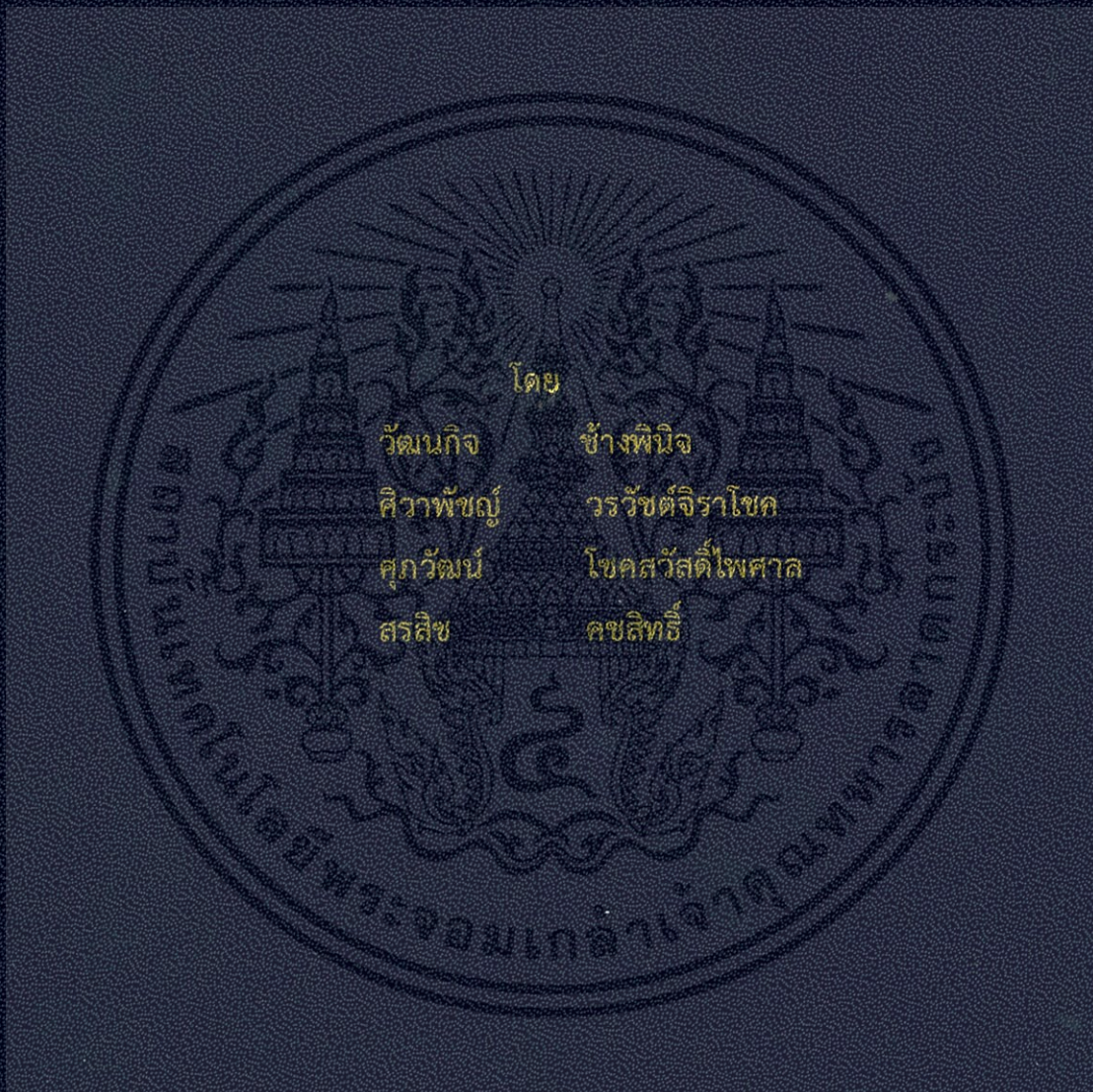


การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 150 kVA
Design and Construction a testing transformer 300 kV 150 kVA



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 150 kVA

Design and Construction a testing transformer 300 kV 150 kVA



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design and Construction a testing transformer 300 kV 150 kVA



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

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 150 kVA

Design and Construction a testing transformer 300 kV 150 kVA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 150 kVA

ผู้จัดทำ

1. นายวัฒนกิจ ช่างพินิจ
2. นายศิวาพัชญ์ วรวัชต์จิราโชค
3. นายศุภวัฒน์ โชคสวัสดิ์ไพศาล
4. นายสรสิข คชสิทธิ์



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kv 150 kVA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 150 kVA

นาย วัฒนกิจ ช้างพินิจ
นาย ศิวาพัชญ์ วรวัชต์จิราโชค
นาย ศุภวัฒน์ โชคสวัสดิ์ไพศาล
นาย สรสิข คชสิทธิ์
รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นรายงานผลการศึกษาและออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 150 kVA 50 Hz มีขดลวดสองชุด ใช้ตัวถังเป็นโลหะ ปลอดภัยไม่นำสายไฟมีครีบทาจากพอร์ซเลน ใช้กระดาษฉนวนเป็นฉนวนคั่นระหว่างขดลวดกับส่วนที่ต่อลงดิน โดยที่จะใช้น้ำมันหม้อแปลง (Mineral Oil) เป็นฉนวนแทรกซึมและทำการระบายความร้อน โดยการออกแบบนั้นจะเน้นให้มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน สามารถให้นำไปใช้ได้ในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง โครงสร้างของหม้อแปลงทดสอบจะประกอบด้วยขดลวดสองชุดคือขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูง โดยที่ขดลวดแรงสูงจะพันซ้อนอยู่บนขดลวดแรงต่ำโดยจะพันแบบทรงกระบอกรวมแกนและใส่แผ่นซีลด์ทองแดงหุ้มที่ปลายและนิวตริลของขดลวดแรงต่ำสูงเพื่อช่วยในการกระจายแรงดันเสิร์จ ฉนวนที่ใช้ห่อหุ้มขดลวดและกั้นระหว่างชั้นจะเป็นกระดาษฉนวน แกนเหล็กจะเป็นเหล็กแบบแผ่นเหล็กลามิเนตผสมซิลิคอนที่ผ่านการรีดเย็นเพื่อลดค่ากระแสไหลวนในแกนเหล็ก ทำการจัดวางแบบคอร์ โดยที่ขดลวดและแกนเหล็กจะจุ่มน้ำมันเพื่อให้ฉนวนนั้นเป็นฉนวนทางไฟฟ้าและนำความร้อนที่เกิดขึ้นจากแกนเหล็กออกสู่ภายนอก โดยกล่าวถึงเงื่อนไขและวิธีการออกแบบและทำการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60076

Design and Construction a testing transformer 300kv 150 kVA

Wattanakit Changpinid
Siwapach Worawachchirachok
Supawat Choksawatpaisan
Sorasit Khotchasit
Assoc.Prof. Siriwat Potivejkul Supervisor
Year 2013

ABSTRACT

This senior project presents a design and construction of a single phase 300 kV 150 kVA 50 Hz tank type oil immersed testing transformer. The testing transformer having two windings with a bushing made by porcelain and insulation paper is used as insulation between the windings and grounded parts. The mineral oil is used as a space insulation and coolant. The design is emphasized at the structure not to be complex and suitable to be used in the high voltage laboratory. The main structure consists of two windings, low voltage winding is wound around the steel core, high voltage winding is wound as concentric cylinder on the top of the low voltage winding. At the beginning and end of high voltage winding add a copper shield which in order to reduced the gradient of surge voltage. The insulation paper and pressboard are used for support and internal insulation system. The steel core is made from grain oriented silicon steel laminations which in order to reduced the eddy current loss in the steel core. The test are performed in accordance with the IEC recommendations.

กิตติกรรมประกาศ

การออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 150 kVA นี้ได้ประสบความสำเร็จตามเป้าหมายที่ต้องการได้นั้นต้องขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พีรฤติ ยุทธโกวิท และ คุณปณยวีร์ ฉายศิริ ผู้ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับโครงการนี้และให้ความสนใจอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ บริษัท FUJI TUSCO CO.,LTD ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์การประกอบสร้างและการทดสอบหม้อแปลงทดสอบ

ขอขอบคุณ คุณวิศิษฐ์ คชสิทธิ์ ที่ได้สนับสนุนทางด้านเงินทุนของโครงการ และเร่งรัดการดำเนินงานของโครงการมิให้มีความล่าช้า

ขอขอบคุณ คุณ วรา จูห้อง ที่ได้ช่วยเหลือในการออกแบบ และคำแนะนำในการออกแบบหม้อแปลงทดสอบ

ขอขอบคุณ ดร.อรรถพล ลิ้มสีมารัตน์ ที่ได้ช่วยเหลือในการทดสอบ และให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทดสอบหม้อแปลงประเภทต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณเกรียงไกร ปลุกจิตร คุณสุทัศน์ กิจมณี ในฐานะวิศวกรประจำโรงงานที่ให้คำปรึกษาด้านเทคนิคต่างๆในการทำงาน และให้คำแนะนำต่างๆในการออกแบบ

ขอขอบคุณพี่พนักงานทุกคนที่ได้มีส่วนเกี่ยวข้องข้องในโครงการนี้ ซึ่งทำให้โครงการนี้สามารถเดินหน้าต่อไปได้อย่างไม่มีอุปสรรค และคอยให้คำปรึกษาด้านเทคนิคต่างๆการทำงาน

และสุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณเพื่อนๆในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจแก่คณะผู้จัดทำตลอดระยะเวลาของการทำโครงการ จนกระทั่งโครงการนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้โดยสมบูรณ์

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีของหม้อแปลงทดสอบ	4
2.1 หลักการทำงาน	4
2.2 ชนิดของหม้อแปลงทดสอบ	4
2.2.1 หม้อแปลงทดสอบแบบหุ้มด้วยฉนวนแข็ง	5
2.2.2 หม้อแปลงทดสอบแบบจุ่มน้ำมัน	6
2.3 โครงสร้างของหม้อแปลงทดสอบ	6
2.4 แรงดันกระจายในขดลวดแรงสูงของหม้อแปลงทดสอบ	7
2.5 ฉนวนภายในหม้อแปลงทดสอบที่มีน้ำมันเป็นฉนวนแทรกซึม	9
2.6 ปลอกฉนวนนำสาย	11
2.7 ตัวถัง	11
2.8 แกนเหล็ก	11
2.9 ค่าสนามไฟฟ้าและความเครียดของหม้อแปลงทดสอบ	12
2.10 ชั้นฉนวนซ้อนทับร่วมในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	14
2.11 ค่ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบ	15
2.11.1 แรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบ	15
2.11.2 ขนาดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบ	16
2.11.3 แรงดันและกำลังไฟฟ้าลัดวงจร	17
2.11.4 ขนาดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด	20
2.11.5 ขนาดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดและน้ำหนักของขดลวด	22
2.11.6 คุณลักษณะทางความร้อนของหม้อแปลง	23
2.11.7 การคำนวณค่าอินดักแตนซ์ของหม้อแปลงทดสอบ	23
2.11.8 ระดับกำลังเสียงและระดับความดันเสียงในหม้อแปลงทดสอบ	24

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบ	25
3.1 ข้อกำหนดของหม้อแปลงทดสอบที่ต้องการออกแบบ	25
3.2 การออกแบบแกนเหล็กและขดลวด	25
3.2.1 การออกแบบขดลวดแรงต่ำ	28
3.2.2 การออกแบบขดลวดแรงสูง	31
3.2.3 การออกแบบแกนเหล็ก	38
3.3 การออกแบบตัวถัง	41
3.4 การออกแบบปลอกฉนวนนำสาย	43
3.5 การตัดเหล็กและประกอบเหล็ก	44
3.6 การพันขดลวดและฉนวนของขดลวด	47
3.7 การประกอบแกนเหล็กเข้ากับขดลวด	55
3.8 การอบขดลวดและฉนวนต่างๆ ในเตาอบสุญญากาศและการเติมน้ำมัน	59
บทที่ 4 การทดสอบหม้อแปลงทดสอบ	61
4.1 การวัดอัตราส่วนแรงดันของขดลวดและการตรวจสอบขั้ว	61
4.2 การวัดค่าความต้านทานของขดลวด	63
4.3 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด	64
4.4 การวัดกำลังสูญเสียและแรงดันอิมพีแดนซ์ขณะมีโหลด	65
4.5 การวัดความต้านทานของฉนวน	68
4.6 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม	69
4.7 การทดสอบการทนได้ที่แรงดันพิกัด	69
4.8 การทดสอบแฟลชโอเวอร์	70
บทที่ 5 สรุปผลโครงการและข้อเสนอแนะ	71
5.1 สรุปผลโครงการ	71
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	72
เอกสารอ้างอิง	74
ภาคผนวก	75
ภาคผนวก ก.	76
บทความวิชาการ	77
ภาคผนวก ข.	83
โปสเตอร์นำเสนอผลงาน	84
ประวัติผู้เขียน	85

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของหม้อแปลงทดสอบ	4
2.2 หม้อแปลงทดสอบแบบฉนวนหุ้มแข็ง	5
2.3 ระดับฉนวนภายในหม้อแปลงทดสอบที่ต่อแกนเหล็กกลางดิน	6
2.4 โครงสร้างของหม้อแปลงทดสอบแกนเหล็กต่อลงดินแบบจุ่มน้ำมัน	7
2.5 ขดลวดหม้อแปลงและวงจรมูลตาข่ายเมื่อได้รับแรงดันเสิร์จ	8
2.6 แรงดันกระจายในขดลวดหม้อแปลงเมื่อได้รับแรงดันเสิร์จ	8
2.7 สนามไฟฟ้าแบบทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วม	13
2.8 สนามไฟฟ้าแบบสมมาตรอเล็กโทรด	14
2.9 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าฉนวนน้ำมันและกระดาษฉนวน	15
2.10 วงจรสมมูลของหม้อแปลงทดสอบแบบไม่คิดกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	17
2.11 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงทดสอบ	17
2.12 มิติภายในของหม้อแปลงทดสอบเพื่อหาค่ารีแอกแตนซ์	19
3.1 ภาคตัดขวางแกนเหล็ก	26
3.2 ภาคตัดขวางของขดลวดแรงต่ำในแต่ละชุด	29
3.3 ภาคตัดขวางของขดลวดแรงสูงที่ใช้พันในแต่ละชุด	31
3.4 รูปร่างและภาคตัดขวางของแกนเหล็ก	38
3.5 แกนเหล็กทั้งหมด	39
3.6 แกนเหล็กเมื่อทำการพันขดลวดแล้ว	41
3.7 รูปร่างและขนาดของตัวถัง	41
3.8 ขนาดของบล็อกฉนวนนำสาย	44
3.9 เหล็กและแคลมป์ที่ใช้ในการประกอบเหล็ก	45
3.10 โครงสร้างของแกนเหล็กพร้อมแคลมป์	45
3.11 การประกอบแกนเหล็ก	46
3.12 ลำดับการประกอบแกนเหล็ก ขั้นตอนที่ 1	46
3.13 ลำดับการประกอบแกนเหล็กขั้นตอนที่ 2	47
3.14 เหล็กที่ทำการประกอบแล้ว	47
3.15 ก่อนการพันขดลวดแรงต่ำ	48
3.16 ขดลวดที่ใช้ในการพันขดลวดแรงต่ำ	48
3.17 การพันขดลวดแรงต่ำ	49
3.18 ขดลวดที่ทำการทรานโพสแล้ว	49
3.19 การหักขดลวดแรงต่ำเพื่อที่จะเป็นหัวสายของขดลวดแรงต่ำ	50
3.20 ขดลวดแรงต่ำที่พันเสร็จแล้ว	50
3.21 การพันขดลวดแรงสูง	51
3.22 ขดลวดที่ใช้การพันขดลวดแรงสูง	51
3.23 เครื่องที่ใช้ในการพันขดลวด	52
3.24 การรองกระดาษฉนวนในการพันขดลวดแรงสูง	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25 การพันขดลวดแรงสูง	53
3.26 การห่อขดลวดแรงสูงด้วยกระดาษย่น	53
3.27 ขดลวดที่พันเสร็จแล้ว	54
3.28 ปลายสายขดลวดแรงสูง	54
3.29 การถอดแกนเหล็กเพื่อนำมาประกอบกับขดลวด	55
3.30 การประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็ก	56
3.31 การประกอบขดลวดกับแกนเหล็ก	56
3.32 เมื่อประกอบขดลวดกับแกนเหล็กเสร็จสมบูรณ์	57
3.33 ตัวถังหม้อแปลงทดสอบ	57
3.34 ขณะทำการทดลองใส่ขดลวด แกนเหล็กและแคลมป์ลงในตัวถัง	58
3.35 แกนเหล็กและขดลวดและแคลมป์ภายในตัวถังหม้อแปลงทดสอบ	58
3.36 เตาอบสุญญากาศ	59
3.37 การดูอากาศภายในตัวถังหลังจากอบหม้อแปลงทดสอบ	60
3.38 หม้อแปลงทดสอบที่ทำการประกอบเสร็จสิ้น	60
4.1 Turn ratio meter	62
4.2 ผลการทดสอบการวัดอัตราส่วนแรงดัน	62
4.3 การกำหนดขั้วของหม้อแปลง	63
4.4 วงจรทดสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด	64
4.5 กระแสป้อนเข้าหม้อแปลงทดสอบ	64
4.6 วงจรทดสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียและแรงดันอิมพีแดนซ์ขณะมีโหลด	66

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 จำนวนขดลวดที่พันในแต่ละชั้น	32
4.1 ผลการทดสอบการวัดอัตราส่วนแรงดันของขดลวดและการตรวจสอบขั้ว	61
4.2 ผลการวัดค่าความต้านทานของขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ	63
4.3 ผลการวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด	65
4.4 ค่าวัดกำลังสูญเสียและแรงดันอิมพีแดนซ์ขณะมีโหลด	66
4.5 สรุปค่ากำลังสูญเสียและแรงดันอิมพีแดนซ์ขณะมีโหลด	68
4.6 ค่าความต้านทานของฉนวน	68
5.1 สรุปผลการทดสอบ	71



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงสามารถผลิตได้ในประเทศ เช่น ลูกถ้วย ฉนวนไฟฟ้า ไกต์ดตอนอัตโนมัติ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ซึ่งได้รับการยอมรับจากทั้งภาครัฐบาลและเอกชน โดยอุปกรณ์ต่างๆเหล่านี้จะต้องถูกทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการก่อนที่จะนำไปใช้จริงในระบบไฟฟ้า ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้นหม้อแปลงทดสอบเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับจ่ายแรงดันทดสอบกระแสสลับในความถี่ต่ำเพื่อใช้ในการทดสอบวัสดุและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เพื่อตรวจสอบว่ามีคุณสมบัติและการทำงานของอุปกรณ์เป็นไปตามมาตรฐานกำหนดหรือไม่ ส่วนในด้านการศึกษาที่เกี่ยวกับวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงก็ต้องการเรียนในส่วนของภาคปฏิบัติ ซึ่งหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงก็เป็นอุปกรณ์สำคัญหลักสำหรับการสร้างแรงดันสูงกระแสสลับ แรงดันสูง กระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยด้านไฟฟ้าแรงสูงหรือเพื่อแก้ปัญหารวมไปถึงพัฒนาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูง จึงนับได้ว่าหม้อแปลงทดสอบแรงสูงเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญยิ่ง และในปัจจุบันห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังนั้นมีอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเข้ามารับการทดสอบจำนวนมาก แต่ภายในห้องปฏิบัติการนั้นยังไม่มีหม้อแปลงแรงดันสูงที่สามารถทดสอบอุปกรณ์เหล่านั้นได้ จึงได้มีการออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 150 kVA เพื่อรองรับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงภายในห้องปฏิบัติการ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มศักยภาพในการทดสอบ การเรียน การสอน และการวิจัยของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อศึกษาวิธีการออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 150 kVA 300 kV
- 2) เพื่อรองรับการทดสอบในพิกัดแรงดันที่สูงขึ้น
- 3) เพื่อเป็นการเพิ่มศักยภาพการทดสอบของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง
- 4) ส่งเสริมให้เกิดการวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

1.3 ขอบเขตโครงการ

ทำการออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงขนาด 300 kV 150 kVA แบบถังโลหะรูปทรงวงรี ที่มีบุชชิงด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำอยู่ทางด้านบนของตัวถัง โดยใช้วัสดุที่ผลิตขึ้นเองในประเทศในการประกอบสร้าง

1.4 วิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับหม้อแปลงทดสอบแบบใช้น้ำมันเป็นฉนวนและหม้อแปลงชนิดถังโลหะ
- 2) ศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคของฉนวน คุณสมบัติของน้ำมัน หม้อแปลง แรงดันกระจายของขดลวด
- 3) ออกแบบแกนเหล็ก ขดลวดพร้อมฉนวนและตัวถังโลหะของหม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 150 kVA
- 4) ประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบที่ได้ออกแบบไว้ในข้อที่ 3) ที่โรงงานหม้อแปลงทีสโก้ ทราฟ จำกัด
- 5) ทดสอบลักษณะคุณสมบัติการใช้งานตามมาตรฐานกำหนด
- 6) วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ
- 7) จัดทำปฏิญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 แผนการดำเนินการโครงการ

	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
ค้นคว้า ทฤษฎีที่ เกี่ยวข้อง	←→								
การออกแบบ	←→	←→	←→						
การสั่งซื้อ อุปกรณ์			←→	←→	←→	←→	←→	←→	
การประกอบ สร้าง				←→	←→	←→	←→	←→	
ทดสอบ							←→	←→	←→
สรุป									←→
จัดทำรูปเล่ม				←→	←→				←→

←→ วางแผน

←→ ปฏิบัติจริง

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

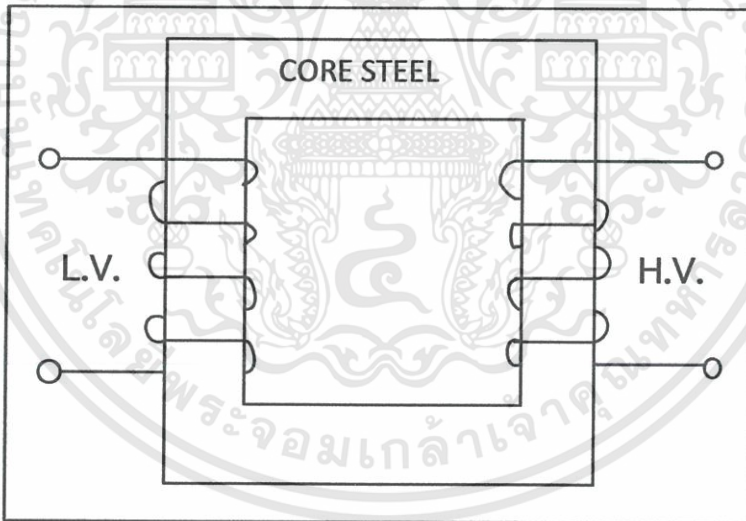
- 1) เพื่อนำหม้อแปลงทดสอบมาใช้ภายในห้องปฏิบัติการของสถาบัน
- 2) ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาหม้อแปลงทดสอบต่อไปในอนาคต
- 3) ลดการสั่งซื้อหม้อแปลงทดสอบจากต่างประเทศ
- 4) เพิ่มศักยภาพในการทดสอบของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการทำงาน

