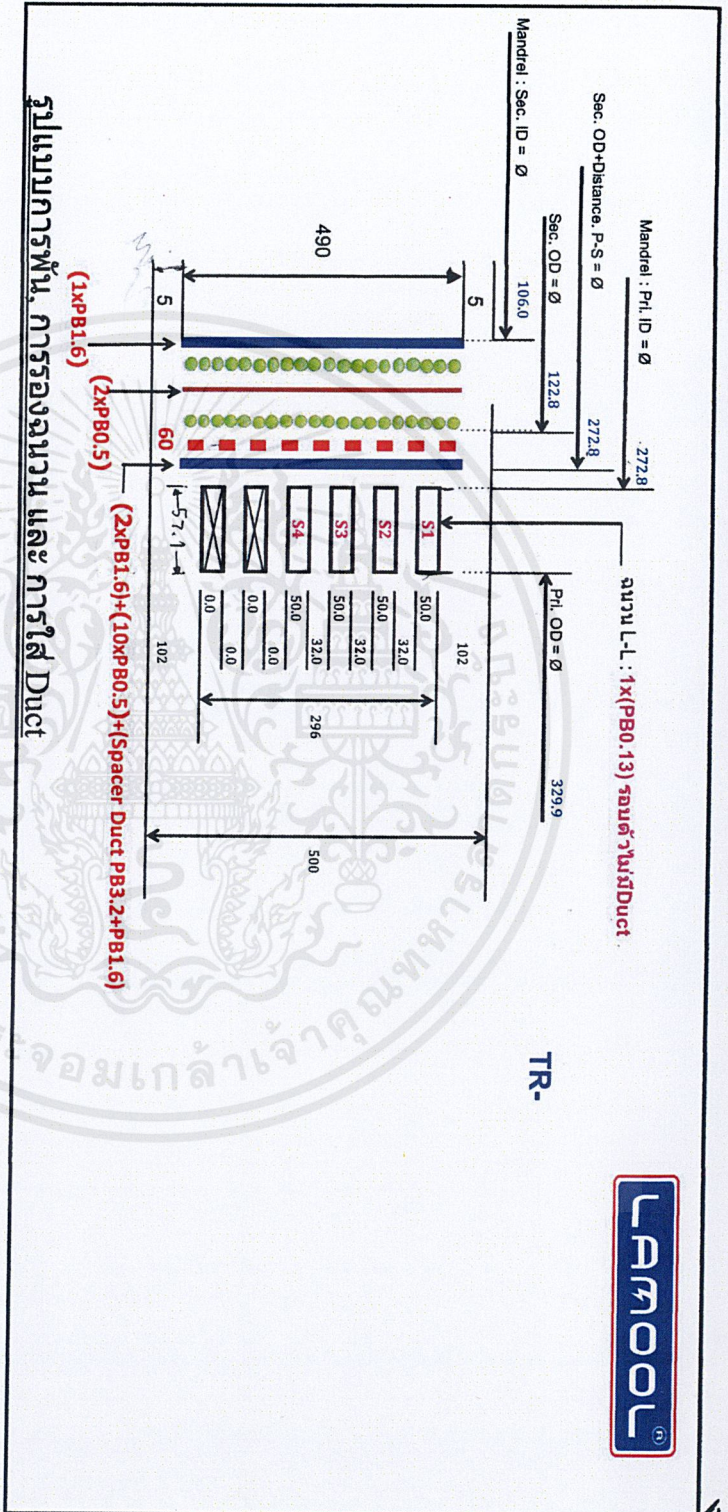
Subs:

220V / 200kV สายขั้ว A1 B1 Connect A1-B2 and B1-A2	V	=	1 ชั้น
230V / 100kV สายขั้ว A1 B1 Connect A2 B2	V	=	1 ชั้น
	V	=	1 ชั้น

รหัสเอกสาร: FM-EN-10 หน้าที่: 7 วันที่เขียน: วันที่ 20 ธันวาคม 2558

สำเนา

21-3-59



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ใบตัดแผ่นเหล็ก 1-Phase แบบแกนเหล็กกลม และ เหล็อม 45 Degree**

Design No. : TR-

(เรียงแบบทุกชั้นออกจากกึ่งกลางทั้ง Leg และ Yoke ใช้ร่วมกับแกนเหล็กเหลี่ยมแนวตั้งได้)