หม้อแปลงทดสอบส่วนใหญ่จะเป็นชนิดหนึ่งเฟส มีกำลังต่ำเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแต่มีแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงเพื่อที่จะนำไปทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงชนิดอื่นๆ ได้ แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ (Secondary) สามารถปรับได้โดยการปรับแรงดันทางด้านปฐมภูมิ (Primary) ซึ่งส่วนใหญ่มีค่าไม่เกิน 2 kV

โครงสร้างภายในจะประกอบด้วยขดลวดอย่างน้อยสองชุดพันอยู่บนแกนเหล็ก ชุดที่พันอยู่กับแกนเหล็กจะเป็นขดลวดแรงดันต่ำ (Low Voltage Winding) เป็นชุดที่ป้อนกำลังไฟฟ้าเข้า ขดลวดชุดต่อมาพันทับอยู่บนขดลวดแรงดันต่ำคือขดลวดแรงดันสูง (High Voltage Winding) ซึ่งเป็นขดลวดที่จ่ายกำลังไฟฟ้าออก ทั้งนี้ขดลวดแรงดันต่ำและขดลวดแรงดันสูงอาจพันอยู่บนแกนร่วมกันหรืออาจพันแยกแกน ดังรูปที่ 2.1 โดยที่แกนเหล็กและขดลวดนั้นจะวางอยู่ในถังและจุ่มแช่อยู่ในฉนวนแทรกซึม เช่น น้ำมันหม้อแปลง



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของหม้อแปลงทดสอบแบบพันขดลวดแยกแกน

2.2 ชนิดของหม้อแปลงทดสอบ

ปัญหาสำคัญของหม้อแปลงทดสอบที่นอกเหนือจากหม้อแปลงทั่วไปคือ ถ้าแรงดันไม่เกิน 100 kV ฉนวนนั้นจะเป็นแบบแห้งโดยห่อหุ้มขดลวดและแกนเหล็กด้วยสารสังเคราะห์ที่ได้ เช่น อีพ็อกซี หม้อแปลงที่มีแรงดันสูงกว่านั้นขดลวดแต่ละขดต้องรับแรงดัน 50 ถึง 100 kV ฉนวนจะเป็นกระดาษชุบน้ำมัน แกนเหล็กและขดลวดจะจุ่มอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงที่บรรจุอยู่ภายในถังโลหะหรือถังฉนวน โดยถ้าใช้ถังโลหะนั้นจะมีข้อดีในแง่ของการระบายความร้อนแต่ต้องใช้ปลอกนำสายฉนวนแรงสูงก็อาจจะเหมาะกับหม้อแปลงทดสอบที่ต้องใช้กระแสทดสอบและกำลังไฟฟ้าสูงๆ ถ้าตัวถังนั้นเป็นฉนวนจะไม่จำเป็นต้องใช้ปลอกฉนวนนำสายแรงสูง (Bushing) การระบายความร้อนจะระบายความ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

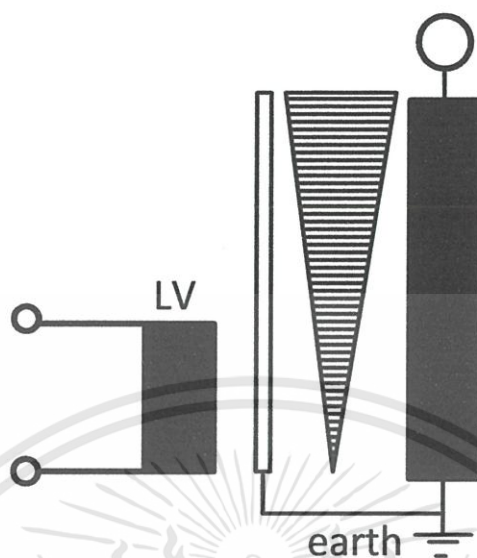
ร้อนได้น้อยกว่าถังแบบโลหะแต่อาจจะต้องสร้างตัวระบายความร้อน (Radiator) ความร้อนดังกล่าว นั้นเกิดขึ้นจากกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กและในขดลวด โดยที่ความร้อนนี้จะแผ่กระจายออกผ่าน น้ำมันที่มีการสัมผัสแกนเหล็กและขดลวด ถ้าความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นไม่สามารถระบายออกไปได้ไม่ สะดวกนั้นก็ทำให้แกนเหล็กและขดลวดมีอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอุณหภูมิโดยรอบ โดยที่ อุณหภูมิที่ยอมให้เพิ่มขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับฉนวนที่ใช้ โดยตามมาตรฐาน IEC 60296 [1] จะยอมให้ อุณหภูมิมีค่าสูงต่อเนื่องไม่เกิน $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนแทรกซึมร่วมกับกระดาษ ฉนวนเป็นวัสดุฉนวนแข็ง

2.2.1 หม้อแปลงทดสอบแบบหุ้มด้วยฉนวนแข็ง



รูปที่ 2.2 หม้อแปลงทดสอบแบบหุ้มฉนวนแข็ง
เมื่อ 1.) แกนเหล็ก 2.) ขดลวดแรงต่ำ 3.) ขดลวดแรงสูง
4.) ฉนวนแข็งอีพ็อกซี 5.) ปลายขั้วแรงสูง

โดยหม้อแปลงทดสอบชนิดนี้แกนเหล็กจะถูกต่อลงดิน ขดลวดแรงต่ำจะถูกพันติดกับแกนเหล็ก แรงดันของขดลวดแรงต่ำอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 kV โดยที่ขดลวดแรงสูงจะพันทับขดลวดแรงต่ำอีกต่อ หนึ่ง ก็คือว่าขดลวดแรงสูงจะพันอยู่ห่างจากแกนเหล็กหรือส่วนที่ต่อลงดินมากขึ้นฉนวนจะเพิ่มขึ้นตาม แรงดัน ดังในรูปที่ 2.3



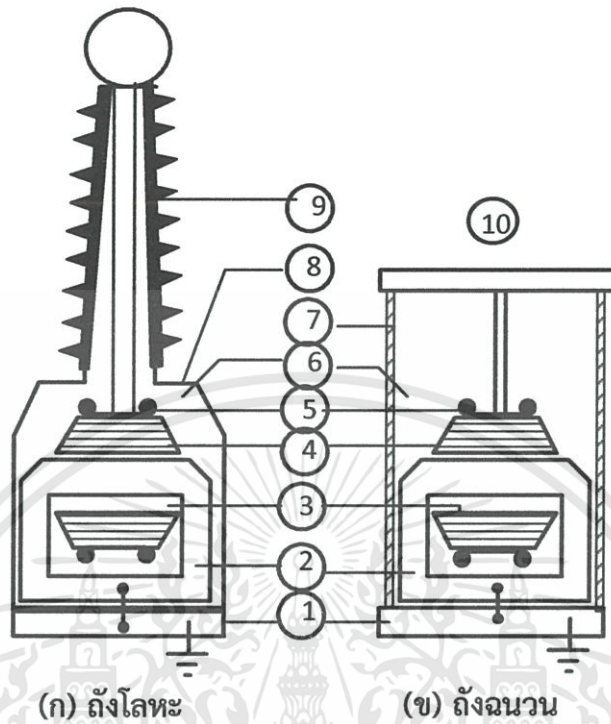
รูปที่ 2.3 ระดับฉนวนภายในหม้อแปลงทดสอบที่ต่อแกนเหล็กลงดิน

2.2.2 หม้อแปลงทดสอบแบบจุ่มน้ำมัน

โดยขดลวดแกนเหล็กและส่วนประกอบทั้งหมดจะจุ่มอยู่ในน้ำมัน ซึ่งจะถูกบรรจุอยู่ในภายในถังฉนวนหรือถังโลหะ ในกรณีที่ถังโลหะจะต้องนำปลอกฉนวนนำสายแรงสูงออกมาภายนอกตัวถังและปลอกฉนวนนำสายจะต้องเป็นแบบคอนเดนเซอร์ การใช้หม้อแปลงแบบถังโลหะจะมีข้อดีคือจะสามารถระบายความร้อนได้ดีกว่าแบบถังฉนวนแต่ก็มีข้อเสียคือต้องการพื้นที่ในการติดตั้งมากกว่าเพราะมีปลอกฉนวนนำสาย แต่ถ้าเป็นแบบถังฉนวนจะไม่มีปลอกฉนวนนำสายแต่จะระบายความร้อนได้ยากกว่าแบบถังโลหะ

2.3 โครงสร้างของหม้อแปลงทดสอบ

โครงสร้างภายในของหม้อแปลงทดสอบได้แก่ ขดลวด แกนเหล็กและฉนวนจะจุ่มน้ำมันหม้อแปลงที่บรรจุอยู่ในถัง ซึ่งตัวถังนั้นอาจจะเป็นถังโลหะหรือถังฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 2.4

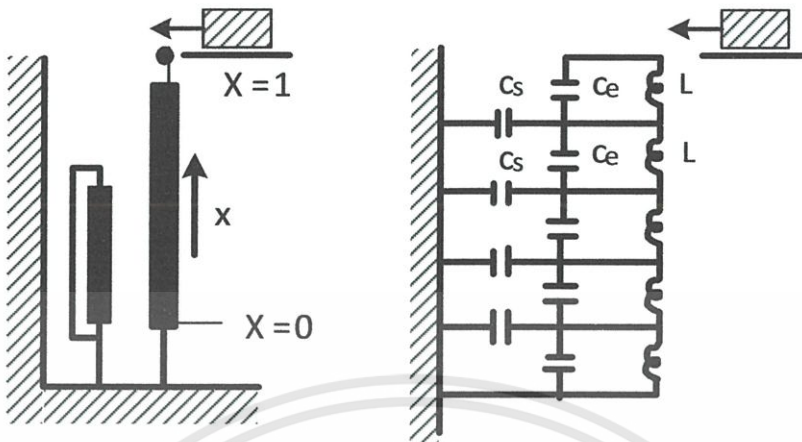


รูปที่ 2.4 โครงสร้างของหม้อแปลงทดสอบแกนเหล็กต่อลงดินแบบจุ่มน้ำมัน
เมื่อ 1.) ฝาปิดด้านล่างต่อลงดิน 2.) แกนเหล็ก 3.) ขดลวดแรงต่ำ 4.) ขดลวดแรงสูง
5.) ซีลด์ที่ปลายขดลวดแรงสูง 6.) ฉนวนห่อหุ้มแกนเหล็กและขดลวด 7.) ถึงฉนวน
8.) ถึงโลหะ 9.) ปกฉนวนนำสาย 10.) ปลายขั้วแรงดันสูง

ขดลวดแรงดันต่ำและแรงดันสูงจะเป็นแบบทรงกระบอกแกนร่วมเพื่อลดฟลักซ์แม่เหล็กกระจาย (Magnetic stray flux) เพิ่มการคัปปลิงระหว่างขดลวดทั้งสองและเพิ่มค่าคาปาซิแตนซ์อนุกรมของขดลวด การจัดวางลำดับชั้นของขดลวดแรงดันสูงจะลดความกว้างของชั้นลงเมื่อห่างจากแกนเหล็กมากขึ้น เพื่อให้คาปาซิแตนซ์ระหว่างชั้นมีค่าเท่ากัน จะทำให้แรงดันกระจายมีค่าคงที่เมื่อเกิดแรงดันทรานเซียนต์

2.4 แรงดันกระจายในขดลวดแรงสูงของหม้อแปลงทดสอบ

ในสภาวะคงตัวแรงดันกระจายบนขดลวดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของขดลวด แต่ในสภาวะทรานเซียนต์หรือแรงดันเสิร์จ แรงดันกระจายบนขดลวดจะไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวขดลวด ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่าหม้อแปลงมีวงจรมูลซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ เมื่อหม้อแปลงได้รับแรงดันเสิร์จ ส่วนที่เป็นตัวเก็บประจุจะเป็นตัวตอบสนองต่อหน้าคลื่นเป็นอันดับแรก เรียกว่าแรงดันกระจายเริ่มต้น ดังในแสดงในรูปที่ 2.5 เมื่อถึงภาวะสุดท้ายแรงดันกระจายสม่ำเสมอ เรียกว่าแรงดันกระจายขั้นสุดท้าย ดังแสดงในรูปที่ 2.6



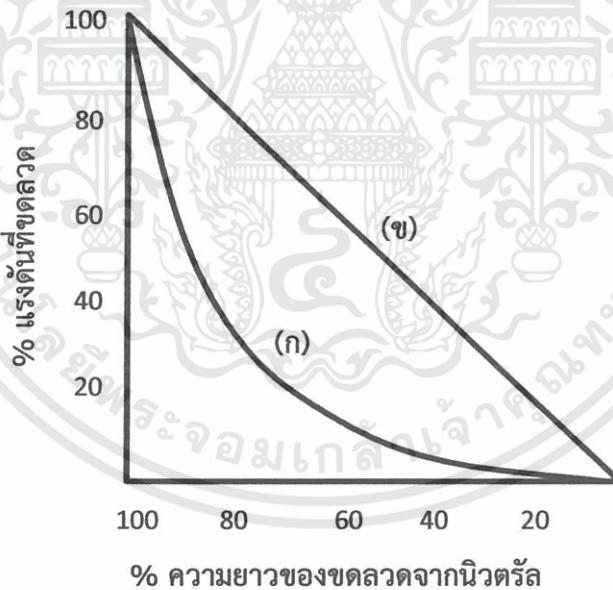
รูปที่ 2.5 ขดลวดหม้อแปลงและวงจรสมมูลตาข่ายเมื่อได้รับแรงดันเสิร์จ

เมื่อ

L คือ ความเหนียวนำของขดลวด

C_s คือ ความจุไฟฟ้าต่อแบบอนุกรมตลอดแนวความยาวของขดลวด

C_e คือ ความจุไฟฟ้าต่อแบบขนานระหว่างขดลวดกับส่วนที่ต่อลงดิน



รูปที่ 2.6 แรงดันกระจายในขดลวดหม้อแปลงเมื่อได้รับแรงดันเสิร์จ

เมื่อ

(ก) แรงดันกระจายช่วงต้น (ข) แรงดันกระจายช่วงภาวะสุดท้าย

การตอบสนองของขดลวดต่อแรงดันเสิร์จตอนเริ่มต้นรับแรงดัน ขดลวดทางด้านปลายแรงดันสูงจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง เวลาถัดมาความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะเกิดที่บริเวณนิวทรีล ดังนั้นฉนวนตรงปลายขดลวดจะต้องดีเป็นพิเศษ มิฉะนั้นอาจจะทำให้เกิดเบรกดาวนขึ้นได้ การแก้ปัญหาแรงดันกระจายบนขดลวดให้สม่ำเสมอดีขึ้นอาจทำได้โดยลดค่าความจุไฟฟ้าสแตต (C_e) และเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าอนุกรมระหว่างขดลวด C_s จะทำให้ $\alpha = \sqrt{C_e / C_s}$ มีค่าน้อยกว่า 1 การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นที่ขดลวดแบบทรงกระบอกแกนร่วมหลายชั้น ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างชั้นขดลวดมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งสามารถจะพิจารณาได้จากสมการ

$$C_n = 2\pi\epsilon b_n / \ln(r_{n+1} + \frac{1}{r_n}) \quad (2.1)$$

เมื่อ b_n คือ ความกว้างของขดลวดที่ n
 r_n คือ รัศมีของชั้นขดลวดที่ n
 ϵ คือ เปรอริมิตติวิตีของไดอิเล็กตริก

ชั้นขดลวดที่อยู่ห่างจากแกนเหล็กมากกว่าจะมีพื้นที่ที่มากกว่า ดังนั้นก็จะมีค่าความจุไฟฟ้าสูงกว่าด้วย จึงเป็นผลให้แรงดันกระจายบนขดลวดไม่สม่ำเสมอเมื่อได้รับแรงดันทรานเซียนต์ จึงต้องทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละชั้นเท่าๆกัน นั่นคือที่กระบอกขดลวดรัศมี ความยาวของกระบอกขดลวดจะสั้นหรือกลับกัน การทำเช่นนี้เรียกว่าการจัดวางขดลวดแบบเกรดดิ่ง ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์

$$b_0 r_0 = b_1 r_1 = b_2 r_2 = \dots = b_n r_n \quad (2.2)$$

เมื่อ b_n คือ ความกว้างของขดลวดที่ n
 r_n คือ รัศมีของชั้นขดลวดที่ n

อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะจัดวางขดลวดแบบเกรดดิ่ง แรงดันกระจายบนขดลวดก็ยังไม่สม่ำเสมอ แรงดันตกคร่อมปลายบนสุดจะมีค่าสูงมาก การแก้ปัญหานี้อาจทำได้โดยใช้ลวดที่ปลายขดลวดแรงดันสูง ส่วนที่นิวทรัลของขดลวดแรงดันสูงก็ควรใส่ลวดเพื่อป้องกันการส่งแรงดันเสิร์จจากขดลวดแรงดันสูงเข้าสู่ขดลวดแรงดันต่ำ ผ่านค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดทั้งสอง

2.5 ฉนวนภายในหม้อแปลงทดสอบที่มีน้ำมันเป็นฉนวนแทรกซึม

เนื่องจากหม้อแปลงทดสอบจะต้องเป็นตัวกำเนิดแรงดันสูง ดังนั้นการออกแบบฉนวนจะต้องเป็นจุดที่ต้องพิจารณาอย่างรอบคอบเพราะมีผลต่อความปลอดภัยและอายุการใช้งานของตัวหม้อแปลงทดสอบด้วย ฉนวนของหม้อแปลงทดสอบอาจจะแยกเป็นฉนวนภายในได้แก่ ฉนวนขดลวด ฉนวนแทรกซึม การระบายความร้อน และฉนวนภายนอก

2.5.1 น้ำมันหม้อแปลง น้ำมันหม้อแปลงใช้เป็นฉนวนภายใน โดยน้ำมันหม้อแปลงนั้นจะทำหน้าที่เป็นฉนวนแทรกซึมและช่วยในการระบายความร้อน จะต้องมีความสมบัติทั้งทางฟิสิกส์ ทางเคมีและทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60296 [1] ซึ่งได้กำหนดคุณสมบัติดังกล่าวไว้คือ

-คุณสมบัติทางฟิสิกส์

1. ความหนืด น้ำมันหม้อแปลงจะต้องมีความหนืดต่ำ เพื่อให้มีการระบายความร้อนได้ดี ตามมาตรฐานกำหนดความหนืดที่ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต้องมีค่าน้อยกว่า 40 cst
2. จุดวาบไฟ คือ อุณหภูมิที่ไอ น้ำมันบนผิว น้ำมันติดไฟขึ้นได้เอง ตามข้อกำหนดนั้น จุดวาบไฟต้องไม่ต่ำกว่า $160\text{ }^{\circ}\text{C}$
3. จุดติดไฟ คือ อุณหภูมิที่น้ำมันจะเผาไหม้ ซึ่งจะมีค่าประมาณ $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือ 1.25 เท่า ของจุดวาบไฟ
4. ความหนาแน่น น้ำมันหม้อแปลงจะถูกใช้เป็นตัวระบายความร้อนจึงต้องมีจุดแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำ ตามข้อกำหนดที่ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ น้ำมันหม้อแปลงจะมีความหนาแน่น 0.895 กรัม /ลบ.ซม.
5. จุดเท โดยเป็นจุดที่อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันยังไหลได้ ตามมาตรฐานกำหนดไว้ที่ $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

-คุณสมบัติทางเคมี

1. ค่ามุลน้ำมัน เป็นผลจากน้ำมันทำปฏิกิริยากับอากาศจะเกิดสารที่มีลักษณะเป็นเมือก เมื่อเกาะตามผิวจะทำให้ประสิทธิภาพของการระบายความร้อนลดลงตามมาตรฐานกำหนดให้มีได้สูงสุด 0.1 % โดยน้ำหนัก
2. ความเป็นกรด มาตรฐานกำหนดให้มี KOH ได้ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อน้ำมัน 1 กรัม และจะต้องไม่มีส่วนผสมของสารกำมะถัน เพราะการที่มีสารกำมะถันจะทำให้เกิดการกัดกร่อนวัสดุในหม้อแปลง
3. ปริมาณน้ำเจือปน ตามมาตรฐานกำหนดให้มีน้ำเจือปนได้ไม่เกิน 35 ppm

-คุณสมบัติทางไฟฟ้า

น้ำมันทำหน้าที่เป็นฉนวน จึงต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูง มาตรฐานกำหนดค่านี้ไว้ไม่ต่ำกว่า 30 kV (ที่ระยะแกป 2.5 มม.)

2.5.2 กระดาษฉนวน กระดาษฉนวนใช้เป็นฉนวนระหว่างชั้นขดลวดระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำและระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก เนื่องจากกระดาษมีรูพรุน จึงต้องอบแห้งและแช่น้ำมันหม้อแปลง กระดาษฉนวนที่ใช้กันทั่วไป คือ

1. กระดาษคราฟท์ ผลิตจากเส้นใย (Fibers) ของไม้มีความหนาของกระดาษตั้งแต่ 0.045 มม. ถึง 0.380 มม. ซึ่งมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า
2. กระดาษอัดแรง เป็นกระดาษแข็งและหนากว่ากระดาษคราฟท์คือหนาตั้งแต่ 0.8 มม. ถึง 3.2 มม. ซึ่งมีความคงทนความร้อนได้เท่ากับ $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยที่ไม่ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพลงเมื่อกระดาษแห้งจะมีความคงทนของไดอิเล็กตริกได้ดีและการสูญเสียของไดอิเล็กตริกต่ำแต่กระดาษสามารถดูดซึมความชื้นได้ง่าย ดังนั้นในการสร้างหม้อแปลงจะอบส่วนแกนเหล็กและขดลวดที่ประกอบขึ้นรูปแล้วให้

แห้งแล้วนำไปจุ่มน้ำมันในถังหม้อแปลงเพื่อป้องกันความชื้นและรักษาความคงทนของไดอิเล็กตริกของกระดาษ ซึ่งกระดาษอัดแรงจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง

2.5.3 เส้นลวดอาบน้ำยาฉนวน ขดลวดจะพันด้วยเส้นลวดอาบน้ำยาฉนวน Poly Formol Resin (PVF) ซึ่งทนน้ำมันได้ดี เยี่ยม มีความเหนียว ยืดหยุ่นเป็นพิเศษ ทนต่อการขีดถู และสามารถนำความร้อนได้ถึง 180 °c การคำนวณรอบของขดลวดจะสามารถประมาณได้จากการคำนวณได้จากสมการ

$$N = \frac{E}{4.44fB\Phi} \quad (2.3)$$

การเลือกชนิดวัสดุที่จะนำมาทำเป็นขดลวดจะพิจารณาจากน้ำหนักต่อปริมาตร สภาพต้านทาน ความแข็งแรงทางกล ความคงทนต่อความกัดกร่อน การขยายตัว ราคาของวัสดุ รูปแบบและขนาดของขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำจะต้องคำนึงถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดต่างๆของขดลวดว่าจะต้องไม่เกินค่าที่ทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนหรือเกิดเบรกดาวน์ในฉนวน

2.6 ปลอกฉนวนนำสาย

ปลอกฉนวนนำสายทำหน้าที่เป็นฉนวนกั้นระหว่างส่วนที่เป็นแรงสูงกับส่วนที่ต่อลงดิน โดยปลอกฉนวนนำสายอาจจะทำมาจากวัสดุ เช่น พอร์ซเลน เส้นใยแก้ว โดยสำหรับหม้อแปลงที่ใช้ภายนอกอาคารปลอกฉนวนนำสายไฟอาจจะทำลักษณะเป็นครีปโดยจะเพิ่มระยะรั้วตามผิวเพื่อป้องกันการรบกวนไฟตามผิว

2.7 ตัวถัง

ตัวถังโลหะจะทำหน้าที่รับแรงทางกลที่เกิดจากน้ำหนักของหม้อแปลงและทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการระบายความร้อนอันเกิดจากกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง การถ่ายเทความร้อนในกรณีของหม้อแปลง ความร้อนที่จะเกิดการกระแสไฟฟ้าในตัวนำไฟฟ้าที่มีค่าความต้านทานของขดลวด ฟลักซ์แม่เหล็กที่ไหลในสารเฟอร์โรแมกเนติก รวมทั้งเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลในตัวถังและฝาปิดของหม้อแปลง ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงสูงขึ้นจากอุณหภูมิรอบข้าง โดยกรณีทั่วไปจะเป็นอากาศโดยความร้อนนี้จะถูกถ่ายเทออกไปได้สามทางคือ การนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ดังนั้นการออกแบบหม้อแปลงควรมีพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศเพียงพอโดยอุณหภูมิขดลวดต้องไม่เกินค่าที่กำหนด

2.8 แกนเหล็ก

แกนเหล็กจะทำหน้าที่เป็นทางผ่านที่ดีของเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อให้เกิดความเหนียวนำทางแม่เหล็ก โดยพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก จำนวนรอบขดลวดและแรงดันจะสัมพันธ์ตามสมการ

$$E_{rms} = 4.44fNBA \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ N คือ จำนวนรอบขดลวด
 F คือ ความถี่ที่ใช้งาน
 B คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่คล่องขดลวด
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

แกนเหล็กจะประกอบขึ้นจากแผ่นเหล็กบางเนื่องจากต้องการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก อันเกิดจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก การออกแบบหน้าตัดของแกนเหล็กจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมหลายชั้นอัดกันในวงกลมเพื่อให้สามารถใช้พื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าพื้นที่หน้าตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยม และเหตุผลทางกายภาพในการพันขดลวดให้มีลักษณะเป็นวงกลมได้ง่ายขึ้น ลดการเสียดสีระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก และเมื่อขณะใช้งานจะเกิดแรงระหว่างขดลวดก็จะไม่ทำให้ขดลวดเสียรูป และแกนเหล็กภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้เหล็กผสมซิลิคอน เพื่อเพิ่มค่าความต้านทานจำเพาะทำให้การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนลดลง (Eddy Current) เหล็กที่ผสมซิลิคอนสูงจะทำให้ฮิสเทอรีซิสลูป (Hysteresis Loop) แคบลง การสูญเสียฮิสเทอรีซิสก็จะลดลงด้วย เหล็กซิลิคอนจะมีเปอร์เซ็นต์ที่ต่ำที่สุดทำให้ใช้กระแสกระตุ้นในวงจรแม่เหล็กลดลงเหล็กที่ใช้อาจเป็นเหล็กกรีดร้อนหรือกรีดเย็น เหล็กกรีดร้อนจะให้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุด 1.45 Wb/m^2 ส่วนเหล็กกรีดเย็นจะให้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดมากกว่า 1.8 Wb/m^2 โดยส่วนใหญ่แล้วโรงงานหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้เหล็กกรีดเย็นประกอบแกนเหล็ก แม้ว่าราคาแพงกว่าแต่สามารถลดน้ำหนักแกนเหล็กได้มาก

2.9 ค่าสนามไฟฟ้าและค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในหม้อแปลงทดสอบ

ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าหมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้โดยไม่เกิดการเสียหายหรือเบรกดาวน์หรือทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ มีหน่วยเป็น kV/mm กล่าวคือค่าแรงดันต่อหน่วยความหนาของฉนวนหรือระยะห่างอิเล็กโทรด ในหม้อแปลงทดสอบสนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอหรือเป็นแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและสนามไฟฟ้าที่สำคัญจะต้องพิจารณาการออกแบบ และเลือกชนิดฉนวนให้เหมาะสมสามารถแบ่งสนามไฟฟ้าในหม้อแปลงทดสอบได้ดังนี้

1. ค่าสนามไฟฟ้าระหว่างเลย์เออร์กับเลย์เออร์ที่อยู่ติดกัน

ค่าสนามไฟฟ้าในส่วนนี้จะแบบสม่ำเสมอ (Uniform field) แบบทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วม (Concentric spheres) เนื่องจากเป็นขดลวดแบบซ้อนทับทรงกระบอกแกนร่วมสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าได้จากสมการ

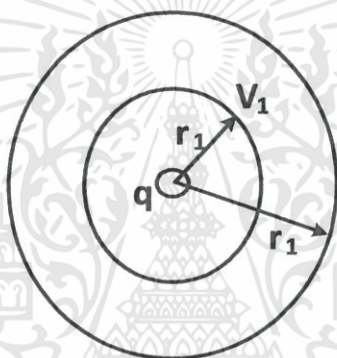
$$E_{\max} = \frac{U}{r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (2.5)$$

และมีแรงดันเบรกดาวน์

$$U_b = E_b \times r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2.6)$$

และมีค่าความจุไฟฟ้าระหว่างทรงกระบอกซ้อนกันร่วม

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.7 สนามไฟฟ้าแบบทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วม

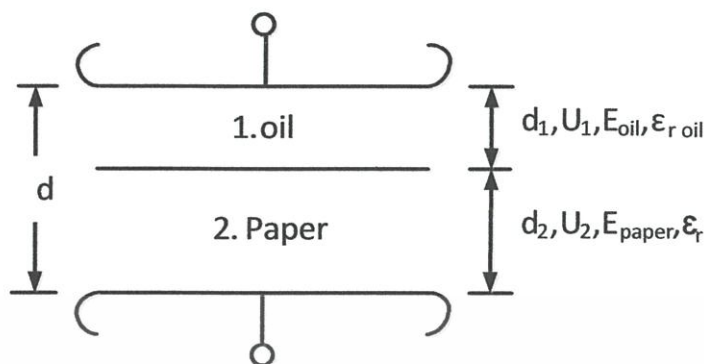
2. ค่าสนามไฟฟ้าระหว่างลเยอร์กับแกนเหล็กหรือส่วนที่เป็นฉนวนไฟฟ้าในสวนนี้พิจารณาว่าสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_{\max} = U/d \quad (2.8)$$

โดยที่ U = ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขดลวดกับขดลวดหรือระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก

D = ระยะห่างของแรงดันไฟฟ้าต่างศักย์

E_{\max} = สนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/mm)



รูปที่ 2.8 สนามไฟฟ้าแบบสมมาตรอเล็กโทรด

3. สนามไฟฟ้าระหว่างเลเยอร์นอกสุดกับเลเยอร์ชุดในสุดของขดลวดแรงดันสูง เลเยอร์ชั้นนอกสุดจะเป็นเลเยอร์ที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดคือ 150 kV เทียบกับกราวด์และเลเยอร์ชั้นในสุดจะเป็นเลเยอร์ที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเป็นศูนย์เพราะปลายขดลวดต่อกับกราวด์ไว้ ในส่วนนี้ค่าสนามไฟฟ้าเป็นแบบสมมาตรแบบทรงกระบอกซ้อนกัน ดังนั้นการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าแรงดันเบรกดาวน์ และความจุไฟฟ้าสามารถใช้วิธีเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้แล้วตอนต้น

2.10 ชั้นฉนวนซ้อนทับรวมในสนามไฟฟ้าสมมาตร

ฉนวนในหม้อแปลงจะใช้ฉนวนเหลวคือน้ำมันร่วมกับฉนวนแข็งคือกระดาษฉนวน น้ำมันหม้อแปลงอยู่ในลักษณะแทรกซึมช่วยในด้านการระบายความร้อน ส่วนฉนวนแข็งใช้จับยึดและรับน้ำหนักซึ่งสามารถทำให้เกิดการหักเหของสนามไฟฟ้าได้

สนามไฟฟ้าในฉนวนซ้อนทับรวมในหม้อแปลงยังเป็นแบบสมมาตรและสามารถคำนวณได้จาก $E=U/d$ การวางซ้อนกันของฉนวนไฟฟ้าเสมือนว่ามีคาปาซิเตอร์ต่อกัน ฉะนั้นประจุในคาปาซิเตอร์แต่ละชั้นจะมีค่าเท่ากันคือ

$$Q = C_1 \times U_1 = C_2 \times U_2 \quad (2.9)$$

เมื่อ C_1 และ C_2 เป็นค่าคาปาซิเตอร์ของฉนวนชั้นที่มี ϵ_1 และ ϵ_2 และเนื่องจาก

$$C_1 = \frac{\epsilon_1}{d_1}, \quad C_2 = \frac{\epsilon_2}{d_2} \quad (2.10)$$

อัตราส่วนแรงดัน

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \times \frac{d_1}{d_2} \quad (2.11)$$

$$U = U_1 + U_2 \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_1 = \frac{U}{\left(1 + \frac{\epsilon_1 d_2}{\epsilon_2 d_1}\right)} \quad (2.13)$$

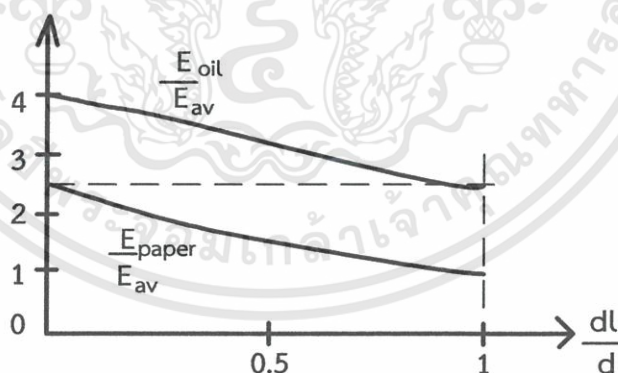
เพราะฉะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้า

$$E_1 = \frac{U_1}{d_1} = \frac{U}{d_1} \frac{1}{\left(1 + \frac{\epsilon_1 d_2}{\epsilon_2 d_1}\right)} = \frac{U}{d} \frac{\epsilon_1 / \epsilon_2}{\frac{d_1(\epsilon_2 - 1)}{d \epsilon_1} + 1} \quad (2.14)$$

$$E_2 = \frac{U_2}{d_2} = \frac{U}{d} \times \frac{1}{\frac{d_1(\epsilon_2 - 1)}{d \epsilon_1} + 1} \quad (2.15)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (2.16)$$

จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้า E_1 จะมากกว่า E_2 ตามอัตราส่วน ϵ_2 / ϵ_1 เมื่อ $\epsilon_2 > \epsilon_1$ และถ้าเทียบกับความเครียดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอจะเห็นได้ว่ายิ่งในฉนวนมีค่า ϵ ต่ำจะทำให้สนามไฟฟ้าสูงมากขึ้น



รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าฉนวนน้ำมันและกระดาษฉนวน

2.11 คำกำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

2.11.1. แรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบ

ขนาดแรงดันป้อนเข้าของหม้อแปลงทดสอบโดยทั่วไปจะมีค่าไม่เกิน 2 kV ส่วนแรงดันจ่ายออกขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบสูงสุดที่จะใช้โดยต้องสูงสูงกว่าค่าแรงดันคงทนอยู่ได้ของวัสดุทดสอบหรือสูงมากพอที่จะใช้ในการทดสอบการวาบไฟตามผิวและการเกิดเบรกดาวนเมื่อคำนึงถึงประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของหม้อแปลง ลักษณะรูปคลื่นแรงดันต้องเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60-1973 [2] กำหนดคือ เป็นแรงดันรูปคลื่นไซน์ที่เหมือนกันทั้งรูปคลื่นด้านบวกและ

เอกสารที่เขียนโดยเอกสารวิศวกรรมศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์ วัฒนศิริกุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านลบ มีอัตราส่วนระหว่างค่ายอดคลื่นต่อค่าประสิทธิผล (U_{peak}/U_{rms}) ของแรงดันไม่เกิน $\sqrt{2} \pm 5\%$ และผลรวมค่าประสิทธิผลของแรงดันฮาร์โมนิกต้องน้อยกว่า 5% ของค่าประสิทธิผลของแรงดันรูปคลื่นมาตรฐาน (Fundamental sine wave)

แรงดันเหนี่ยวนำ (Induce voltage) ของหม้อแปลงทดสอบหาได้เช่นเดียวกับหม้อแปลงทั่วไปโดยแปรผันตรงกับความถี่ จำนวนรอบของขดลวด พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก และความหนาแน่นฟลักซ์ ดังสมการ

$$e = 4.44 \times f \times N \times A_1 \times B \quad (2.17)$$

แรงดันเหนี่ยวนำต่อรอบ

$$e_t = 4.44 \times f \times A_1 \times B \quad (2.18)$$

เมื่อ

e = แรงดันเหนี่ยวนำ	(V)
e_t = แรงดันเหนี่ยวนำต่อรอบ	(V)
f = ความถี่ของแรงดัน	(Hz)
N = จำนวนรอบของขดลวด	(รอบ)
A_1 = พื้นที่หน้าตัดของเนื้อแกนเหล็ก	(m^2)
B = ความหนาแน่นฟลักซ์ในแกนเหล็ก	(Wb/m^2)

2.11.2. ขนาดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบใช้ในการทดสอบฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงซึ่งถือได้ว่าเป็นโพลส่วนใหญ่เป็นลักษณะของค่าความจุไฟฟ้า บางครั้งอาจเกิดการเบรกดาวน์หรือเจาะทะลุที่ฉนวนของวัสดุทดสอบทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้น กระแสลัดวงจรต้องสูงมากพอเพื่อให้สังเกตเห็นความบกพร่องของการฉนวนของวัสดุทดสอบได้อย่างชัดเจน แต่กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบและกำลังไฟฟาลัดวงจรต้องสอดคล้องกันและคำนึงถึงความปลอดภัยและอายุการใช้งานแล้ว กำลังไฟฟ้ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบควรมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่จะต้องป้อนให้กับโพลจึงต้องเผื่อแพคเตอร์ปลอดภัยไว้ด้วย กำลังไฟฟ้กำหนดของหม้อแปลงทดสอบคำนวณได้ดังนี้

$$S_n = 2 \times \pi \times f \times U^2 \times C \quad (VA) \quad (2.19)$$

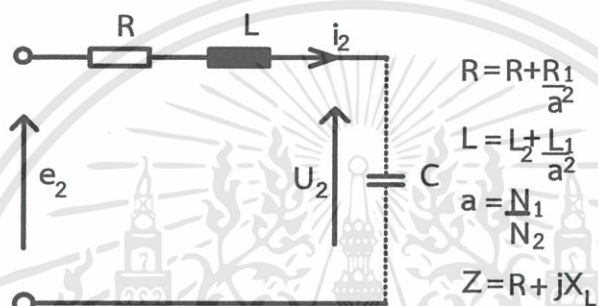
เมื่อ

S_n = กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบ	(VA)
U = แรงดันทดสอบ	(V)
C = ค่าความจุไฟฟ้า	(F)
f = ความถี่ของแรงดัน	(Hz)

หม้อแปลงทดสอบที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่สุด เช่น ลูกถ้วยฉนวน, หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง, กลไกสวิตช์ตัดตอนอัตโนมัติ และอื่นๆ

2.11.3. แรงดันและกำลังไฟฟ้าลัดวงจร

เมื่อทำการทดสอบจนเกิดเบรกความถี่หรือเกิดควาปไฟตามผิวของวัสดุทดสอบ แรงดันจ่ายออกของหม้อแปลงทดสอบจะลดลงจนเหลือเท่ากับแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงซึ่งพิจารณาได้จากวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.10 และเฟสเซอร์ไดอะแกรมดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของหม้อแปลงทดสอบแบบไม่คิดกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก

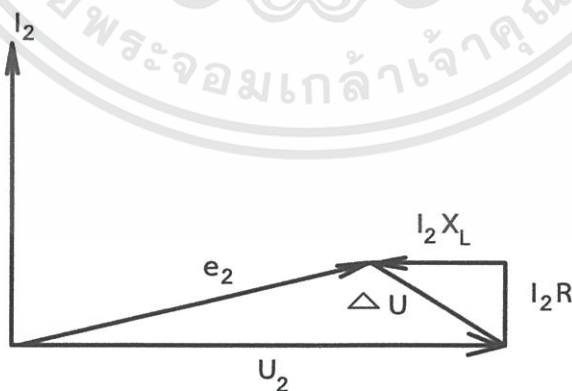
e_2 = แรงดันเหนี่ยวนำด้านจ่ายออก

U_2 = แรงดันจ่ายออก

R = ความต้านทานของหม้อแปลง

L = ตัวเหนี่ยวนำของหม้อแปลง

C = ความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ



รูปที่ 2.11 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงทดสอบ

แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์หาได้จากสมการ

$$\Delta U = \sqrt{(I_2 R)^2 + (I_2 X_L)^2} \quad (2.20)$$

แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ที่กระแสกำหนด I_{2n} หาได้จากสมการ

$$\Delta U_n = \sqrt{(I_{2n} R)^2 + (I_{2n} X_L)^2} = I_{2n} Z \quad (2.21)$$

แรงดันลัดวงจรหรือแรงดันอิมพีแดนซ์

$$\varepsilon_{sc} = \frac{\Delta U_n}{U_{2n}} = \sqrt{\varepsilon_R^2 + \varepsilon_X^2} \quad (2.22)$$

เมื่อ

ε_R = แรงดันตกคร่อมความต้านทาน

ε_X = แรงดันรีแอคแตนซ์

กำลังไฟฟ้าลัดวงจรจะมีค่าเป็น

$$S_{sc} = \frac{U_2^2}{Z} \quad (2.23)$$

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

$$S_{sc} = \frac{U_2^2}{Z} = \frac{U_{2n}^2 \times I_{2n}}{\Delta U_n} \quad (2.24)$$

$$S_{sc} = \frac{U_{2n} I_{2n}}{\varepsilon_{sc}} = \frac{S_n}{\varepsilon_{sc}} \quad (2.25)$$

โดยทั่วไปแรงดันลัดวงจรจะกำหนดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าลัดวงจรสามารถคำนวณได้ดังสมการ

S_{sc} = กำลังไฟฟ้าลัดวงจรของหม้อแปลงทดสอบ

S_n = กำลังไฟฟ้ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

ε_{sc} = % แรงดันลัดวงจร

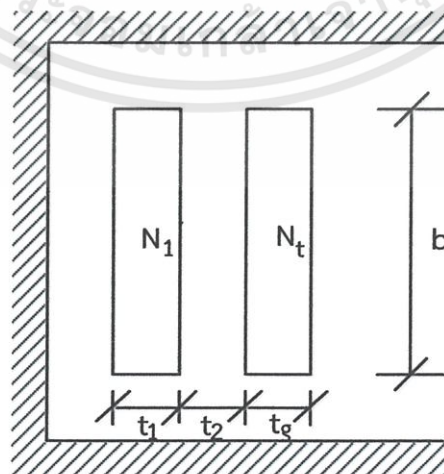
จากสมการข้างต้นจะพบว่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรจะแปรผกผันกับแรงดันลัดวงจร ดังนั้นแรงดันลัดวงจร E_{sc} จึงไม่ควรมีค่าต่ำเกินไปเพราะจะทำให้กำลังไฟฟ้าลัดวงจรและกระแสลัดวงจรมีค่าสูงเกินไปเป็นอันตรายต่อตัวหม้อแปลงทดสอบ

อย่างไรก็ตามแรงดันลัดวงจรก็ไม่ควรมีค่าสูงเกินไปเพื่อป้องกันการเกิดแรงดันเกินและการเกิดเรโซแนนซ์ เนื่องจากโหลดส่วนมากของหม้อแปลงทดสอบจะเป็นแบบตัวเก็บประจุซึ่งไม่ควรเกิน 30% และในกรณีที่ต่อใช้งานแบบขั้นบันได หม้อแปลงทดสอบแต่ละตัวจะต้องออกแบบให้ E_{sc} มีค่าต่ำพอ ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ E_{sc} รวมของการต่อแบบขั้นบันไดเกิน 30% เมื่อกำหนดกระแส I_n และแรงดันลัดวงจร E_{sc} มาให้ก็สามารถคำนวณกระแสลัดวงจร I_{sc} ที่แรงดันกำหนด U_n และกระแสเสิร์จไดนามิก I_{dy} ซึ่งเป็นตัวบอกลักษณะของแรงระเบิดที่เกิดขึ้นกับขดลวดได้ ดังสมการ

$$I_{sc} = \frac{I_n \times 100}{E_{sc}} \quad (2.26)$$

ในการใช้งานหม้อแปลงทดสอบในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง บางครั้งถ้าอุปกรณ์แรงสูงที่นำมาทดสอบไม่สามารถทนต่อแรงดันทดสอบก็จะเกิดการพังข้ามของแรงดันทดสอบสู่กราวด์อย่างรวดเร็ว ในสภาวะเช่นนี้เป็นเสมือนหนึ่งที่เกิดการลัดวงจรจากปลายขั้วของด้านแรงสูงสู่กราวด์ กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในสภาวะเช่นนี้จะทำให้เกิดความเครียดของลักษณะแรงกลอย่างมากกับขดลวดซึ่งหม้อแปลงทดสอบที่สร้างขึ้นนั้นจะต้องสามารถทนต่อแรงดันทางกลที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างได้โดยไม่ได้ได้รับความเสียหายดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลงทดสอบจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องทราบค่ากระแสลัดวงจรเพื่อจะได้นำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างอาทิเช่น ขดลวดแกนเหล็ก และการฉนวน