**SILICON STEEL CUTTING SHEET FOR 1 PHASE**

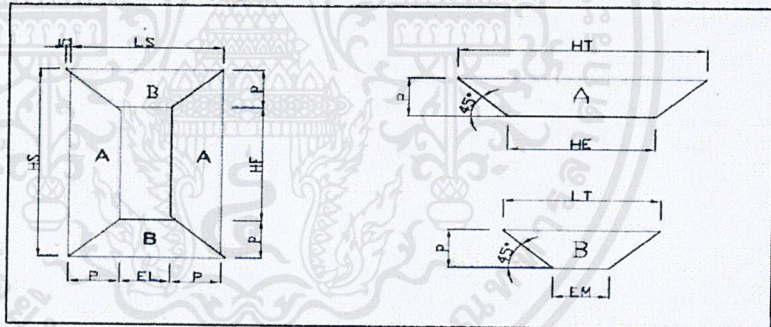
Limp Width	[P]	90.00 m.m. Distance to Diverted of Section C	5	m.m.
Window Width	[EL]	310.00 m.m. Lamination Factor	0.95	
Hight of Window	[HF]	500.00 m.m. Density of Silicon Steel	7.85	g / cm <sup>3</sup>
Center Distance		400.00 m.m. No. of step	3	steps
Total Width	[LS]	490 m.m. Thickness of Silicon Steel	0.27	m.m.
Thickness of Stacking Core		92.88 m.m. Grade of Silicon Steel	M4	

\*\* NOTE : THE LEG \* A & YOKE B \* SHELL BE CUT IN 45 DEGREE ANGLE.

SECTION	Step No.	P	HT	HE	ความหนารวมทั้งหมด (มม.)	จำนวน (ชิ้น)	น้ำหนัก (กก.)
A	1	90	675	495	108.01	400	43.60
	2	70	655	515	49.66	184	15.66
	3	50	635	535	28.10	104	6.29
	4						
	5						
	6						
	7						
	8						
	9						
	10						
<b>Weight</b>							<b>65.35</b>

SECTION	Step No.	P	LT	EM	ความหนารวมทั้งหมด (มม.)	จำนวน (ชิ้น)	น้ำหนัก (กก.)
B	1	90	495	315	108.01	400	30.12
	2	70	475	335	49.66	184	10.77
	3	50	455	355	28.10	104	4.35
	4						
	5						
	6						
	7						
	8						
	9						
	10						
<b>Weight</b>							<b>45.24</b>

TOTAL WEIGHT OF SECTION "A"	110.58	KGS
TOTAL WEIGHT OF SECTION "B"	110.58	KGS



บริษัท : 0 เซ็นโซนิค จำกัด 3 เมษายน 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การทดสอบประจำหม้อแปลงไฟฟ้า ( Routine tests)

#### Routine tests

- ก) Measurement of winding resistance
- ข) Measurement of voltage ratio and check of phase displacement
- ค) Measurement of short-circuit impedance and load loss
- ง) Measurement of no-load loss and current
- จ) Dielectric routine tests

#### การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า [1]( Routine tests)

การทดสอบหม้อแปลงเป็นสิ่งที่สำคัญ เพื่อเป็นเครื่องยืนยันถึงคุณภาพของการวิเคราะห้ออกแบบ และคุณภาพของการสร้างหรือผลิตหม้อแปลงจำหน่ายที่สร้างหรือผลิตขึ้นก็เช่นกันก็จะต้องทำการทดสอบ เพื่อตรวจสอบหาคุณสมบัติโดยทั่วไปของหม้อแปลงจำหน่าย ว่าเป็นไปตามข้อกำหนดหรือไม่ และเพื่อทำการตรวจสอบระบบและอุปกรณ์ต่างๆของหม้อแปลงด้ยว่าสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย คงทนต่อสภาวะต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้น การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เฟส มีรายละเอียดในการทดสอบดังนี้

การทดสอบประจำ (Routine Test) นี้หม้อแปลงที่ผลิตขึ้นหรือสร้างขึ้นจะต้องผ่านการทดสอบประจำทุกเครื่อง ลักษณะของการทดสอบให้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temperature) ระหว่าง 10-40 °C ผลของการทดสอบให้ปรับผลการทดสอบไปที่อุณหภูมิอ้างอิง ดังตารางที่ 1