แรงดันลัดวงจรหรือแรงดันอิมพีแดนซ์มีค่าประมาณเท่ากับแรงดันรีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงที่จัดวางขดลวดแบบทรงกระบอกร่วมแกน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 หาได้จากสมการดังนี้



รูปที่ 2.12 มิติภายในของหม้อแปลงทดสอบเพื่อหาค่ารีแอกแตนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X = \frac{2 \times \pi \times f \times \mu_0 \times N_2^2}{b} \times \left[\frac{t_1 l_1}{3} + t_g l_g + \frac{t_2 t_2}{3} \right] \quad (2.27)$$

X	= ค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลง	(Ω)
f	= ความถี่ของแรงดันไฟฟ้า	(Hz)
μ_0	= ความซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ	($4\pi \times 10^{-7}$ Wb/Am)
l_1	= ความยาวเฉลี่ยของขดลวดแรงดันต่ำ	(m)
l_2	= ความยาวเฉลี่ยของขดลวดแรงดันสูง	(m)
l_g	= ความยาวเฉลี่ยของช่องว่างระหว่างขดลวดแรงดันต่ำกับขดลวดแรงดันสูง	(m)
b	= ความกว้างของขดลวด	(m)
t_1	= ความหนาของขดลวดแรงดันต่ำ	(m)
t_2	= ความหนาของขดลวดแรงดันสูง	(m)
t_g	= ความหนาเฉลี่ยของช่องว่างระหว่างขดลวดแรงดันต่ำกับขดลวดแรงดันสูง	(m)

จากสมการจะเห็นว่าค่ารีแอกแตนซ์ X แปรผันตรงกับจำนวนรอบของขดลวด N_2 ความหนาของขดลวด และช่องว่างระหว่างขดลวด t_1, t_2, t_g และความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดและช่องว่างระหว่างขดลวด l_1, l_2, l_g แต่จะแปรผกผันกับความกว้างของขดลวด b ดังนั้นการออกแบบให้รีแอกแตนซ์มีค่าน้อยทำได้โดยการออกแบบให้ $N_2, t_1, t_2, t_g, l_1, l_2, l_g$ มีค่าต่ำและให้ b มีค่าสูง

2.11.4. ขนาดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด

กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด หรือเรียกว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก(Core losses) โดยไม่คิดกำลังสูญเสียในขดลวด (Copper loss)

$$P_o = K_p \times K_M \times P_{base} \times \Sigma(b_1 \times G_1) \quad (2.28)$$

$K_p = 1.03$	$b_1 = L\text{-corner เท่ากับ } 0.98$
$K_M = 0.981$	$G_1 = \text{Weight of core}$
$P_{base} = \text{watt/kg}$	

1. ส่วนประกอบของกำลังสูญเสียแบบไร้ภาระ

1.1 การสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริก (Dielectric losses)

โดยทั่วไปกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงทดสอบมีค่าประมาณ 3-5% ของกระแสโหลดเต็ม (Full load current) ดังนั้นการสูญเสีย $I^2 R$ ในขดลวดเนื่องจากกระแสกระตุ้นจึงจำเป็นที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะต้องนำมาพิจารณาด้วยแต่แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงจำหน่ายมีระดับต่ำเพียง 0.24 kV จึงทำให้การสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริกไม่ต้องนำมาพิจารณา ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดจะประกอบด้วยส่วนสำคัญคือการสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ซิส, การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก และการสูญเสียไปในขดลวดแรงสูงโดยมีสมการในการคำนวณดังนี้

$$P_{o(Rhv)} = I^2 R_{hv} \quad (2.29)$$

1.2 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ซิสในแกนเหล็ก (Hysteresis loss component)

เป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในทางการกลับทิศทางของแม่เหล็ก การลดการสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ซิส สามารถทำได้โดยการใช้แกนเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิคอน (Silicon) การสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพหรือเกรดของแกนเหล็ก และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เลือกใช้ และเป็นสัดส่วนกับความถี่ของแรงดันไฟฟ้า มารดเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_h = f \times a_1 \times B^{c_1} \times \Delta P_h(B) \quad (2.30)$$

$$\Delta P_h(B) = f \times a_2 \times (B - B_h)^{c_2} \quad (2.31)$$

เมื่อ

$$a_1 = \text{ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ } 2.147 \times 10^{-3}$$

$$c_1 = \text{ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ } 2.079$$

$$a_2 = \text{ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ } 2.793$$

1.3. การสูญเสียในแกนเหล็กเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (Eddy current loss component)

แกนเหล็กเป็นตัวนำไฟฟ้าและในทำนองเดียวกันก็เป็นตัวนำเส้นแรงแม่เหล็กด้วยการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกนเหล็กจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก เป็นเหตุให้เกิดการไหลของกระแสในแกนเหล็กกระแสนี้เรียกว่ากระแสไหลวน ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและเกิดความร้อนขึ้นตามมา การลดการสูญเสียจากกระแสไหลวนสามารถทำได้โดยการใช้แกนเหล็กประกอบจากแผ่นเหล็กบางๆ และแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นจะต้องเคลือบด้วยฉนวน กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากกระแสไหลวนจะเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของความหนาของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นและกำลังสองของความถี่แรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$P_e(B_u) = f^2 \times a_e \times B^2 \quad (2.32)$$

เมื่อ

$$B = \text{ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (wb/m}^2\text{)}$$

$$A_e = \text{ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ } 2.275 \times 10^{-5}$$

$$F = \text{ความถี่แรงดันไฟฟ้า (Hz)}$$

ดังนั้นในการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในหม้อแปลงขณะไม่มีโหลดสามารถคำนวณได้จากผลรวมของสมการข้างต้น

2.11.5.ขนาดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดและน้ำหนักของขดลวด

กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดในหม้อแปลงอาจเรียกว่าการสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper loss) เกิดขึ้นจากการไหลของกระแสขณะมีโหลดในขดลวดของหม้อแปลงซึ่งจะประกอบด้วย การสูญเสียจากส่วนต่างๆ ดังนี้

1. กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลด

ความต้านทานของขดลวดสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$R = \frac{\rho \times L \times N}{a_w} \quad (\Omega) \quad (2.33)$$

เมื่อ

ρ = ความต้านทานจำเพาะของตัวนำ มีค่าเท่ากับ 2.78×10^{-8} ที่ 75°C

L = ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวด (m)

N = จำนวนรอบของขดลวด

A_w = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (m^2)

ดังนั้นเมื่อหาค่าความต้านทานของขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูงได้ก็สามารถ

คำนวณหา กำลังไฟฟ้าสูญเสีย I^2R ของแต่ละขดลวดได้ตามสมการ

$$P_L = I_p^2 R_p + I_s^2 R_s \quad (2.34)$$

เมื่อ

I_p และ R_p = กระแสและความต้านทานของขดลวดแรงสูง

I_s และ R_s = กระแสและความต้านทานของขดลวดแรงสูง

สำหรับการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวดและการสูญเสียปลั๊กย่อยสามารถหาได้จาก การปฏิบัติและทดลอง โดยกำหนดเป็นแฟคเตอร์ของการสูญเสีย I^2R ในขดลวด (k_4) มีค่าประมาณ 7% ของการสูญเสีย I^2R ในขดลวด ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดคำนวณได้ตามสมการ

$$W_L = P_L + (K_4 \times P_L) \quad (2.35)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดของหม้อแปลงจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิ 75°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. น้ำหนักของขดลวด

น้ำหนักของตัวนำที่ใช้เป็นวัสดุในการพันขดลวดขึ้นอยู่กับความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของวัสดุตัวนำ จำนวนรอบของขดลวดและพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$W_{cu} = D_w \times a_w \times L \times N \quad (2.36)$$

เมื่อ D_w = ความหนาแน่นของวัสดุของวัสดุตัวนำโดยทองแดงมีความหนาแน่นเท่ากับ $8.92 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ที่อุณหภูมิเท่ากับ 20°C

2.11.6. คุณสมบัติทางความร้อนของหม้อแปลง (Thermal characteristic of transformers)

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็กและขดลวดของหม้อแปลง เป็นสาเหตุทำให้เกิดความร้อนขึ้นและความร้อนนี้ต้องถูกระบายออกจากหม้อแปลง โดยมีอุณหภูมิที่ไม่ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ อุณหภูมิในหม้อแปลงคือสิ่งสำคัญที่มีผลต่อ kVA ที่กำหนด (Rated ,kVA) และอายุการใช้งานของหม้อแปลงทดสอบ

1. มาตรฐานของอุณหภูมิ (Temperature standards)

ตามมาตรฐาน IEC 60296 [1] ได้กำหนดขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงน้ำมัน ระบายความร้อนได้โดยวิธีธรรมชาติ (Oil immersed self cooled transformers) และมีอุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature) สูงสุดเท่ากับ 40°C

2. การถ่ายเทความร้อน (Mode of heat transfer)

ความร้อนในหม้อแปลงน้ำมันมีระบบถ่ายเทความร้อน 2 ขั้นตอน คือ

2.1 ระบบความร้อนของแกนเหล็กและขดลวดถ่ายเทสู่น้ำมัน

2.2 ระบบความร้อนของน้ำมันถ่ายเทสู่อากาศ

โดยความร้อนจะถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง หรือทั้ง 3 วิธีดังนี้ คือ วิธีการนำความร้อน (Conduction) วิธีการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ,วิธีการพาความร้อน (Convection)

2.11.7. การคำนวณค่าอินดักแตนซ์ของหม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบจะไม่พิจารณาค่ากระแสชั่วขณะเพราะในการกระตุ้นจะทำให้ลักษณะค้อยๆเพิ่มแรงดันเข้าที่ขดลวดแรงต่ำ สำหรับหม้อแปลงทดสอบการคำนวณค่าอินดักแตนซ์ทำได้ดังนี้

$$L = X_{sc} / (2 \times \pi \times f) \quad (2.35)$$

เมื่อ	L	คือค่าอินดักแตนซ์ของหม้อแปลงทดสอบ (H)
	X_{sc}	คือค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวด (Ω)
	f	คือความถี่ของแรงดันไฟฟ้า (Hz)

2.11.8. ระดับกำลังเสียง และระดับความดันของเสียงในหม้อแปลงทดสอบ

1. การคำนวณค่ากำลังของเสียง (Sound power level, dB)

$$L_{wt} = 68.4 + C_s + C_B + C_F + C_Q + C_T + C_L \quad (2.36)$$

เมื่อ	L_{wt}	= ระดับกำลังของเสียง (dB)
	C_s	= ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $20 \times \log(LH \times LP \times \sqrt{DK})$
	C_B	= ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $(23.6 \times B) - 33.6$
	C_F	= ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $45 \times \log(f/50)$
	C_Q	= ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ -2
	C_L	= ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อแกนเหล็กเป็นชนิด Overlap core

2. การคำนวณความดันของเสียง (Sound pressure level)

$$L_R = L_{wt} - 10 \log S_h \quad (dB) \quad (2.37)$$

เมื่อ	L_R	= ค่าความดันของเสียง (dB)
	S_h	= $2\pi R^2$ เท่ากับพื้นที่ผิวของครึ่งวงกลม รัศมี R เมตร (m^2)

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบ

3.1 ข้อกำหนดของหม้อแปลงทดสอบที่ต้องการออกแบบ

กำลังไฟฟ้า	S_n	150	kVA
แรงดันป้อนเข้า (แรงต่ำ)	V_1	416	V
แรงดันจ่ายออก (แรงสูง)	V_2	300	kV
กระแสป้อนเข้า	I_1	360.6	A
กระแสจ่ายออก	I_2	0.5	A
จำนวนเฟส		1	phase
ความถี่	f	50	Hz

3.2 การออกแบบแกนเหล็กและขดลวด [4]

หม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบนี้ ประกอบด้วย ขดลวดแรงต่ำ ขดลวดแรงสูง รูปลักษณะขดลวดทั้งสองเป็นแบบชั้นทรงกระบอกและแกนเหล็กจะเป็นแบบคอร์

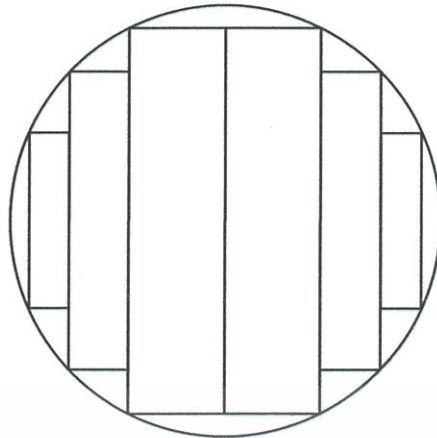
เนื่องจากแกนเหล็กที่ใช้ในการออกแบบมีค่า B_c ที่เข้าใกล้ย่านอิ่มตัวประมาณ 1.7 Wb/m^2 ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า B_c เท่ากับ 1.4 Wb/m^2 ซึ่งพื้นที่ตัดขวางแกนเหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$A_{Fe} = C \sqrt{\frac{S_n}{f}} \quad (3.1)$$

เมื่อ C คือ ค่าฟอร์มแฟกเตอร์ (Area Factor) ของหม้อแปลง ซึ่งโรงงานจะใช้ค่าประมาณ $7.15 \text{ cm}^2 \text{ J}^{-1/2}$ สำหรับหม้อแปลงแบบน้ำมัน ใช้ค่า $C = 7.15 \text{ cm}^2 \text{ J}^{-1/2}$

$$\begin{aligned} A_{Fe} &= 7.15 \sqrt{\frac{150 \times 10^3}{50}} \\ &= 391.6 \quad \text{cm}^2 \\ &= 0.03916 \quad \text{m}^2 \end{aligned}$$

ใช้ภาคตัดขวางแกนเหล็กเป็นแบบ Core Steel มีภาคตัดขวางเป็นแบบสี่เหลี่ยมอัดในวงกลม 3 ชั้น (Step lap = 3) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาคตัดขวางแกนเหล็ก

ใช้ค่าแฟกเตอร์พื้นที่แกนเหล็กในวงกลม ซึ่งเป็นค่าจากโรงงาน

$$F_{cu} = 0.851$$

ใช้ค่าแฟกเตอร์เนื้อแผ่นเหล็กซึ่งเป็นค่าจากบริษัทผู้ผลิตแผ่นเหล็ก

$$K_{Fe} = 0.97$$

รัศมีของภาคตัดขวางแกนเหล็กหาได้จากสมการที่ 3.2

$$d = \sqrt{\frac{A_{Fe} \times 4}{\pi \times F_{cu} \times K_{Fe}}} \quad (3.2)$$

$$= \sqrt{\frac{0.03916 \times 4}{\pi \times 0.851 \times 0.97}}$$

$$= 0.2458 \quad \text{m}$$

จึงเลือกใช้ $d = 0.246 \quad \text{m}$

$$= 24.6 \quad \text{cm}$$

จากการเลือกความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก B_c เท่ากับ 1.4 Wb/m^2 ดังนั้นฟลักซ์แม่เหล็ก

$$\emptyset = B_c \times A_{Fe} \quad (3.3)$$

$$= 1.4 \times 0.03916$$

$$= 0.055 \quad \text{Wb}$$

หาพื้นที่หน้าตัดของขดลวดในด้านแรงต่ำ (A_{lv}) และแรงสูง (A_{hv}) ตามลำดับ ดังนี้

พิจารณาด้านแรงต่ำ เมื่อเลือกใช้ขดลวดที่มีขนาด $3 \times 10 \text{ mm}$ และมีค่า current

density (J_1) เท่ากับ 1.35 A/mm^2

$$\begin{aligned}
 A_{lv} &= \frac{I_1}{J_1} & (3.4) \\
 &= \frac{360.6}{1.35} \\
 &= 267.1 \quad \text{mm}^2
 \end{aligned}$$

จึงทำการเลือกใช้ขดลวดในการพันแต่ละรอบจำนวน 9 เส้น ซึ่งแต่ละเส้นมีความหนา 3 mm และความกว้าง 10 mm เมื่อรวมพื้นที่ในแต่ละรอบของการพันในลักษณะนี้จะทำให้มีพื้นที่หน้าตัด (A_{lv}) เท่ากับ 270 mm^2 ซึ่งจะทำให้มีค่า current density ที่ไหลผ่านจริง เป็น 1.34 A/mm^2

จำนวนรอบขดลวดแรงต่ำ

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \frac{U_1}{4.44 \times f \times \phi} & (3.5) \\
 &= \frac{416}{4.44 \times 50 \times 0.055} \\
 &= 34.07 \quad \text{รอบ}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจึงพันขดลวดด้านแรงต่ำจำนวน 34 รอบ

พิจารณาด้านแรงสูง เมื่อเลือกใช้ขดลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 mm และมีค่า current density (J_1) เท่ากับ 1 A/mm^2 จะสามารถหาพื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้านแรงสูง (A_{hv}) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 A_{hv} &= \frac{I_2}{J_2} & (3.6) \\
 &= \frac{0.5}{1} \\
 &= 0.5 \quad \text{mm}^2
 \end{aligned}$$

หาค่าพื้นที่หน้าตัดขดลวดแรงสูงแต่ละเส้น ($A_{hv,1}$) เท่ากับ

$$A_{hv,1} = \frac{\pi d^2}{4} \quad (3.7)$$

$$= \frac{\pi \times 0.55^2}{4}$$

$$= 0.24 \text{ mm}^2$$

ดังนั้นจึงเลือกใช้ขดลวดจำนวน 2 เส้นในการพันแต่ละรอบทำให้มีพื้นที่หน้าตัดรวมเป็น 0.48 mm^2 ซึ่งจะทำให้มีค่า Current density ที่ไหลผ่านจริง เป็น 1.05 A/mm^2 จำนวนรอบขดลวดแรงสูง

$$N_2 = \frac{U_2}{4.44 \times f \times \phi} \quad (3.8)$$

$$= \frac{300 \times 10^3}{4.44 \times 50 \times 0.055}$$

$$= 24570.02 \text{ รอบ}$$

ดังนั้นจึงพันขดลวดด้านแรงสูงจำนวน 24519 รอบ

3.2.1 การออกแบบขดลวดแรงต่ำ

เส้นลวดของขดลวดแรงต่ำจะใช้ลวดทองแดงทับแบนหุ้มด้วยกระดาษฉนวน ซึ่งมีขนาดดังต่อไปนี้

ขดลวดเปลือย	3×10	mm
ขดลวดหุ้มกระดาษฉนวน	3.6×10.6	mm
พื้นที่ตัดขวางของขดลวดหุ้มกระดาษฉนวน	38.16	mm^2

ซึ่งในการพันแต่ละรอบจะใช้ขดลวดจำนวน 9 เส้นพันไปพร้อมๆ กัน ทำให้ที่พื้นที่ภาคตัดขวางในแต่ละรอบของการพัน เท่ากับ 343.44 mm^2

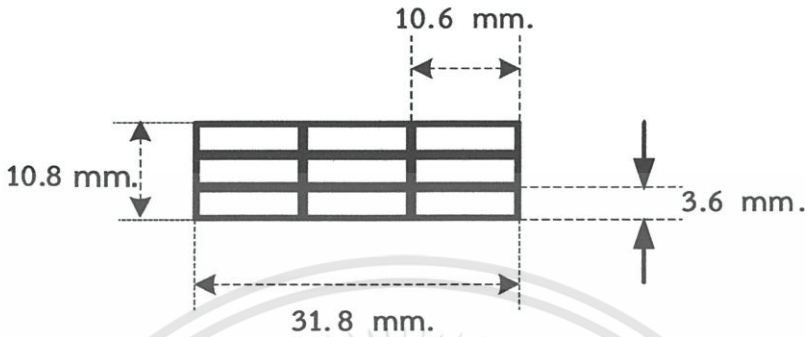
โดยมีการพันขดลวดทางด้านแรงต่ำเป็นทรงกระบอก (N_1) จำนวน 34 รอบ โดยแบ่งการพันเป็น 2 ชั้น ชั้นละ 17 รอบ จากการออกแบบแกนเหล็กทำให้ทราบว่าแกนเหล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง (Core diameter) 246 mm และทำการหุ้มด้วยกระดาษฉนวนหนา 12 mm จึงทำการเริ่มพันขดลวดแรงต่ำ (Inner diameter LV) ที่เส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ

$$\text{Inner diameter LV} = \text{Core diameter} + (2 \times \text{ความหนากระดาษฉนวนหุ้มแกนเหล็ก}) \quad (3.9)$$

$$= 246 + (2 \times 12)$$

$$= 270 \text{ mm}$$

จากการออกแบบจะพันขดลวดไปที่ละ 9 เส้นพร้อมๆกัน ทำให้ แต่ละกลุ่มของขดลวดที่พันไปมีความหนาเท่ากับ $3.6 \times 3 = 10.8 \text{ mm}$ และมีความกว้างเท่ากับ $10.6 \times 3 = 31.8 \text{ mm}$ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาคตัดขวางของขดลวดแรงต่ำในแต่ละชุด

ความกว้างของขดลวดแรงต่ำเมื่อพันบนแกนเหล็ก (x_1)

$$\begin{aligned} x_1 &= (31.8 \times (\text{จำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำแต่ละชั้น})) \\ &\quad + \text{LV Tolerance axis} + \text{transpose space} \\ &= (31.8 \times (17+1)) + 3 + 12.7 \\ &= 588 \text{ mm.} \end{aligned} \quad (3.10)$$

โดยที่ LV Tolerance axis คือ ระยะเผื่อในการขยายตัวทางด้านกว้างของขดลวดแรงต่ำ

Transpose space คือ ระยะเว้นว่างสำหรับการสลับตำแหน่งสาย

ความหนาของขดลวดแรงต่ำเมื่อพันบนแกนเหล็ก (t_1)

$$\begin{aligned} t_1 &= (2 \times 10.8) + (\text{OD in LV} \times \text{OD thick}) + \text{Tolerance radial} \\ &= (2 \times 10.8) + (1 \times 6) + 1.6 \\ &= 29.2 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.11)$$

โดยที่ OD in LV คือ จำนวนชั้นของ Duct Piece ที่อยู่ในขดลวดแรงต่ำ
OD thick คือ ความหนาของ Duct Piece ที่อยู่ในขดลวดแรงต่ำ
LV Tolerance axis คือ ระยะเผื่อในการขยายตัวทางด้านหนาของขดลวดแรงต่ำ

ซึ่งเมื่อพันขดลวดแรงต่ำบนแกนเหล็กแล้วจะทำให้มีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง (Outer diameter LV) เท่ากับ

$$\text{Outer diameter LV} = \text{Inner diameter LV} + (2 \times t_1) \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับค่าใช้งาน $270 + (2 \times 29.2)$ นี้ ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 328.4 \text{ mm}$$

จะได้ ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดแรงต่ำ (l_1)

$$\begin{aligned} l_1 &= \frac{\pi(270 + 328.4)}{2} & (3.13) \\ &= 940 \text{ mm} \\ &= 0.940 \text{ m} \end{aligned}$$

น้ำหนักทองแดงของขดลวดแรงต่ำ

$$\begin{aligned} w_1 &= N_1 \times A_1 \times l_1 \times 8.89 \times 10^{-3} & (3.14) \\ &= 34 \times (9 \times 30) \times 0.940 \times 8.89 \times 10^{-3} \\ &= 76.7 \text{ kg} \end{aligned}$$

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวดแรงต่ำ

$$\begin{aligned} P_1 &= 2.37 \times 10^{-4} W_1 \times 1.1 \times 10^{-4} & (3.15) \\ &= 2.37 \times (134.0)^2 \times 76.7 \times 1.1 \times 10^{-4} \\ &= 356.7 \text{ W} \end{aligned}$$

ความต้านทานของขดลวดแรงต่ำที่ 75 องศาเซลเซียส

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{P_1}{1.1 \times I_1^2} & (3.16) \\ &= \frac{356.7}{1.1 \times 360.6^2} \\ &= 0.00249 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดแรงต่ำที่ 75 องศาเซลเซียส

$$\begin{aligned} P_{R1} &= I_1^2 \times R_1 & (3.17) \\ &= 360.57^2 \times 0.00249 \\ &= 323.72 \text{ W} \end{aligned}$$

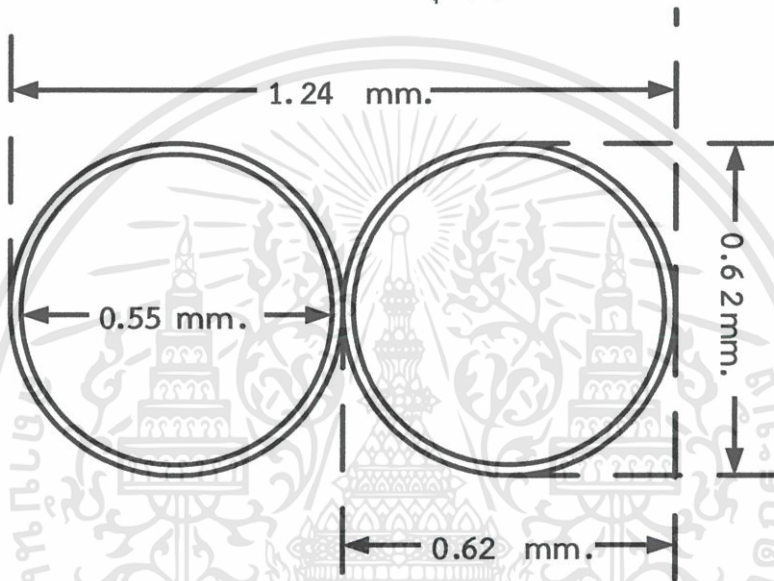
3.2.2 การออกแบบขดลวดแรงสูง

จากข้อ 3.2 เส้นลวดของขดลวดแรงสูงจะใช้ขดลวดอาบน้ำยา (PVF) ซึ่งมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่หน้าตัด ดังต่อไปนี้

เส้นผ่านศูนย์กลางลวดเปลือย	0.55	mm
เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดอาบน้ำยา (PVF)	0.62	mm
พื้นที่ภาคตัดขวางลวดเปลือย	0.23758	mm ²

จำนวนรอบทั้งหมดของขดลวดแรงสูง $N_2 = 24519$ รอบ โดยการพันไปพร้อมกันทีละ 2 เส้น

ทำให้พื้นที่หน้าตัดของการพันแต่ละชุด (A_2) เท่ากับ $0.23758 \times 2 = 0.47516 \text{ mm}^2$



รูปที่ 3.3 ภาคตัดขวางของขดลวดแรงสูงที่ใช้พันในแต่ละชุด

ขดลวดพันแบบขดลวดชั้นทรงกระบอก โดยจะแบ่งเป็น 63 ชั้น และแบ่งเป็น 10 กลุ่มย่อย โดยพันชั้นที่ 1 จำนวน 474 รอบชั้นถัดไปจะลดลงชั้นละ 3 รอบ ตั้งแต่ชั้นที่ 31 เป็นต้นไป จำนวนรอบการพันจะลดลงชั้นละ 2 รอบ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 จำนวนขดลวดที่พันในแต่ละชั้น

ชั้น	reduce	turn	Total turn
1	0	474	474
2	3	471	945
3	3	468	1413
4	3	465	1878
5	3	462	2340
6	3	459	2799
7	3	456	3255
8	3	453	3708
9	3	450	4158
10	3	447	4605
11	3	444	5049
12	3	441	5490
13	3	438	5928
14	3	435	6363
15	3	432	6795
16	3	429	7224
17	3	426	7650
18	3	423	8073
19	3	420	8493
20	3	417	8910
21	3	414	9324
22	3	411	9735
23	3	408	10143
24	3	405	10548
25	3	402	10950
26	3	399	11349
27	3	396	11745
28	3	393	12138
29	3	390	12528
30	3	387	12915
31	2	385	13300
32	2	383	13683
33	2	381	14064
34	2	379	14443
35	2	377	14820
36	2	375	15195
37	2	373	15568
38	2	371	15939
39	2	369	16308
40	2	367	16675
41	2	365	17040
42	2	363	17403
43	2	361	17764
44	2	359	18123
45	2	357	18480
46	2	355	18835
47	2	353	19188
48	2	351	19539
49	2	349	19888
50	2	347	20235
51	2	345	20580
52	2	343	20923
53	2	341	21264
54	2	339	21603
55	2	337	21940
56	2	335	22275
57	2	333	22608
58	2	331	22939
59	2	329	23268
60	2	327	23595
61	2	325	23920
62	2	323	24243
63	2	321	24564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป้าหมายในการพัน คือ 24519 รอบ แต่ทั้งนี้สามารถพันขดลวดแรงสูงได้ถึง 24564 รอบ

$$\begin{aligned} \text{แรงดันต่อรอบ} &= \frac{300000}{24519} \\ &= 12.235 \quad \text{v} \\ \text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น} &= 12.235 \times 2 \times 474 \\ &= 11598.78 \quad \text{v} \end{aligned}$$

ทั้งนี้ในการออกแบบจะทำการใส่กระดาษฉนวนคั่นระหว่างชั้นของขดลวดแรงสูง คือ บริเวณขอบนอกของการพันจะใส่กระดาษฉนวน 11 แผ่น บริเวณแนวกลางของการพันจะใส่กระดาษฉนวน 5 แผ่น โดยกระดาษฉนวนสำหรับแรงสูงจะมีความหนา 0.13 mm.

ความกว้างของขดลวดแรงสูงเมื่อพันบนแกนเหล็ก (x_2)

$$\begin{aligned} x_2 &= \text{จำนวนรอบของขดลวดชั้นแรก} \times \text{จำนวนขดลวดแต่ละชุด} \times \text{PVF} \quad (3.18) \\ &= 474 \times 2 \times 0.62 \\ &= 588 \quad \text{mm.} \end{aligned}$$

ในการพันขดลวดทางด้านแรงสูงนั้นจะต้องมีการใส่กระดาษฉนวนซึ่งจะสามารถหาความหนาเฉลี่ยของกระดาษฉนวนที่ใช้ในแต่ละชั้น (List thick to cal Radial HV) คือ

$$\begin{aligned} \text{List thick to cal Radial HV} &= \frac{(\text{จำนวนกระดาษฉนวนที่ขอบนอก}/2)}{\text{X ความหนาของกระดาษฉนวนแรงสูง}} \quad (3.19) \\ &= \frac{(11/2) \times 0.13}{1} \\ &= 0.715 \quad \text{mm} \end{aligned}$$

ทั้งนี้จะสามารถหาความหนาของกระดาษฉนวนทั้งหมดที่จะพันในด้านแรงสูง (List) คือ

$$\begin{aligned} \text{List} &= (\text{จำนวนชั้นของการพัน}-1) \times \text{List thick to cal Radial HV} \quad (3.20) \\ &= (63-1) \times 0.715 \\ &= 44.33 \quad \text{mm} \end{aligned}$$

ดังนั้นหาความหนาของขดลวดแรงสูงเมื่อพันบนแกนเหล็ก (t_2)

$$t_2 = (\text{ความหนาของขดลวดแรงสูง} \times \text{จำนวนชั้น}) + \text{List HV Tolerance } r \quad (3.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่คำนวณ $(0.62 \times 63) + 44.33 + 2$ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 85 \text{ mm}$$

จากการพันขดลวดแรงต่ำจนเสร็จที่ระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง (Outer diameter LV) 328.4 mm. จากนั้นทำการหุ้มด้วยฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ (Main duct) หนา 16 mm. ทำให้ระยะการเริ่มพันขดลวดแรงสูง (Inner diameter HV) จะเริ่มพันที่ระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{Inner diameter HV} &= \text{Outer diameter LV} + (2 \times \text{Main duct}) & (3.22) \\ &= 328.4 + (2 \times 16) \\ &= 360 \text{ mm} \end{aligned}$$

เมื่อทำการพันขดลวดแรงสูงพร้อมกับการหุ้มฉนวนระหว่างชั้น จะทำให้มีความหนาของการพันขดลวดแรงสูง

$$\text{HV thickness } (t_2) = 85 \text{ mm.}$$

ทำให้มีระยะเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยในการพัน

$$\text{HV mean turn} = 446 \text{ mm.}$$

ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดแรงสูง (L_2)

$$\begin{aligned} L_2 &= \frac{\pi(360+446)}{2} & (3.23) \\ &= 1400 \text{ mm} \\ &= 1.4 \text{ m} \end{aligned}$$

และจะสิ้นสุดการพันขดลวดแรงสูงที่ระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง

$$\begin{aligned} \text{Outer diameter HV} &= \text{Inner diameter HV} + (2 \times t_2) & (3.24) \\ &= 360 + (2 \times 85) \\ &= 531 \text{ mm} \end{aligned}$$

หลังจากการพันขดลวดแรงสูงแล้วในแต่ละกลุ่มของขดลวด (ทั้งนี้ทำการแบ่งเป็น 10 กลุ่มย่อย) จะต้องมีการพันฉนวนหุ้มในแต่ละกลุ่มซึ่งใช้ฉนวนที่มีความหนา 8.5 mm. เมื่อรวมความหนาของฉนวนคั่นแต่ละกลุ่มจะได้ความหนารวมของฉนวนที่คั่นแต่ละชั้น (Total wrap Insulator) เท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{Total wrap Insulator} &= (\text{จำนวนกลุ่ม}-1) \times \text{ความหนาของฉนวนคั่นแต่ละกลุ่ม} & (3.25) \\ &= (10-1) \times 8.5 \\ &= 76.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้ขอบนอกสุดของการพันขดลวดอยู่ที่ระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง

$$\begin{aligned} \text{Outer coil with wrap} &= \text{Outer diameter HV} + (2 \times \text{Total wrap Insulator}) \quad (3.26) \\ &= 531 + (2 \times 76.5) \\ &= 684 \quad \text{mm.} \end{aligned}$$

การหาน้ำหนักของขดลวดแรงสูง

$$\begin{aligned} W_2 &= N_2 \times A_2 \times l_2 \times 8.89 \times 10^{-3} \quad (3.27) \\ &= 24519 \times 0.475 \times 1.4 \times 8.89 \times 10^{-3} \\ &= 145.1 \quad \text{kg} \end{aligned}$$

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวดแรงสูง

$$\begin{aligned} P_2 &= 2.37 \times J^2 W_2 \times 1.1 \times 10^{-4} \quad (3.28) \\ &= 2.37 \times (105)^2 \times 145.1 \times 1.1 \times 10^{-4} \\ &= 418.7 \quad \text{W} \end{aligned}$$

ความต้านทานของขดลวดแรงสูงที่ 75 องศาเซลเซียส

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{P_2}{1.1 \times l_2^2} \quad (3.29) \\ &= \frac{418.7}{1.1 \times 0.5^2} \\ &= 1522.6 \quad \Omega \end{aligned}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดแรงสูงที่ 75 องศาเซลเซียส

$$\begin{aligned} P_{R2} &= l_2^2 \times R_2 \quad (3.30) \\ &= 0.5^2 \times 1522.6 \\ &= 380.65 \quad \text{W} \end{aligned}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดรวมที่ 75 องศาเซลเซียส

$$P_{RT} = P_{R1} + P_{R2} \quad (3.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= 323.72 + 380.65 \\
 &= 704.37 \text{ W}
 \end{aligned}$$

ค่าความต้านทานของหม้อแปลงทดสอบ

$$\begin{aligned}
 R_t &= P_{RT} / I_2^2 \\
 &= 704.37 / 0.5^2 \\
 &= 2817.36 \ \Omega
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

เปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทาน

$$\begin{aligned}
 \epsilon_r &= \left(\frac{I_2 \times R_t}{U_2} \right) \times 100 \\
 &= \frac{0.5 \times 2817.36}{300000} \times 100 \\
 &= 0.47 \%
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

คำนวณค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงได้จากสมการ

$$X = \frac{2\pi f \mu_0 N^2}{b} \times \left(\frac{t_1 l_1}{3} + t_g l_g + \frac{t_2 l_2}{3} \right) \tag{3.34}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 X &= \text{รีแอกแตนซ์ของหม้อแปลง } (\Omega) \\
 f &= 50 \text{ Hz} \\
 \mu_0 &= \text{ความซึมซาบแม่เหล็กของอากาศเท่ากับ } 4\pi \times 10^{-7} \\
 l_1 &= \text{ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดแรงต่ำ} \\
 &= 940 \text{ mm} = 0.94 \text{ m} \\
 l_2 &= \text{ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดแรงสูง} \\
 &= 1400 \text{ mm} = 1.4 \text{ m} \\
 l_g &= \text{ความยาวรอบเฉลี่ยของ Oil duct} \\
 &= \pi \times (\text{Outer diameter LV} + \text{ความหนาของ Oil duct}) \\
 &= 3.14 \times (328.4 + 16) \\
 &= 1081 \text{ mm} = 1.081 \text{ m} \\
 b &= \text{ความสูงของขดลวดแรงสูง} \\
 &= 0.446 \text{ m} \\
 t_1 &= \text{ความหนาของขดลวดแรงต่ำ} \\
 &= 29.2 \text{ mm} = 0.029 \text{ m} \\
 t_2 &= \text{ความหนาของขดลวดแรงสูง} \\
 &= 85 \text{ mm} = 0.085 \text{ m}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักศึกษาใช้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} t_g &= \text{ความหนาของ Oil duct} \\ &= 16 \text{ mm} = 0.016 \text{ m} \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการจะได้

$$\begin{aligned} X &= \frac{2\pi \times 50 \mu_0 \cdot 24564^2}{0.446} \times \left(\frac{0.029 \times 0.94}{3} + 0.016 \times 1.081 + \frac{0.085 \times 1.4}{3} \right) \\ &= 532145.49 \times (0.0091 + 0.01729 + 0.039) \\ &= 34800.186 \Omega \end{aligned}$$

เปอร์เซ็นต์แรงดันรีแอกแตนซ์หาได้จากสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= (X \times I_2) / U_2 \times 100 \\ &= (34800.186 \times 0.5) / 300000 \times 100 \\ &= 5.8 \% \end{aligned} \quad (3.35)$$

เปอร์เซ็นต์แรงดันอิมพีแดนซ์หาได้จากสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \epsilon_{sc} &= \sqrt{\epsilon_R^2 + \epsilon_x^2} \\ &= \sqrt{0.47^2 + 5.8^2} \\ &= 5.81 \% \end{aligned} \quad (3.36)$$

กำลังไฟฟ้าลัดวงจร

$$\begin{aligned} I_{sc} &= I_2 \times 100 / \epsilon_{sc} \\ &= (0.5 \times 100) / 5.81 \\ &= 8.6 \text{ A} \end{aligned} \quad (3.37)$$

กระแสลัดวงจรเสิร์จไดนามิก

$$\begin{aligned} I_{dy} &= 2.5 \times I_{sc} \\ &= 2.5 \times 8.6 \\ &= 21.5 \text{ A} \end{aligned} \quad (3.38)$$

ค่าอินดักแตนซ์ของหม้อแปลงทดสอบ

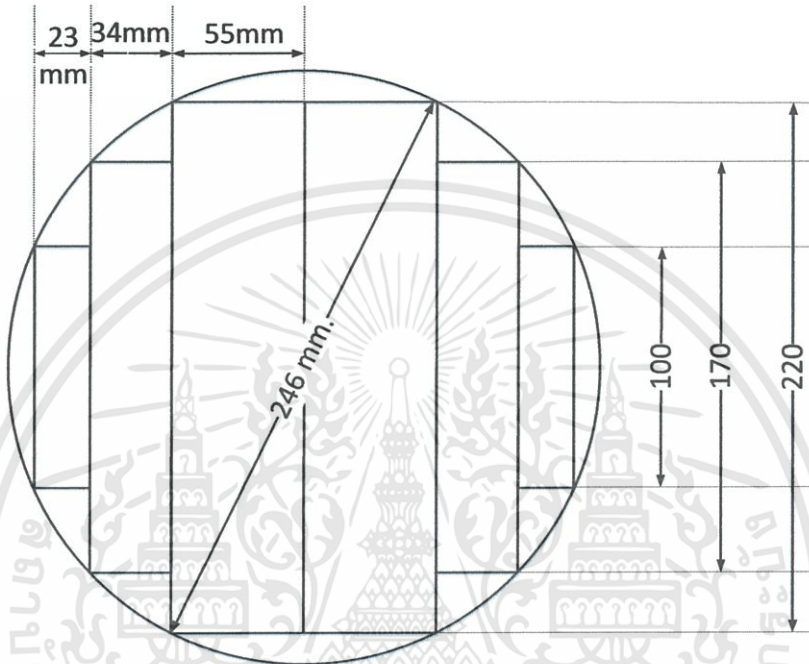
$$L = X / 2\pi f \quad (3.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 1093.28 \text{ H}$$

3.2.3 การออกแบบแกนเหล็ก [5]

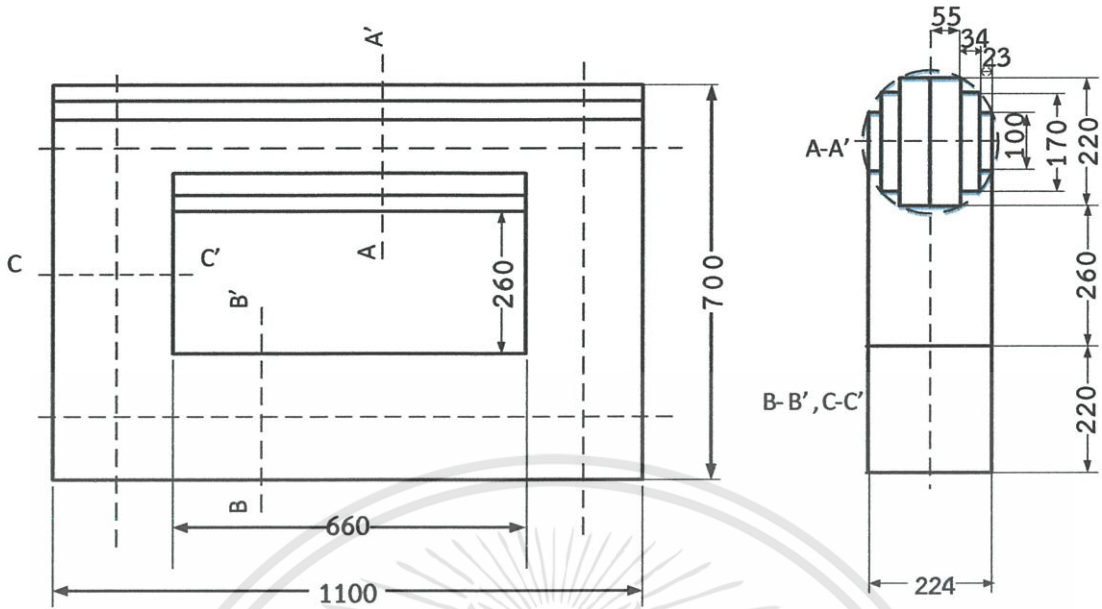
จากการคำนวณการออกแบบแกนเหล็กในหัวข้อที่ 3.2 ซึ่งได้พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กเท่ากับ 0.03916 m^2 โดยออกแบบตามรูปดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.4 รูปร่างและขนาดภาคตัดขวางแกนเหล็ก

จากรูปที่ 3.4 ทำการออกแบบแกนเหล็กในส่วนที่มีการพันขดลวดจะเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมอัดในวงกลมโดยมีค่าต่างๆดังนี้

เส้นผ่านศูนย์กลางแกนเหล็ก	246	mm
แกนเหล็กชั้นที่หนึ่ง ยาว/หนา	220/55	mm
แกนเหล็กชั้นที่สอง ยาว/หนา	170/34	mm
แกนเหล็กชั้นที่สาม ยาว/หนา	100/23	mm



รูปที่ 3.5 แกนเหล็กทั้งหมด

พิจารณาจากรูปที่ 3.5

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่ภาคตัดขวาง A-A ; } A_{fe} &= 2 \times [(220 \times 55) + (170 \times 34) + (100 \times 23)] \\
 &= 39160 \quad \text{mm}^2 \\
 &= 0.03916 \quad \text{m}^2 \\
 \text{พื้นที่ภาคตัดขวาง B-B ; } B_{fe} &= 220 \times 224 \\
 &= 49280 \quad \text{mm}^2 \\
 &= 0.04928 \quad \text{m}^2 \\
 \text{พื้นที่ภาคตัดขวาง C-C ; } C_{fe} &= 220 \times 224 \\
 &= 49280 \quad \text{mm}^2 \\
 &= 0.04928 \quad \text{m}^2
 \end{aligned}$$

จากการออกแบบการพันขดลวดทำให้ทราบว่าต้องพันขดลวดในแนวรัศมี (radial) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 701 mm. และระยะการพันในด้านยาว (Axial) เท่ากับ 558 mm.