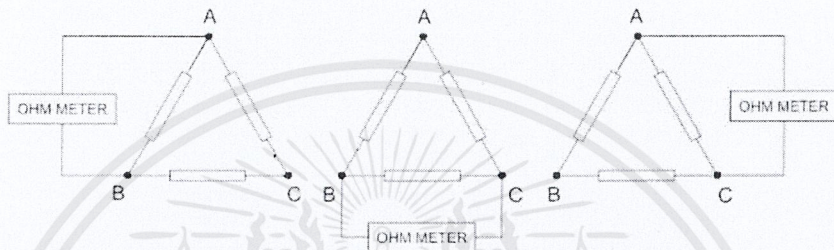
ตารางที่ 1 แสดงอุณหภูมิอ้างอิงของการปรับผลการทดสอบ

ชนิดของฉนวนแบ่งตามอุณหภูมิ	อุณหภูมิอ้างอิง (°C)
Class A,E,B	75
Class F,H	115

การทดสอบประจำมีรายละเอียดในการทดสอบดังนี้

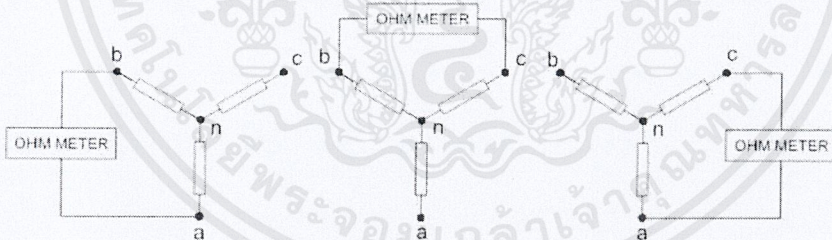
(ก) การวัดค่าความต้านทานของขดลวด (Measurement of winding resistance) สามารถแบ่งการวัดได้ 2 ลักษณะดังนี้

(1) วัดค่าความต้านทานทางด้านปฐมภูมิ (Primary) จะทำการวัดค่าความต้านทานที่ขั้วของหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิ (Primary) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การวัดค่าความต้านทานที่ขั้วของหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิ (Primary)

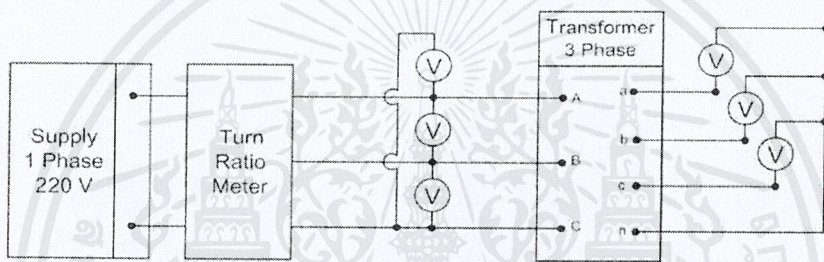
(2) วัดค่าความต้านทานด้านทุติยภูมิ (Secondary) จะทำการวัดค่าความต้านทานที่ขั้วของหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิ (Secondary) ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การวัดค่าความต้านทานที่ขั้วของหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิ (Secondary)

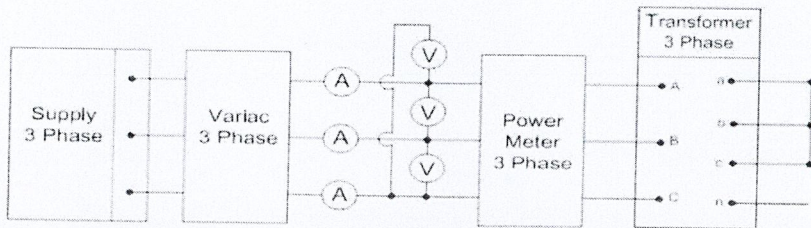
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) การวัดค่าอัตราส่วนแรงดันและตรวจสอบสัญลักษณ์เฟสหรือเวกเตอร์กรุป (Measurement of voltage ratio and check of phase displacement) การวัดอัตราส่วนจำนวนรอบเป็นการวัดหาอัตราส่วนของจำนวนรอบระหว่างขดลวดปฐมภูมิ (Primary) และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary) และตรวจสอบสัญลักษณ์เฟสหรือเวกเตอร์กรุป (Vector Group) ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องมือวัด Transformer Ratio Meter หรือทำการป้อนแรงดันทางด้านปฐมภูมิ (Primary) แล้วใช้โวลต์มิเตอร์วัดค่าแรงดันทางด้านปฐมภูมิ (Primary) และทุติยภูมิ (Secondary) แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาอัตราส่วน (Ratio) ค่าที่ได้จากการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนได้  $\pm 0.5\%$  ดังรูปที่ 2.13