ดังนั้นในการออกแบบระยะความยาวของแกนเหล็ก (Window yoke) และความสูงของแกนเหล็ก (Window leg) จะออกแบบให้มีระยะดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{Window yoke} &= x_1 + (2 \times \text{End Insulator}) + (2 \times \text{Gap to leg}) \quad (3.40) \\
 &= 588 + (2 \times 25) + (2 \times 11) \\
 &= 660 \quad \text{mm}
 \end{aligned}$$

เมื่อ End Insulator คือ ระยะของฉนวนที่ใช้ในการปิดทางด้านหัว-ท้าย

Gap to leg คือ ระยะช่องว่างที่เว้นไว้ก่อนถึงแกนเหล็กที่เป็นด้านขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \text{Window leg} &= (\text{Outer coil with wrap} - \text{ความยาวแกนเหล็ก} \\
 &\quad \text{ชั้นที่หนึ่ง})/2 + \text{Distance to bottom} \quad (3.41) \\
 &= (684 - 220)/2 + 19 \\
 &= 251 \quad \text{mm}
 \end{aligned}$$

เมื่อ Distance to bottom คือ ระยะช่องว่างระหว่างขดลวดที่พันเสร็จแล้วถึงแกนเหล็กทางด้านล่าง

ทั้งนี้ทำการออกแบบโดยให้มีระยะ Window leg เท่ากับ 260 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.5

จากกราฟการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็กชนิด M4 (ซึ่งแต่ละแผ่นมีความหนา 0.27 mm)

จะได้ค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้ากำลังไฟฟ้าต่อกิโลกรัม ที่ $B_c = 1.4 \text{ Wb/m}^2$
 จะได้ $P'_{fe} = 0.68 \text{ W/kg}$

หาปริมาตรของแกนเหล็กจาก

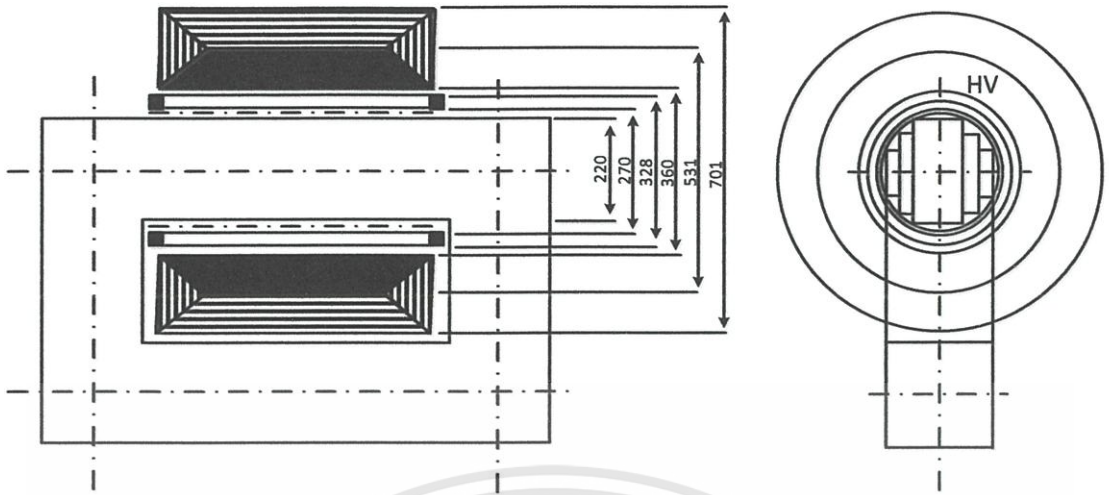
$$\begin{aligned}
 V_c &= (A_{fe} \times 1100) + (B_{fe} \times 1100) + 2 \times (C_{fe} \times 260) \quad (3.31) \\
 &= (39160 \times 1100) + 2 \times (260 \times 224 \times 220) + (1100 \\
 &\quad \times 224 \times 220) \quad (3.42) \\
 &= 0.1229 \quad \text{m}^3
 \end{aligned}$$

หาน้ำหนักของแกนเหล็กจาก

$$\begin{aligned}
 W_c &= V_c \times \text{ความหนาแน่นของเหล็ก M4} \quad (3.43) \\
 &= 0.1229 \times 7650 \\
 &= 940.185 \quad \text{kg}
 \end{aligned}$$

หาความสูญเสียในแกนเหล็กจาก

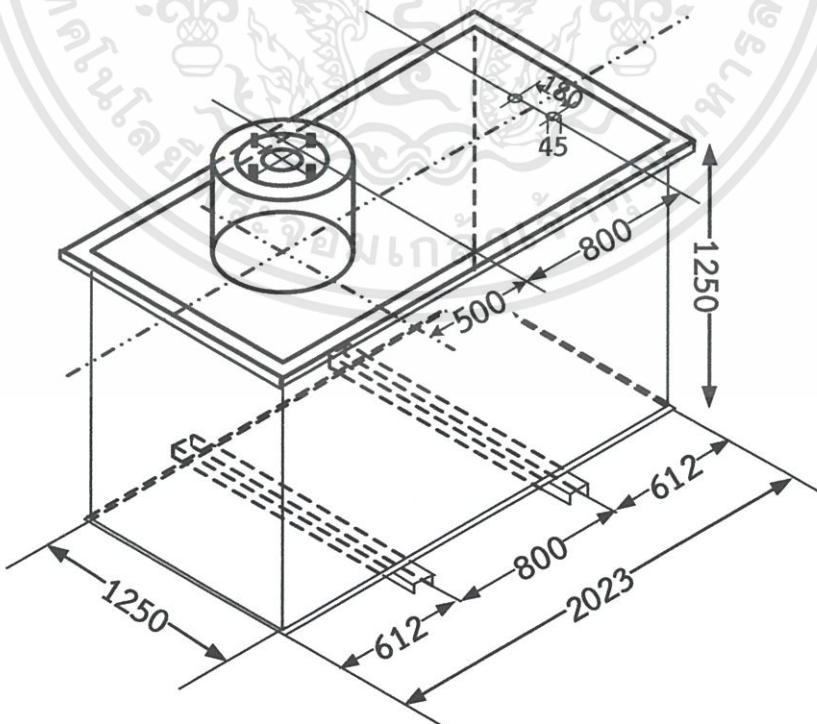
$$\begin{aligned}
 P_c &= W_c \times P'_{fe} \quad (3.44) \\
 &= 940.185 \times 0.68 \\
 &= 639.32 \quad \text{w}
 \end{aligned}$$



รูปที่ 3.6 แกนเหล็กเมื่อทำการพันขดลวดแล้ว

3.3 การออกแบบตัวถัง [6]

ขนาดของตัวถังถูกกำหนดด้วยขนาดของโครงสร้างภายในหม้อแปลง คือ ขดลวด และ แกนเหล็ก ซึ่งตัวถังจะเป็นตัวระบายความร้อนให้กับหม้อแปลง ผ่านทางผิวของตัวถัง ในกรณีนี้ หม้อแปลงเป็นหม้อแปลงทดสอบจึงไม่จำเป็นที่ตัวถังจะต้องมีครีปเพื่อระบายความร้อน เนื่องจากเป็น การใช้งานในช่วงเวลาสั้นๆ ดังนั้นพื้นผิวของถังที่เรียกก็เพียงพอในการระบายความร้อนแล้ว และยังมี การใช้เหล็กตามทางด้านข้างตัวถัง เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับตัวถัง จากความดันของน้ำมันภายใน หม้อแปลง ส่วนความสูงของตัวถังนั้น ขึ้นอยู่กับความยาวของปลายปลอกฉนวนนำสาย และความสูง ของขดลวดในถัง



รูปที่ 3.7 รูปร่างและขนาดของตัวถัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.7 พื้นผิวของตัวถัง (ไม่คิดผาปิดบนและล่าง)

$$\begin{aligned} A_a &= 2 \times (\text{พื้นที่ด้านข้างของตัวถังทั้งด้านกว้างและด้านยาว}) \quad (3.45) \\ &= 2 \times (1.250 \times 1.250 + 1.250 \times 1.250) \\ &= 6.25 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของหม้อแปลง

$$\begin{aligned} P_t &= \text{ความสูญเสียในขดลวดแรงต่ำ} + \text{ความสูญเสียในขดลวดแรงสูง} + \text{ความสูญเสียแกนเหล็ก} \quad (3.46) \\ &= 356.7 + 418.7 + 639.32 \\ &= 1414.72 \text{ W} \end{aligned}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ของตัวถัง

$$\begin{aligned} P_a' &= \frac{P_t}{A_a} \quad (3.47) \\ &= \frac{1414.75}{6.25} \\ &= 226.36 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

ค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงทดสอบที่อุณหภูมิ 75 °C

ค่า Load losses, P_k เกิดจากการรวมกันของกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในขดลวดและกำลังสูญเสีย Stray load loss ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7% ของกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในขดลวดซึ่งจะสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_k &= P_{RT} + (0.07 \times P_{RT}) \quad (3.48) \\ &= 704.37 + (0.07 \times 704.37) \\ &= 753.68 \text{ W} \end{aligned}$$

คำนวณที่เต็มภาระโหลดและตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{S_n}{S_n + P_k + P_c} \quad (3.49) \\ &= \frac{150000}{150000 + 753.68 + 639.32} \times 100 \\ &= 99.07 \% \end{aligned}$$

คำนวณที่ครึ่งหนึ่งของภาระโหลดและตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1

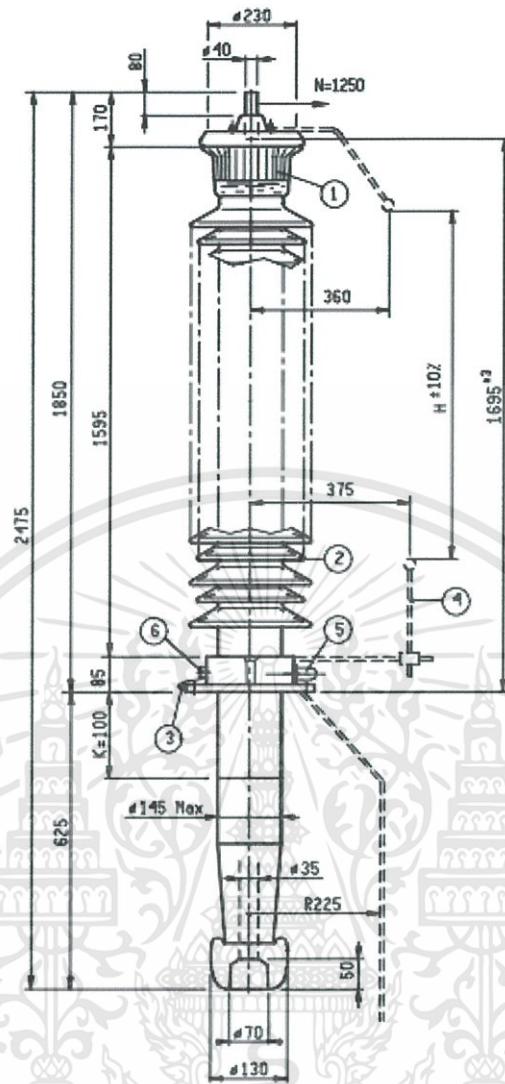
$$\eta = \frac{S_n/2}{S_n/2 + P_K \times 0.25 + P_c} = 98.9 \%$$
(3.50)

3.4 การออกแบบปลอกฉนวนนำสาย

ข้อกำหนดของปลอกฉนวนนำสายที่ใช้มีดังต่อไปนี้

ชนิดของปลอกฉนวนนำสายเป็นชนิด	Oil Impregnated Paper Bushing	
มาตรฐาน	IEC 60137	
พิกัดแรงดัน	170	kV
พิกัดกระแส	800	A
แรงดันอิมพัลส์	750	kV
แรงดันไฟฟ้าความถี่พลังงาน	325	kV
อุณหภูมิในบริเวณที่ใช้งาน	-25 ถึง 40 องศาเซลเซียส	
อุณหภูมิของน้ำมันในหม้อแปลง	105 องศาเซลเซียส	
วัสดุที่ใช้	พอร์ซเลน	
ระยะอาร์ค	1595	mm
ระยะครีป	5270	mm

หม้อแปลงทดสอบชนิดถึงโลหะจะต้องมีปลอกฉนวนนำสายทำหน้าที่เป็นฉนวนกันระหว่างส่วนที่เป็นแรงสูงกับส่วนที่ต่อลงดิน โดยจากหม้อแปลงทดสอบมีพิกัด 300 kV 150 kVA จะต้องให้ปลอกฉนวนนำสายจะต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าความถี่พลังงาน (Withstand test voltage) ซึ่งจากขนาดของหม้อแปลงต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 300 kV ปลอกฉนวนนำสายที่ใช้จะเป็นชนิดใช้ฉนวนกันความร้อนเป็นแกนพันจากกระดาษและทำให้น้ำมันสามารถซึมเข้าไปในกระดาษได้ (Oil Impregnated Paper Bushing) โดยปลอกฉนวนนำสายจะมีแรงดันพิกัดที่ 170 kV ซึ่งสามารถใช้ได้เนื่องจากหม้อแปลงทดสอบนั้นไม่ได้ใช้แบบต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยถ้าใช้งานแบบต่อเนื่องจะต้องให้แรงดันพิกัดมีค่า 300 kV มีกระแสพิกัดที่ 800 A ทนแรงดันอิมพัลส์ได้ที่ 750 kV มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าความถี่พลังงาน 325 kV ซึ่งมากกว่า 300 kV จึงทำให้สามารถใช้ปลอกฉนวนนำสายชนิดนี้ได้ ปลอกฉนวนนำสายจะใช้งานได้ในอุณหภูมิที่ -25 ถึง 40 องศาเซลเซียส และเมื่อใช้งานจะมีอุณหภูมิสูงสุดที่ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.8 ขนาดของปลอกฉนวนนำสาย

หมายเลข 1 คือ กระจกที่ใช้ดูระดับน้ำมัน (Oil sight Glass)

หมายเลข 2 คือ ระยะต่ำสุดที่จะให้ไฟฟ้าวงที่ผิวของปลอกฉนวนนำสาย

หมายเลข 3 คือ สกรูของปลอกฉนวนนำสายขนาด 0.5 นิ้ว

หมายเลข 4 คือ ช่องส่งประกายไฟ (Arcing horn) มีลักษณะเป็นโลหะยาวโค้ง คล้ายกับเขาสัตว์ ใช้เป็นทางผ่านของกระแสไฟฟ้า เมื่อเกิดฟ้าผ่าให้ข้ามช่องอากาศลงสู่ดินได้

หมายเลข 5 คือ แทปของตัวประกอบกำลัง (Power factor tap)

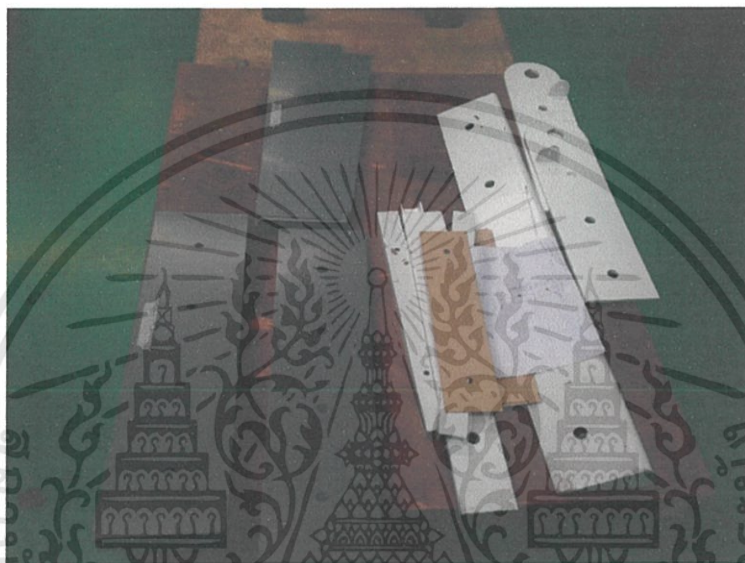
หมายเลข 6 คือ Oil sampling plug

3.5 การตัดเหล็กและประกอบเหล็ก

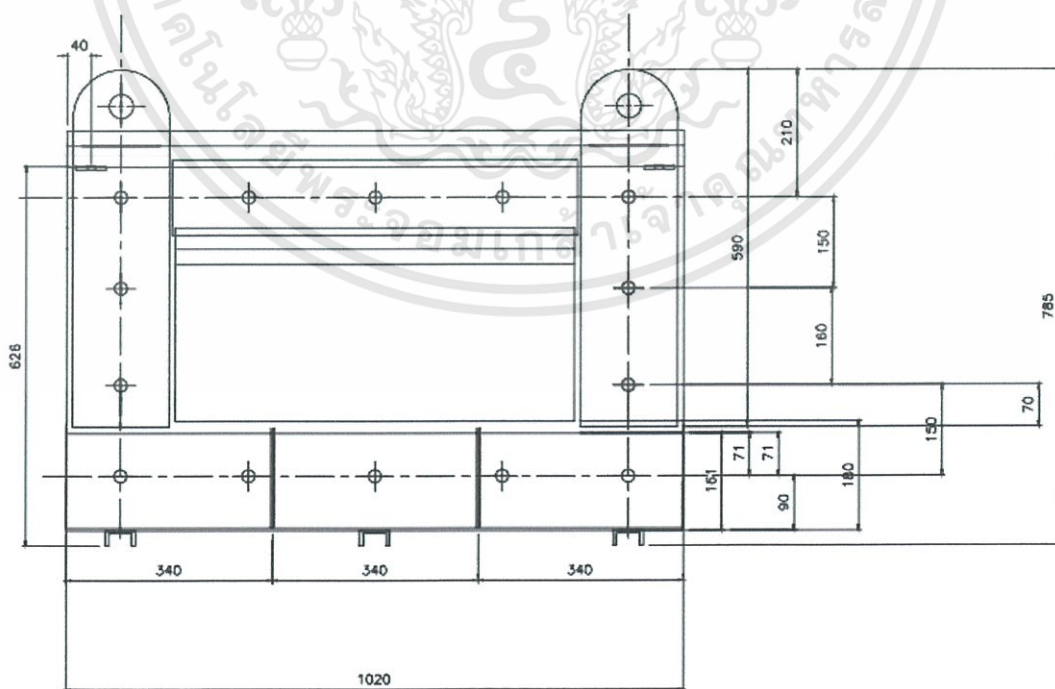
หม้อแปลงทดสอบประกอบด้วยโครงสร้างหลักคือ แกนเหล็ก ขดลวด ตัวถังและฉนวน โดยการสร้างและประกอบหม้อแปลงทดสอบนั้นสามารถแบ่งออกไปทำในแต่ละส่วนตามที่ได้ ออกแบบไว้แล้วจึงนำมาประกอบเข้าด้วยกันเพื่อที่จะได้ประหยัดเวลาในการสร้าง แกนเหล็กหม้อแปลงทดสอบที่ใช้เป็นแผ่นเหล็กรีดเย็นโดยมีส่วนผสมของซิลิคอน เป็นเหล็กชนิด M4 หนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.27 มิลลิเมตร คอร์และโยคมีพื้นที่หน้าตัดเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้า 3 ชั้นซ้อนกันให้มีลักษณะคล้ายวงกลมมากที่สุด โดยที่จะให้มุมของสี่เหลี่ยมผืนผ้าอยู่ที่ขอบของวงกลม โดยเมื่อประกอบเสร็จแล้วจะยึดให้แน่นโดยใช้โดยใช้แคลมป์ที่มีการลบลมที่ขอบให้มนเรียบ ไม่มีลักษณะเป็นเหลี่ยม เนื่องจากขอบที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมจะทำให้เกิดโคโรน่าและมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่บริเวณดังกล่าว แล้วทำการเคลือบด้วยสีสเปรย์วานิชเพื่อกันสนิม โดยที่ฐานของแคลมป์เจาะรูไว้เพื่อใช้ยึดแกนเหล็กกับฝาล่างด้วยสลักเกลียวเพื่อให้ยึดได้อย่างเหนียวแน่น

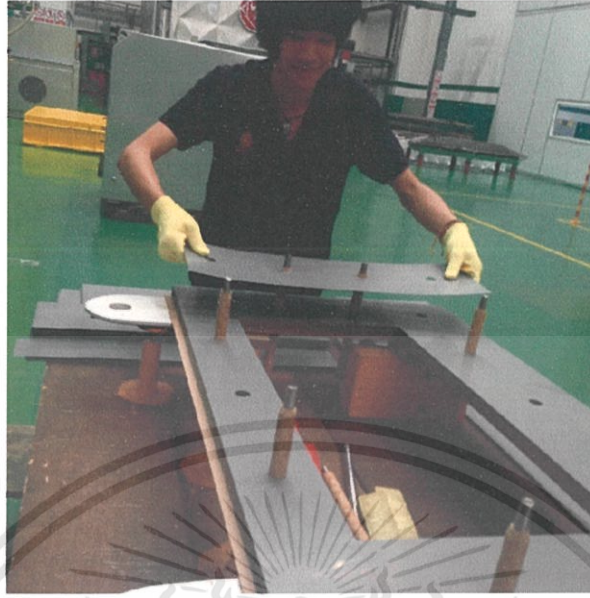


รูปที่ 3.9 เหล็กและแคลมป์ที่ใช้ในการประกอบเหล็ก

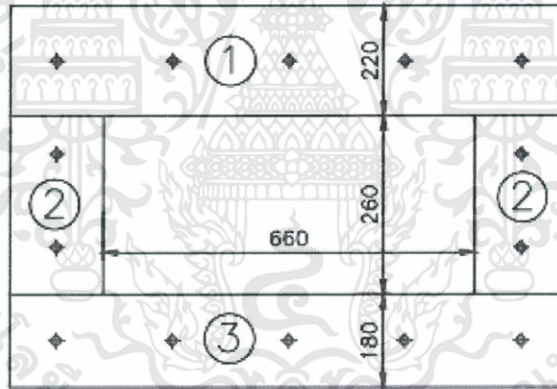


รูปที่ 3.10 โครงสร้างของแกนเหล็กพร้อมแคลมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