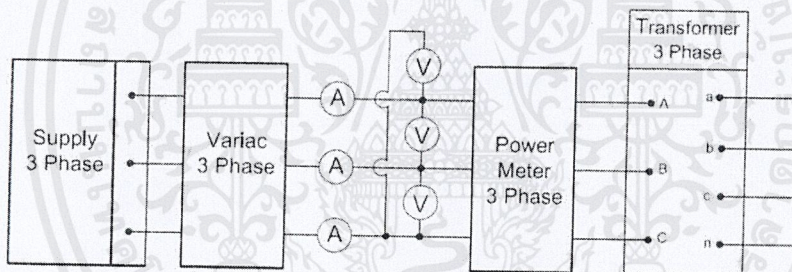
รูปที่ 2.13 แสดงวงจรการทดสอบ Ratio

(ก) การวัดค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรและค่าความสูญเสียขณะจ่ายโหลดที่พิกัด (Measurement of short-circuit impedance and load loss) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียขณะจ่ายโหลด (Load Loss), ค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ของหม้อแปลงที่พิกัดกระแส (Rated Current) การทดสอบทำได้โดยทำการลัดวงจร (Short Circuit) ทางด้านทุติยภูมิ (Secondary) ป้อนแรงดันทางด้านปฐมภูมิ (Primary) จนให้ได้ค่าของกระแสที่พิกัดแล้ววัดค่า  $P_{sc}$ ,  $V_{sc}(A-B)$ ,  $V_{sc}(B-C)$ ,  $V_{sc}(A-C)$  ดังรูป 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงวงจรการทดสอบ load loss

(ง) การวัดค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลด (Measurement of no-load loss) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลด (No-load loss) และ ค่ากระแสในตัวเอง (Exciting Current) ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่พิกัดแรงดัน (Rated Voltage) การทดสอบนี้ทำได้โดยทำการเปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิ (Secondary) แล้วป้อนแรงดันที่พิกัด ทางด้านปฐมภูมิ (Primary) แล้ววัดค่าต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงวงจรการทดสอบ No-load loss

(จ) การทดสอบประจำไดอิเล็กตริก (Dielectric routine test)

สามารถแยกหัวข้อการทดสอบได้ดังนี้

1. การวัดค่าความต้านทานทางฉนวน (Measurement of insulation resistance)

วัดระหว่างจุดต่าง ๆ ดังนี้

- ระหว่างขดลวดแรงดันสูงกับขดลวดแรงดันต่ำ (HV-LV)
- ระหว่างขดลวดแรงดันสูงกับกราวด์ถึงหม้อแปลง (HV-EARTH)

- ระหว่างขดลวดแรงดันต่ำกับกราวด์ถึงหม้อแปลง (LV-EARTH)

จุดประสงค์การทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวนระหว่างจุดต่างๆ ของหม้อแปลง เพื่อตรวจเช็คความชื้นที่อยู่ภายในหม้อแปลง ถ้ามีความชื้นมากกว่าความต้านทานฉนวนของหม้อแปลงจะมีค่าน้อย ถ้ามีความชื้นน้อยกว่าความต้านทานฉนวนของหม้อแปลงจะมีค่ามาก ค่าความต้านทานฉนวนที่ทดสอบได้จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า

ตารางที่ 2 Insulation Resistance by Megger 1000 V or 2000 V

แรงดันของ ขดลวด	ค่าความต้านทานฉนวน (M ohms)						
	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C	50 °C	60 °C
22-33 kV	1000	750	500	375	250	125	65
11-12 kV	800	600	400	300	200	100	50
ต่ำกว่า 3.5 kV	400	300	200	150	100	50	25

2. การทดสอบความทนแรงดันจากแหล่งจ่ายอื่น (Separate-source voltage withstand test)