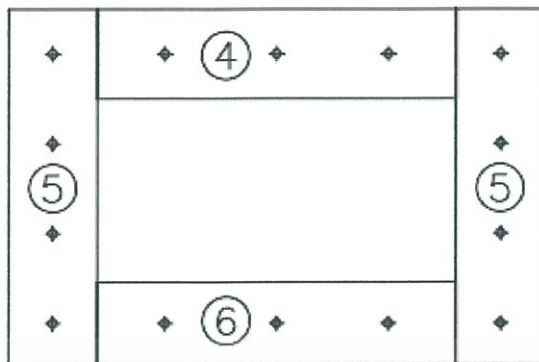
รูปที่ 3.11 การประกอบแกนเหล็ก



STEP 1

รูปที่ 3.12 ลำดับการประกอบเหล็กขั้นตอนที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



STEP 2

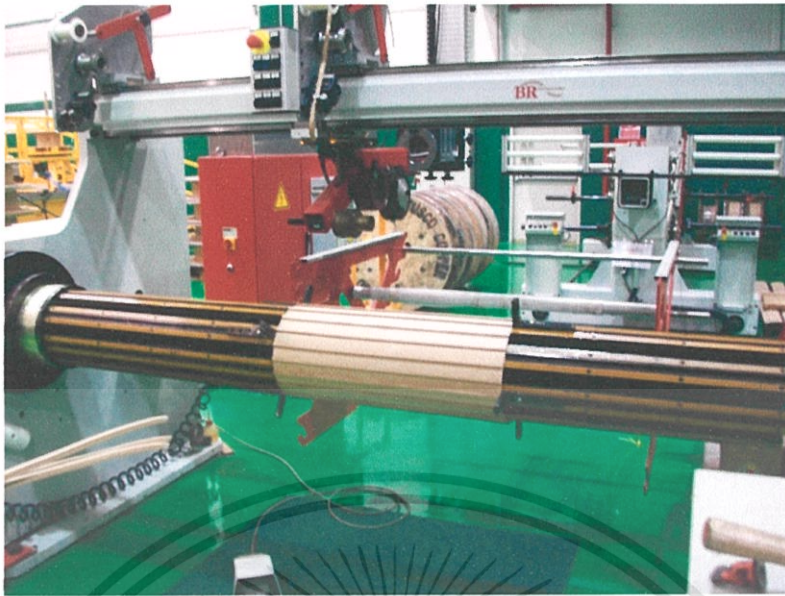
รูปที่ 3.13 ลำดับการประกอบเหล็กชั้นตอนที่ 2



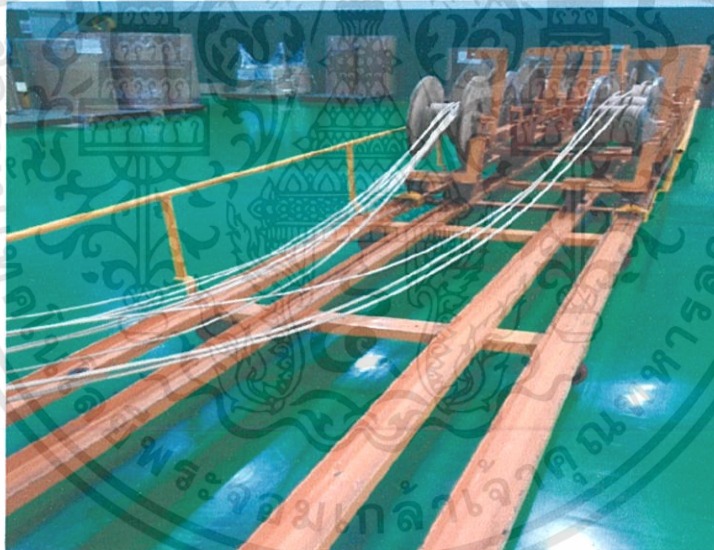
รูปที่ 3.14 เหล็กที่ทำการประกอบแล้ว

3.6 การพันขดลวดและฉนวนของขดลวด

ขดลวดแรงต่ำและแรงสูงนั้นจะมีรูปแบบการพันซ้อนกันเป็นแบบทรงกระบอกซ้อนกัน โดยที่ชุดของขดลวดแรงต่ำจะอยู่ติดกับแกนเหล็กโดยจะมีปลอกในหนา 3 มิลลิเมตร เป็นฉนวนระหว่างแกนเหล็กกับขดลวดและถัดจากปลอกในจะเป็นร่องน้ำมันหนา 5 มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 3.15) เพื่อช่วยในการระบายความร้อนของแกนเหล็กอันเนื่องมาจากกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก



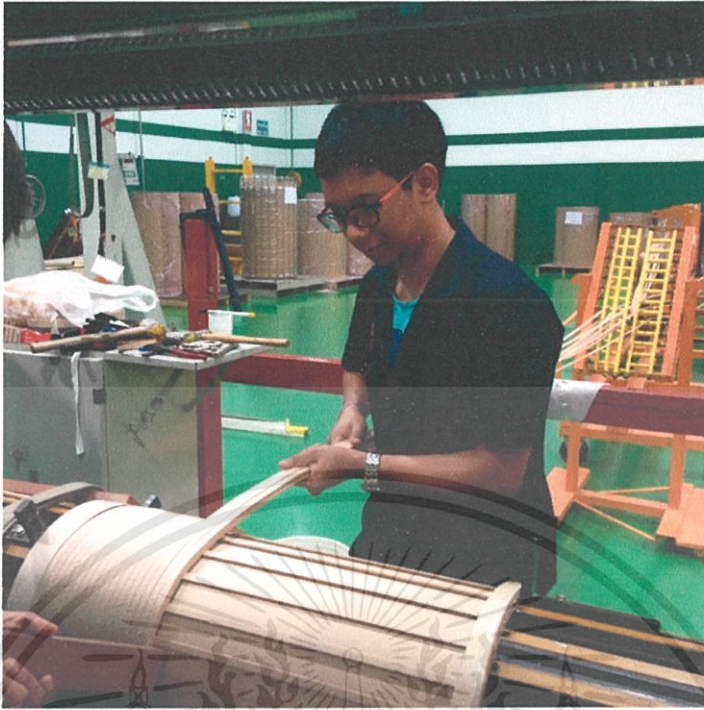
รูปที่ 3.15 ก่อนการพันลวดแรงต่ำ



รูปที่ 3.16 ขดลวดที่ใช้ในการพันขดลวดแรงต่ำ

โดยการพันขดลวดแรงดันต่ำและขดลวดแรงดันสูงนั้นจะทำการพันบนเครื่องพันขดลวดแบบอัตโนมัติซึ่งมีเครื่องนับรอบและสามารถหมุนซ้ายหรือขวาได้ และเมื่อพันขดลวดพลาสติกจะสามารถถอยกลับไปแก้ได้ อีกทั้งยังสามารถปรับความเร็วได้ตามที่ต้องการ โดยเครื่องนั้นจะตั้งให้เป็นอัตโนมัติหรือจะเป็นแบบใช้เท้าเหยียบเพื่อให้แกนหมุนก็สามารถทำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 การพันขดลวดแรงต่ำ



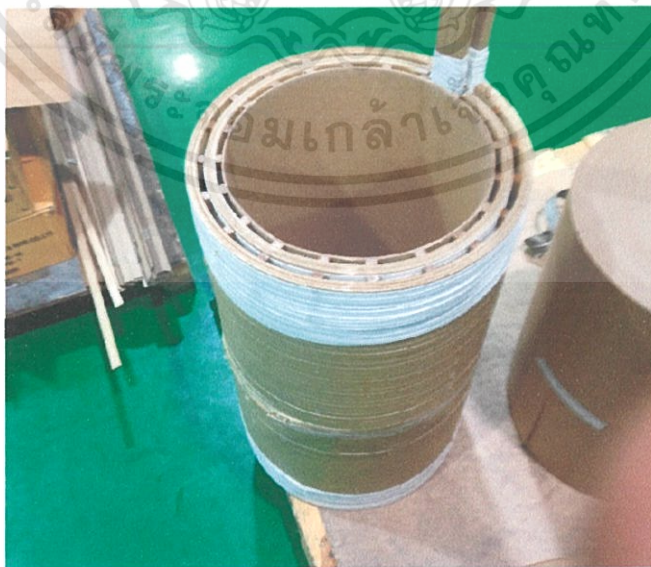
รูปที่ 3.18 ขดลวดที่ทำการสลับตำแหน่ง (Transpose) เรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 การหักขดลวดแรงต่ำเพื่อที่จะเป็นหัวสายของขดลวดแรงต่ำ

ขดลวดแรงดันต่ำนั้นจะเป็นขดลวดที่ถูกพันขึ้นก่อนขดลวดแรงดันสูง โดยจะเมื่อทำการติดตั้งน้ำมันที่ใต้กล่าวไว้ข้างต้นเสร็จแล้วนั้นก็ทำการพันขดลวดโดยในการพันแต่ละรอบจะใช้ขดลวดจำนวน 9 เส้น ซึ่งแต่ละเส้นมีความหนา 3 mm และความกว้าง 10 mm จะพันทั้งหมด 34 รอบ แบ่งออกเป็น 2 ชั้นๆ ละ 17 รอบ และเมื่อถึงรอบที่ 8.5 และ 25.5 ก็ทำการ Transpose สายเพื่อให้สายมีขนาดเท่ากันและแต่ละชั้นก็จะมีร่องน้ำมันชั้นระหว่างชั้นอีกซึ่งร่องน้ำมันจะมีขนาดหนา 6 mm โดยที่ร่องน้ำมันจะนำเอากระดาษอัดมาตัดเป็นซี่ๆ แล้วติดเพื่อช่วยในการระบายความร้อน



รูปที่ 3.20 ขดลวดแรงต่ำที่พันเสร็จแล้ว

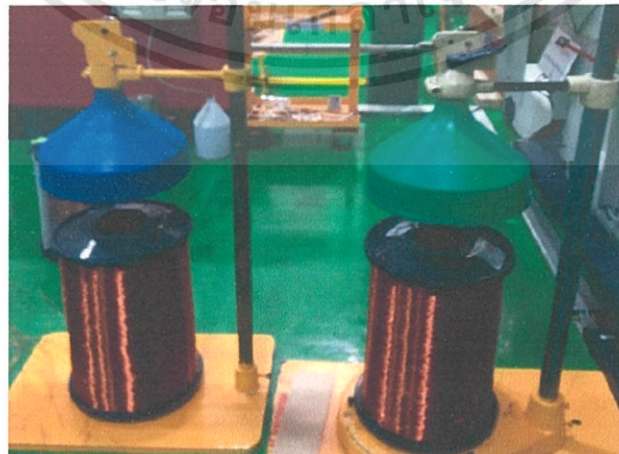
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพันขดลวดแรงดันต่ำเสร็จแล้วนั้นก็จะมีฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำและแรงสูง เพื่อกันไม่ให้ขดลวดทั้งสองนั้นมาชนกันป้องกันการลัดวงจรคือ ร่องน้ำมัน ปลอกหุ้มขดลวดแรงต่ำ ซีลด์และร่องน้ำมันขนาด 4 mm ตามลำดับแล้วจึงทำการเริ่มพันขดลวดแรงดันสูง

การพันขดลวดแรงสูงนั้นจะพันทั้งสิ้น 63 ชั้น โดยจะแบ่งออกเป็นกลุ่มทั้งสิ้น 10 กลุ่ม โดยจะพันซ้อนทับกันไปในแต่ละชั้น ซึ่งในระหว่างชั้นนั้นก็จะมีกระดาษฉนวนความหนา 0.13 mm ชั้นระหว่างชั้นเพื่อกันไม่ให้ขดลวดแต่ละชั้นมาชนกันเพื่อป้องกันการลัดวงจรภายในขดลวด โดยในระหว่างกลุ่มนั้นก็จะมีชั้นกระดาษเองโกล่าริง (มีลักษณะคล้ายกระดาษย่น) ติดไว้ ซึ่งกระดาษเองโกล่าริงนั้นจะช่วยลดและกระจายความเครียดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวด และเมื่อพันขดลวดเสร็จสิ้นทั้ง 63 ชั้นแล้วนั้นจะทำการใส่กระดาษย่นทั้งสิ้น 10 ชั้น เพื่อป้องกันการลัดวงจรในหม้อแปลง



รูปที่ 3.21 การพันขดลวดแรงสูง

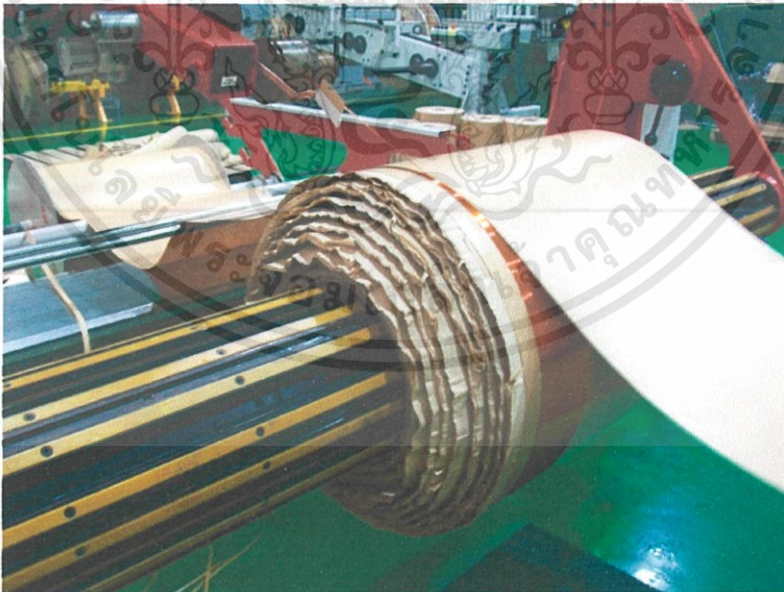


รูปที่ 3.22 ขดลวดที่ใช้การพันขดลวดแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

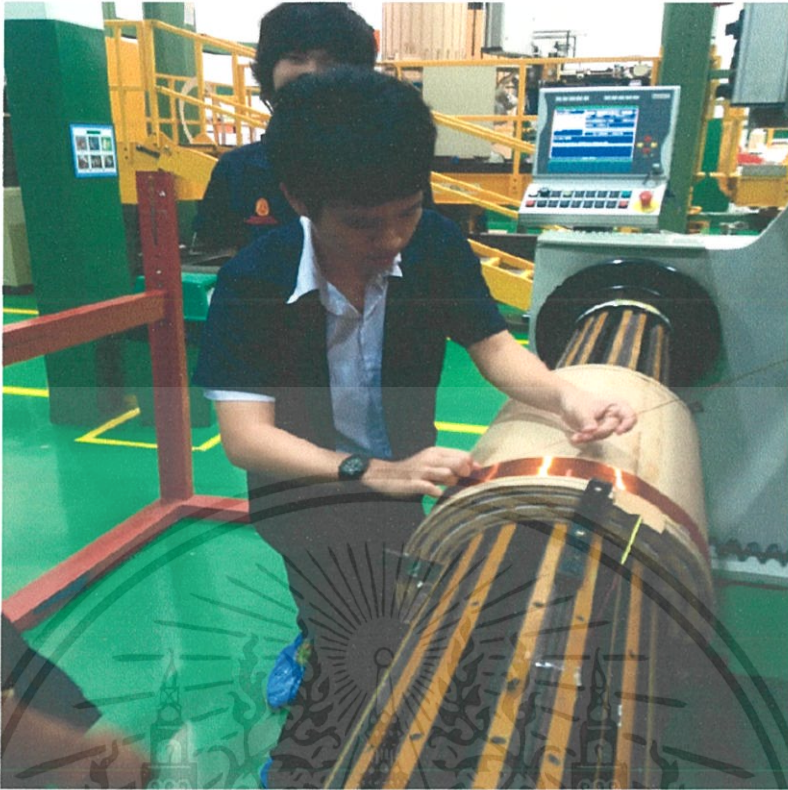


รูปที่ 3.23 เครื่องที่ใช้ในการพันขดลวด



รูปที่ 3.24 การรองกระดาษขนวนในการพันขดลวดแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

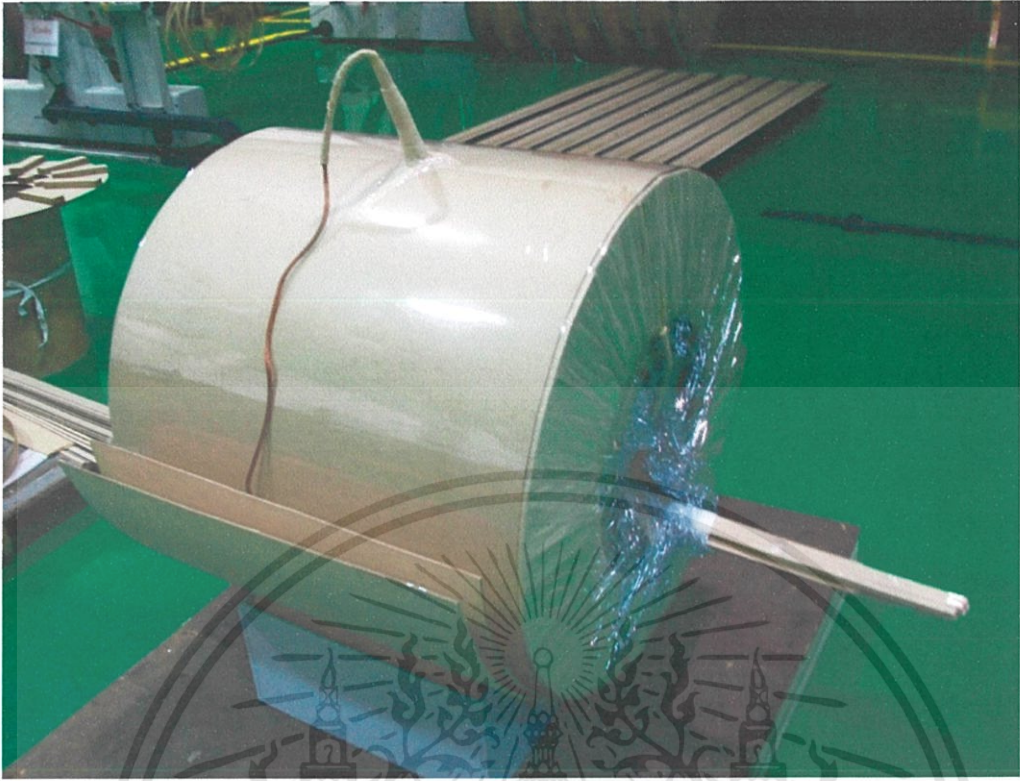


รูปที่ 3.25 การพันขดลวดแรงสูง

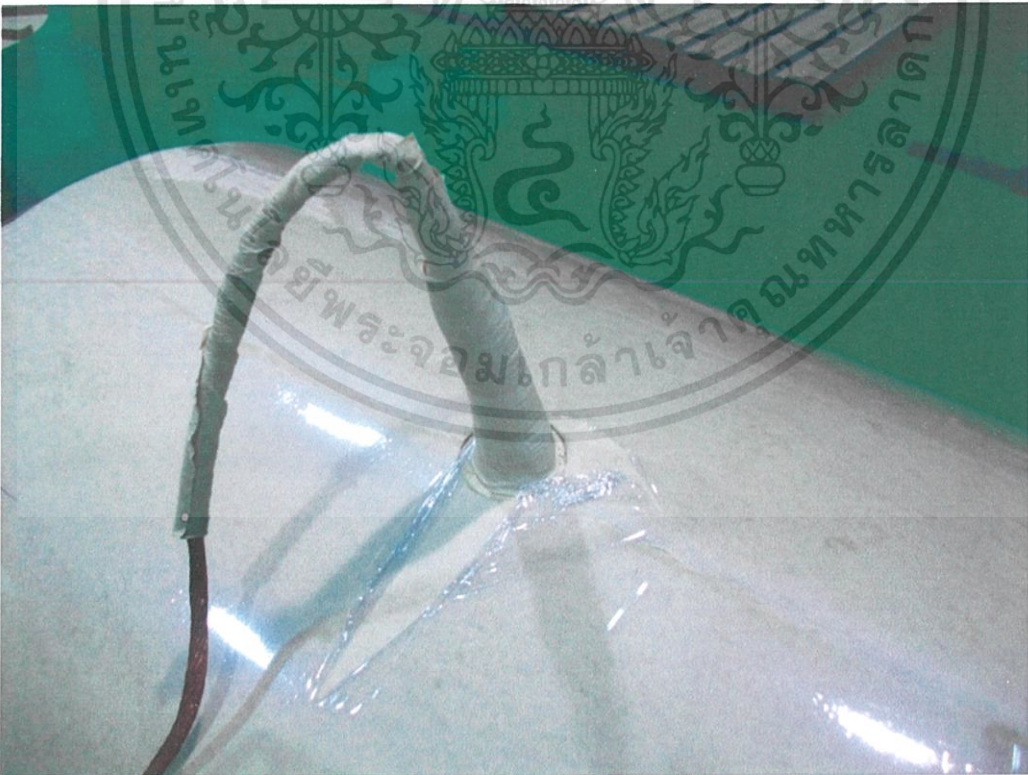


รูปที่ 3.26 การห่อขดลวดแรงสูงด้วยกระดาษขุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 ขดลวดที่พันเสร็จแล้ว

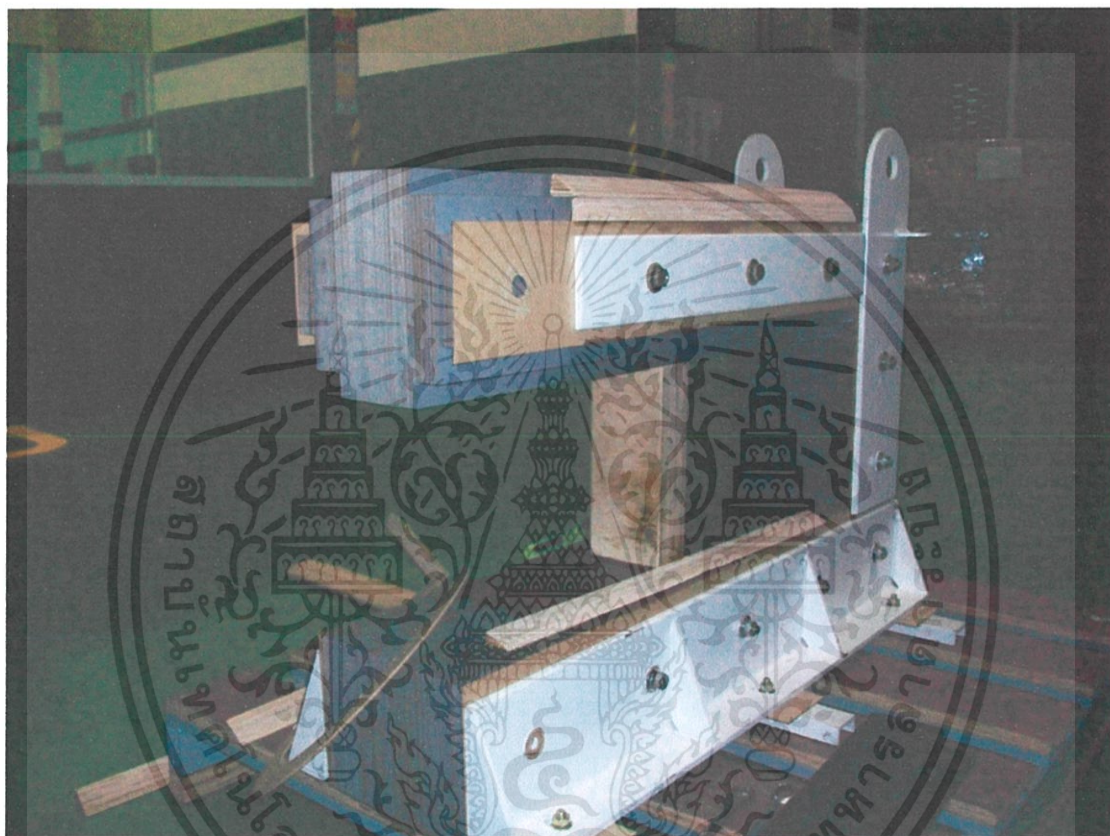


รูปที่ 3.28 ปลายสายขดลวดแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การประกอบแกนเหล็กเข้ากับขดลวด