สามารถแบ่งการทดสอบได้ 2 ลักษณะคือ

2.1 Applied Voltage Test หรือ High Potential Test

เป็นการทดสอบฉนวนที่กั้นระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ, ขดลวดแรงสูงกับกราวด์, ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์และส่วนต่างๆ กับกราวด์ การทดสอบแบ่งได้เป็นการทดสอบทางด้านแรงดันสูงและการทดสอบทางด้านแรงดันต่ำโดยทำการป้อนแรงดันทดสอบตามระดับแรงดันของหม้อแปลงดังตารางที่ 3 การทดสอบให้กักค่าแรงดันทิ้งไว้เป็นเวลา 60 วินาที แล้วลดแรงดันทดสอบลงอย่างรวดเร็ว ฉนวนของหม้อแปลงในส่วนต่างๆ จะต้องไม่เสียหาย การทดสอบถือว่าผ่านเกณฑ์เมื่อแรงดันทดสอบไม่ล้มเหลว

ตารางที่ 3 ระดับการฉนวนและระยะห่างในอากาศวัดจากส่วนที่มีไฟฟ้าของบushing

แรงดันสูงสุด (kV r.m.s.)	แรงดันทนที่กำหนด		ระยะห่างในอากาศต่ำสุด (mm.)
	แรงดันทนตามความถี่ กำลังไฟฟ้าในช่วงเวลา สั้นที่กำหนด (kV r.m.s.)	แรงดันทนอิมพัลส์ฟ้าผ่า คลื่นเต็มที่กำหนด kV (peak)	
ไม่เกิน 1.1	3 <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>
3.6	10	40	60
7.2	20	60	90
12	28 <sup>2)</sup>	75 <sup>2)</sup>	125 <sup>2)</sup>
24	50	125 <sup>3)</sup>	225
36	70	170 <sup>4)</sup>	315 <sup>4)</sup>
72.5	140	350	630
123	185	450	830
	230	550	1050
245	360	850	1600
	395	950	1800

## 2.2 การทดสอบความทนต่อแรงดันเหนี่ยวนำเกิน (Induced over-voltage withstand test)

เป็นการทดสอบฉนวนระหว่างรอบของขดลวด, ฉนวนระหว่างชั้นของขดลวด, ฉนวนระหว่างคอยล์และระหว่างเฟสของขดลวด การทดสอบทำได้โดยป้อนแรงดันที่มีลักษณะคลื่นใกล้เคียงกับคลื่นไซน์มากที่สุดที่ความถี่สูงกว่าความถี่ที่กำหนดเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดกระแสท่าแม่เหล็ก (Magnetizing Current) มากเกินไป การทดสอบจะต้องเพิ่มแรงดันที่ป้อนเร็วที่สุดเท่าที่เครื่องวัดอ่านได้ทันอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ จนกระทั่งถึงค่าแรงดันทดสอบให้คงค่าแรงดันทดสอบไว้เป็นเวลา 60 วินาที ที่ความถี่ไม่เกินสองเท่าของความถี่ที่กำหนด แล้วลดแรงดันทดสอบลงอย่างรวดเร็ว หากความถี่ที่ใช้ในการทดสอบมีค่ามากกว่าสองเท่าของความถี่ที่กำหนดให้คำนวณช่วงเวลาที่ต้อง

ungskำลังแรงดันที่ใช้ในการทดสอบเป็นไปตามสมการ โดยจะต้องมีเวลาในการทดสอบไม่น้อยกว่า 15 วินาที

$$\text{Time of test} = 120 \times \frac{f_r}{f_t} \text{ seconds}$$

โดยที่

$f_r$  คือ ความถี่ที่พิกัด (Hz)

$f_t$  คือ ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ (Hz)

ถ้าหากเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการทดสอบแสดงได้ดังตาราง ที่ 4 ถ้าไม่ได้ระบุเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนให้แสดงว่าการทดสอบนั้นไม่มีเกณฑ์ของความคลาดเคลื่อน

ตารางที่ 4 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการทดสอบ

รายการ	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน
1.(ก) ความสูญเสียทั้งหมด	+10% ของความสูญเสียทั้งหมด
(ข) ความสูญเสียของส่วนย่อย	+15% ของความสูญเสียส่วนย่อยแต่ละส่วนโดยที่ต้องไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด
2. อัตราส่วนแรงดันขณะไม่มีโหลด	± 0.5% ของอัตราส่วนที่แจ้งไว้
3. อิมพีแดนซ์ลัดวงจร	
หากค่าอิมพีแดนซ์ ≥ 10%	±7.5% ของค่าที่แจ้งไว้
หากค่าอิมพีแดนซ์ < 10%	±10% ของค่าที่แจ้งไว้
4. กระแสไม่มีโหลด	+30% ของค่าที่แจ้งไว้

หมายเหตุ เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนพิเศษที่แตกต่างจากที่ระบุไว้ในตารางที่ 4 ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ผลิตกับผู้ซื้อในขั้นตอนของการซื้อขาย การผลิต หรือการทดสอบ

60076-1 © IEC:1993+A1:1999

- 59 -

## 10 Tests

### 10.1 General requirements for routine, type and special tests

Transformers shall be subjected to tests as specified below.

Tests shall be made at any ambient temperature between 10 °C and 40 °C and with cooling water (if required) at any temperature not exceeding 25 °C.

Tests shall be made at the manufacturer's works, unless otherwise agreed between the manufacturer and the purchaser.

All external components and fittings that are likely to affect the performance of the transformer during the test shall be in place.

Tapped windings shall be connected on their principal tapping, unless the relevant test clause requires otherwise or unless the manufacturer and the purchaser agree otherwise.

The test basis for all characteristics other than insulation is the rated condition, unless the test clause states otherwise.

All measuring systems used for the tests shall have certified, traceable accuracy and be subjected to periodic calibration, according to the rules of 4.11 of ISO 9001.

NOTE: Specific requirements on the accuracy and verification of the measuring systems are under consideration (see IEC 60076).


When it is required that test results are to be corrected to a reference temperature, this shall be:

- for oil-immersed transformers: 75 °C;
- for dry-type transformers: according to the general requirements for tests in IEC 60076.

#### 10.1.1 Routine tests

- a) Measurement of winding resistance (10.2).
- b) Measurement of voltage ratio and check of phase displacement (10.3).
- c) Measurement of short-circuit impedance and load loss (10.4).
- d) Measurement of no-load loss and current (10.5).
- e) Dielectric routine tests (IEC 60076-3).
- f) Tests on on-load tap-changers, where appropriate (10.8).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 <b>PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY</b> POWER SYSTEM STANDARD DIVISION <b>THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV and 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS</b>				
Specification No. RTRN-008/2552	Approved date : 29/07/2009	Rev. No. : 1	Form No. 02-3	Page 5 of 19
<b>1c.7 Losses and short - circuit impedance</b>				
The specified or guaranteed losses plus positive tolerance, for each transformer unit, shall not be more than the figures in the table below.				
Short-circuit impedance shall be measured on the principle tapping of 22 or 33 kV at 75°C.				
Short-circuit impedance of the offered transformers shall be as specified in the table below and have tolerance according to the relevant standard.				
Transformer Rating (kVA)	Watt Loss			Short-circuit Impedance (Percent at 75°C)
	No-load loss, for system voltage of:		Load loss at 75°C	
	22 kV	33 kV		
50	160	170	950	4
100	250	260	1,550	4
160	360	370	2,100	4
250	500	520	2,950	4
315	600	630	3,500	4
400	720	750	4,150	4
500	860	900	4,950	6.5 or more
630	1,010	1,050	5,850	4
1,000	1,270	1,300	12,150	6
1,250	1,500	1,530	14,750	6
1,500	1,820	1,850	17,850	6
2,000	2,110	2,140	21,600	6

**1c.8 Limits of temperature rise, above 40°C ambient temperature:**

Of top oil : not exceeding 60 K

Of winding : not exceeding 65 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอก. 384-2543

ตารางที่ 10 เกณฑ์ควบคุมราคาเคลื่อน  
(ข้อ 6. และข้อ ก.1.2(24))

รายการ	เกณฑ์ควบคุมราคาเคลื่อน
1. (ก) ควบคุมเชิงทั้งหมด (ข) ควบคุมเชิงบางส่วนย่อย (ค) ควบคุมเชิง ( )	- 10% ของควบคุมเชิงทั้งหมด - 15% ของควบคุมเชิงบางส่วนย่อย และส่วน, โดยที่ควบคุมเชิงทั้งหมด คิดไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด
2. ควบคุมการขึ้นและไม่มีโทษ - ที่จุดส่งมอบสินค้าหรือบริการ ได้เจรจาไปก่อน - ที่จุดส่งมอบอื่น ๆ ในเขตควบคุมราคา ของท้องถิ่น ๆ	กรณีที่ควบคุม (ก) +0.5% ของค่าจ้างส่วนที่แจ้งไว้ หรือ (ข) +1.10% ของร้อยละของค่าจ้างที่แสดงจริงที่ จุดส่งมอบหลัก ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้กำกับซื้อ และผู้ ไม่ค้าราคาที่กำหนดในข้อ (ก) และข้อ (ข) ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้กำกับซื้อ แต่ต้อง ไม่ค้าราคาที่กำหนดในข้อ (ก) และข้อ (ข)
3. ควบคุมระดับจรรยาบรรณ - ควบคุมระดับจรรยาบรรณที่มีผลต่อสังคมหรือ ผลกระทบต่อความรับผิดชอบต่อสังคม ขององค์กร (ก) ควบคุมจรรยาบรรณ - ควบคุมจรรยาบรรณอื่น ๆ ในเขตควบคุมราคา	หากค่าสัมประสิทธิ์ $\geq 10\%$ + 7.5% ของค่าจ้าง หากค่าสัมประสิทธิ์ $< 10\%$ + 10% ของค่าจ้าง หากค่าสัมประสิทธิ์ $\geq 10\%$ + 10% ของค่าจ้าง หากค่าสัมประสิทธิ์ $< 10\%$ + 15% ของค่าจ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# UMANG BOARDS PRIVATE LIMITED

Regd. & Corp. Office : "UMANG HOUSE" 7-B, Bharat Mata Path, Janna Lal Bajaj Marg, C-Scheme, Jaipur-302001, Raj, INDIA Tel.: 91-141- 2379414, 2362093, 3258174, 2361978 Fax: 91-141- 2366626 Email: info@umangboards.com  
Factory : A-27, RIICO Industrial Area, Kaladera -303801 JAIPUR (Raj) INDIA Tel.: 91-1423-265763, 513065, 320044  
E-mail : qc@umangboards.com, website: www.umangboards.com



Certificate No. T-27

10-6-99

Invoice No.: 2014CF118

Date: Nov. 24th, 2014

P/I No.: 2014IMTUA-118

NAME OF PRODUCT			PRESS PAPER	
THICKNESS	0.13MM		WIDTH	1000MM
TIME OF PRODUCTION	Nov, 2014		QUALITY	GENERAL
STANDARD NAME:	JB/T8989.2-1999/IEC60641-2.1979		COLOUR	NATURAL
ITEM		UNIT	TECHNICAL INDEX VALUE	TESTING VALUE
THICKNESS TOLERANCE		%	±10.0	0.13
DENSITY		G/CM <sup>3</sup>	1.00-1.25	1.12
TENSILE STRENGTH	M.D.	N/mm <sup>2</sup>	≥90	108
	C.M.D.		≥50	65
ELONGATION	M.D.	%	≥2.5	3.3
	C.M.D.		≥4.0	4.8
ASH CONTENT		%	≤1.0	0.45
AQUESOUS EXTRACT (PH)			6.0-9.0	7
ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF AQUEOUS EXTRACT		MS/M	≤5.0	3.8
VOLTAGE RESISTANT STRENGTH		KV/MM	≥12	12.8
MOISTURE CONTENT		%	≤8.0	6.8
COHESION BETWEEN PILES (VISUAL TEST)		PASS-FALL	THE SPUT SHALL RUPTURE ONE OF MORE PLIES&HAVE A DISTINCTLY OR RAGGED APPERANCE	

กรัม 296 = 2 ร้อย

กรัม 395 = 1 ร้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**CERTIFICATE OF QUALITY NO. 44156  
ISSUED BY MANUFACTURER**

**Manufacturer:** OOO "VIZ-STEEL LTD", Russia  
**Description of goods:** PRIME COLD ROLLED GRAN ORIENTED ELECTRICAL STEEL IN COILS  
**Standard:** STO 05757665-008-2007

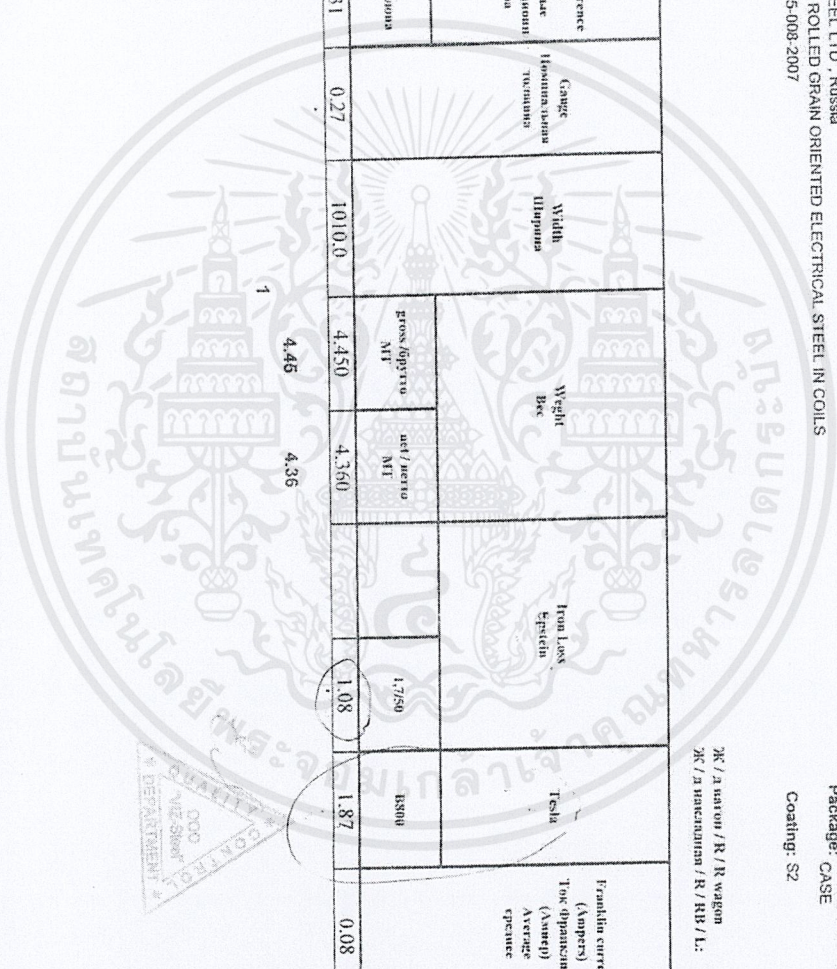
**Package:** МЕТАЛЛИЧЕСКОЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЕ  
**Coating:** S2

2K / 2 вагона / R / R вагон  
 2K / 2 вагона / R / R / L:

Grade order Марка но тарах	Shipping reference numbers Отпускной номер по тарам	Gauge Толщина Толщина	Width Ширина	Weight Вес		Iron Loss Эффект	Tensile Испит	Franklin current (Amper) Ток Фрэнклина (Ампер) Average среднее	Franklin current (Amper) Ток Фрэнклина (Ампер) Max. Максимальное	
				Gross figure ИТ	net/weight ИТ					
NV27S-120	1410631	0.27	1010.0	4.450	4.360	1.750	1.08	1.87	0.08	0.23
<b>BCETO / TOTAL</b>				<b>4.45</b>	<b>4.36</b>					

Количество мест coils / No. Coils  
1

Date: 04.11.2014



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นายวรากร ชลปฐมพิกุลเลิศ เกิดเมื่อวันที่ 6 พฤศจิกายน พ.ศ. 2536 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาจากโรงเรียนโพธิสารพิทยากร เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2555  
 ฝึกงานที่ : บริษัทร่วมสร้างอินเตอร์กรุ๊ป จำกัด



นายศาศวัต เสถียรสามัคคี เกิดเมื่อวันที่ 22 มกราคม พ.ศ. 2537 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาจากโรงเรียนพระปฐมวิทยาลัย เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2555  
 ฝึกงานที่ : บริษัทร่วมสร้างอินเตอร์กรุ๊ป จำกัด



นายอติศ เลหาวัฒนเสรี เกิดเมื่อวันที่ 6 เมษายน พ.ศ. 2537 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาจากโรงเรียนโพธิสารพิทยากร เข้าศึกษาที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2555  
 ฝึกงานที่ : บริษัท CTEP co. Ltd.



นายอนรรฆ คำบา เกิดเมื่อวันที่ 19 กันยายน พ.ศ.2536 ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาจากโรงเรียนปทุมวิไล เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2555  
 ฝึกงานที่ : บริษัท ไทยออยล์ จำกัด(มหาชน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้