เมื่อพันขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำเสร็จแล้วนั้น ก็จะนำมาประกอบเข้ากับแกนเหล็ก โดยจะต้องถอดแกนเหล็กออกฝั่งหนึ่งออกดังรูปที่ 3.29 เพื่อจะได้สามารถนำขดลวดเข้ามาประกอบแกนเหล็กได้ดังรูปที่ 3.30 แล้วเมื่อประกอบแกนเหล็กเข้ากับขดลวดทั้งสองเสร็จสมบูรณ์แล้วนั้น จะนำไปทดลองติดตั้งในถังเพื่อทดสอบว่าแกนเหล็ก ขดลวดและแคลมป์ สามารถใส่ลงพอดีในตัวถังที่ได้ออกแบบ ดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.29 การถอดแกนเหล็กเพื่อนำมาประกอบกับขดลวด

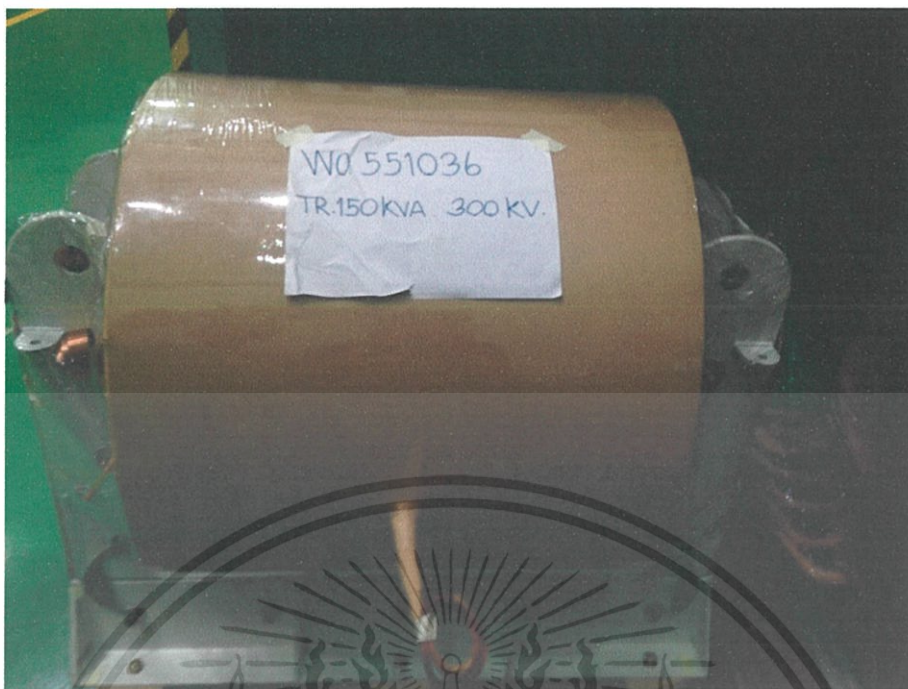


รูปที่ 3.30 การประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็ก



รูปที่ 3.31 การประกอบขดลวดกับแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

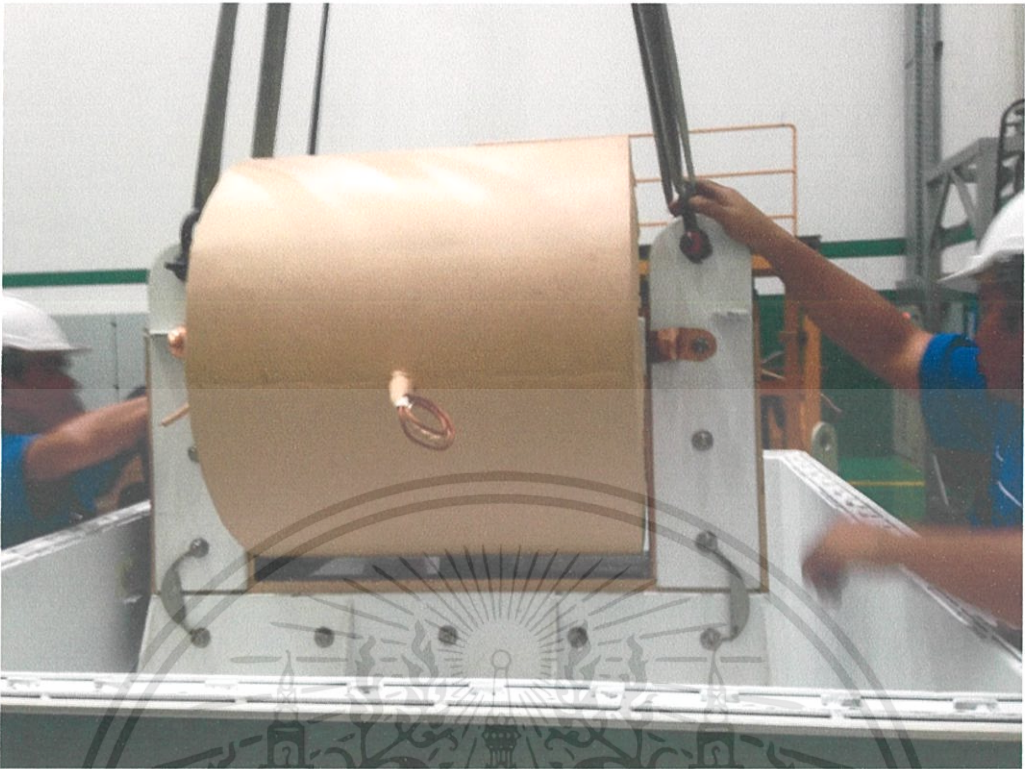


รูปที่ 3.32 เมื่อประกอบขดลวดกับแกนเหล็กเสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 3.33 ตัวถังหม้อแปลงทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.34 ขณะทำการทดลองใส่ขดลวด แกนเหล็กและแคลมป์ลงในตัวถัง



รูปที่ 3.35 แกนเหล็กและขดลวดและแคลมป์ภายในตัวถังหม้อแปลงทดสอบ

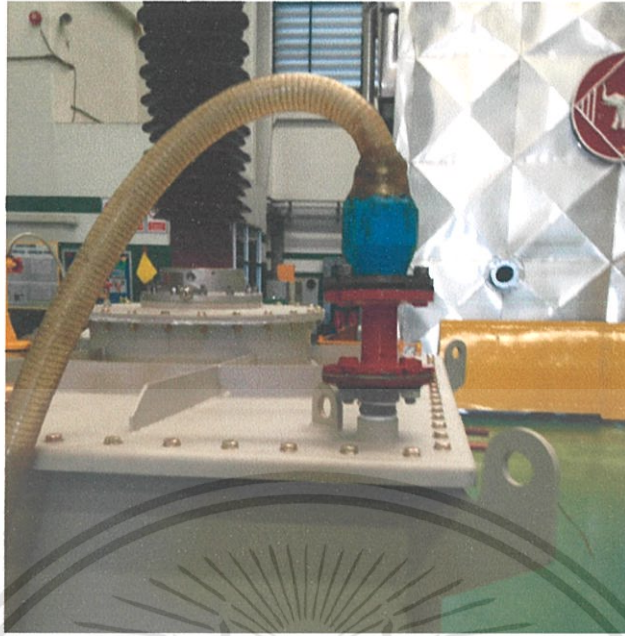
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การอบขดลวดและฉนวนต่างๆในเตาอบสุญญากาศและการเติมน้ำมัน

เมื่อหลังจากการผ่านขั้นตอนการประกอบลงถึงแล้วนั้นแล้วขั้นตอนต่อไปคือการอบภายในเตาอบสุญญากาศและการเติมน้ำมันหม้อแปลง โดยที่เราจะใช้อุณหภูมิในการอบประมาณ 120°C โดยในตอนแรกนั้นเราจะเริ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120°C แล้วจะไล่ระดับความร้อนสูงขึ้นไปเรื่อยๆจนถึงอุณหภูมิ 120°C โดยจะทำการอบเป็นระยะเวลา 4 วัน ภายในเตาอบสุญญากาศเพื่อนำเอาความชื้นที่อยู่ในแกนเหล็ก ขดลวดและฉนวนออกให้หมด การนำตัวหม้อแปลงทดสอบเข้าไปในเตาอบสุญญากาศนั้นจะนำส่วนที่เป็นแกนเหล็ก ขดลวดที่วางอยู่บนฐานซึ่งได้มีการติดตั้งอุปกรณ์แล้ว เช่น ลูกถ้วยแรงต่ำ ลูกถ้วยแรงสูง ประเก็นยางแล้วยึดติดด้วยกัน แล้วจึงนำเข้าไปอบในเตาอบไฟฟ้าที่ในสภาวะอุณหภูมิ 120°C โดยภายในเตาอบสุญญากาศจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.36 เมื่อครบเวลาทำการอบเรียบร้อยแล้วนั้นจึงทำการเติมน้ำมันโดยการเติมน้ำมันนี้ยังกระทำในสภาวะสุญญากาศด้วยเพื่อป้องกันความชื้น หลังจากเติมน้ำมันแล้วนั้นก็นำหม้อแปลงทดสอบออกจากเตาทำการยึดทุกส่วนให้แน่นแล้วนำลงถึงที่ได้มีการเตรียมการไว้แล้วทำหิ้งให้เย็นเพื่อทำการทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.36 เตาอบสุญญากาศ



รูปที่ 3.37 การดูอากาศภายในตัวถังหลังจากอบหม้อแปลงทดสอบ



รูปที่ 3.38 หม้อแปลงทดสอบที่ทำการประกอบเสร็จสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบหม้อแปลงทดสอบและการประเมินผล

ภายหลังจากที่เราได้ทำการประกอบหม้อแปลงทดสอบตามที่ได้ออกแบบเรียบร้อยแล้วนั้นขั้นตอนต่อมาก็คือการทดสอบหม้อแปลงทดสอบที่ได้สร้างขึ้นไปทำการทดสอบเพื่อตรวจลักษณะสมบัติของหม้อแปลงทดสอบว่าได้เป็นไปตามเกณฑ์และสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ขึ้นมาหรือไม่ แต่เนื่องจากว่าไม่มีมาตรฐานสำหรับหม้อแปลงทดสอบโดยตรง ดังนั้นการทดสอบจะใช้มาตรฐานเทคนิคการทดสอบไฟฟ้าตามที่ได้แนะนำไว้ในมาตรฐาน IEC 60076 ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับการออกแบบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและจะนำมาเป็นตัวอ้างอิงในการทดสอบ โดยรายการการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ออกแบบไว้มีรายการดังต่อไปนี้

1. การวัดอัตราส่วนแรงดันของขดลวดและการตรวจสอบขั้ว
(Voltage ratio measurement and checked polarity)
2. การวัดความต้านทานของขดลวด
(Winding resistance measurement)
3. การวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด
(No load losses and magnetizing current measurement)
4. การวัดกำลังสูญเสียขณะที่มีโหลด
(Load losses and impedance voltage measurement)
5. การวัดความต้านทานของฉนวน
(Insulation megger test)
6. การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม
(Temperature rise test)
7. การทดสอบการทนได้ที่แรงดันพิกัด
(AC voltage withstand test)
8. การทดสอบแฟลชโอเวอร์
(Flashover test)

4.1 การวัดอัตราส่วนแรงดันของขดลวดและการตรวจสอบขั้ว

(Voltage ratio measurement and checked polarity)

การวัดสัดส่วนจำนวนรอบก็เพื่อวัตถุประสงค์ในเพื่อทราบค่าสัดส่วนจำนวนรอบระหว่างขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำ วิธีทดสอบคือ Turn ratio meter วัดอัตราส่วนของแรงดันต่อวัตที่แต่ละจุดแยกและให้ตรวจสอบขั้วของหม้อแปลง 1 เฟส ในการทดสอบขั้วของหม้อแปลงทดสอบให้เป็นไปตามสัญลักษณ์ที่ได้กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 60076 กล่าวคือ

1. ขั้วของขดลวดแรงสูงที่เป็นสายที่มีแรงดันให้ใช้สัญลักษณ์ U
2. ขั้วของขดลวดแรงสูงที่เป็นสายศูนย์ให้ใช้สัญลักษณ์ O
3. ขั้วของขดลวดแรงต่ำที่เป็นสายที่มีแรงดันให้ใช้สัญลักษณ์ u และ v

ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการวัดอัตราส่วนแรงดันของขดลวดและการตรวจสอบขั้ว

ขั้ววัด	ค่าจากการคำนวณ	ค่าจากการวัด	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
U-O : u-v	721.15	724.71	+ 0.49 %

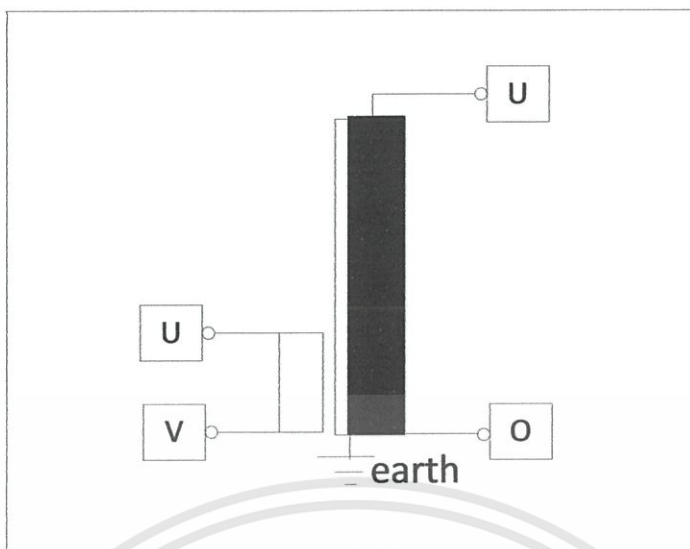


รูปที่ 4.1 Turn ratio meter



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบการวัดอัตราส่วนแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การกำหนดขั้วของหม้อแปลง

4.2 การวัดค่าความต้านทานของขดลวด (Winding resistance measurement)

การวัดค่าความต้านทานของขดลวด ก็เพื่อวัตถุประสงค์สำคัญเพื่อที่จะนำค่าทดสอบที่ได้ไปคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียของขดลวด (Copper losses) ในการวัดค่าความต้านทานให้ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงและต้องทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในตัวเอง (Self inductance) ต่ำที่สุด การวัดค่าความต้านทานของขดลวดแรงดันต่ำซึ่งจะมีค่าความต้านทานต่ำกว่า 1 โอห์มจะใช้ Kevin Bridge meter ส่วนขดลวดแรงดันสูงมีความต้านทานมากจะใช้เครื่อง CPC 100 ที่สามารถทดสอบค่าความต้านทานที่มาก ๆ ได้ โดยปกติแล้วค่าความต้านทานของขดลวดนั้นจะแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิ โดยทั่วไปกำหนดให้เปลี่ยนค่าความต้านทานที่วัดได้โดยใช้เครื่องมือวัด ณ อุณหภูมิภายนอก ไปที่อุณหภูมิ 75 °C โดยในขณะที่วัดค่าความต้านทานของขดลวดนี้มีอุณหภูมิในการวัดคือ 31.3 °C จึงจะต้องทำการแปลงค่าความต้านทานจากอุณหภูมิที่ทำการวัดไปยังอุณหภูมิ 75 °C โดยใช้สมการที่ 5.1 แล้วบันทึกค่าต่างๆที่ได้ลงในตารางที่ 4.2 โดยอ้างอิงผลที่วัดเปรียบเทียบกับการคำนวณ

$$R_{75}^{\circ C} = R_{\text{ambient}} \times \frac{(235+75)}{(235+\text{อุณหภูมิขณะวัด})} \quad (4.1)$$

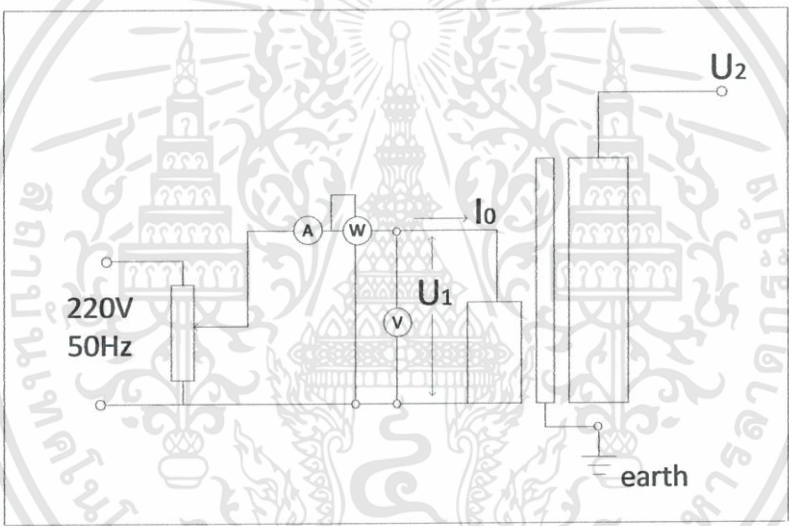
ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าความต้านทานของขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ

ขดลวดวัด	ค่าความต้านทานของขดลวด			
	ค่า ค.ต.ท. จากการคำนวณที่ 75 °C	ค่า ค.ต.ท. จากการวัดที่ 31.3 °C	ค่า ค.ต.ท. จากการวัดที่ 75 °C	% ความคลาดเคลื่อน
ขดลวดแรงต่ำ	2.49 mΩ	3.1 mΩ	3.6 mΩ	+44.57 %
ขดลวดแรงสูง	1522.6 Ω	1369 Ω	1593 Ω	+4.66 %

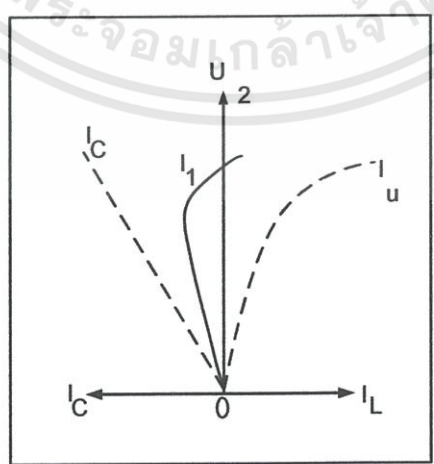
ผลการวัดค่าความต้านทานที่ได้มีความคลาดเคลื่อน อันเนื่องมาจากการผิดพลาดจากการอ่านมิเตอร์ของเครื่องวัดและความยาวของขดลวดที่ใช้ในการคำนวณค่าความต้านทานกับความยาวของขดลวดจริงที่ใช้ไม่เท่ากันจึงเป็นสาเหตุให้เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณกับการวัดมีความคลาดเคลื่อนไป

4.3 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด (No load losses and magnetizing current measurement)

การวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลดของหม้อแปลงทดสอบนั้นเป็นการทดสอบโดยการเปิดวงจรทางด้านขดลวดแรงดันสูงและป้อนแรงดันเข้าที่ขดลวดแรงดันต่ำ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กที่วัดได้นั้นไม่คิดรวมค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดเพราะกระแสไฟฟ้าในขณะที่ไม่มีโหลดนั้นมีค่าน้อยมาก การทดสอบป้อนแรงดันกระแสสลับเข้าทางด้านขดลวดแรงต่ำที่ละชั้นๆ



รูปที่ 4.4 วงจรทดสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด



รูปที่ 4.5 กระแสป้อนเข้าหม้อแปลงทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

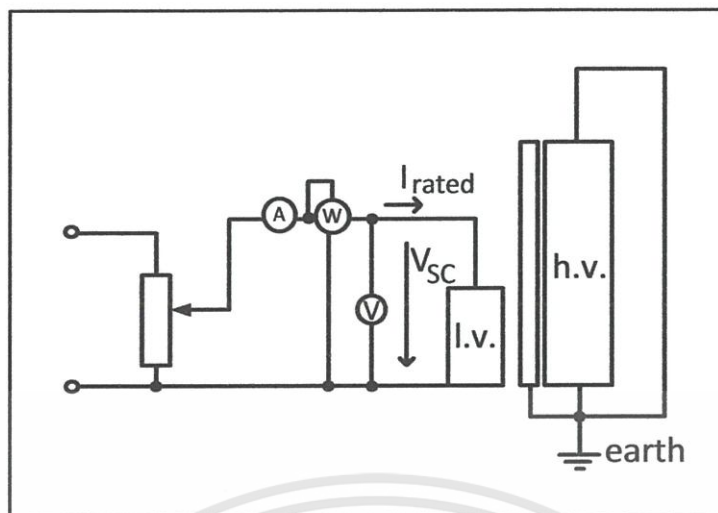
ตารางที่ 4.3 ผลการวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด

เปอร์เซ็นต์	แรงดันอินพุท (V)	แรงดันเอาต์พุท (KV)	กระแส(A)	PD (pC)
10	42.04	30.5	5.39	2.6
20	84.56	61.3	10.88	2.5
30	124.12	90.0	15.97	2.4
40	167.03	121.0	21.37	2.7
50	208.95	151.4	25.72	2.4
60	249.48	180.8	29.06	291.6
70	292.54	212.0	33.45	2380
80	333.07	241.4	42.5	3600
90	-	-	-	-
100	-	-	-	-
110	-	-	-	-

โดยเมื่อทำการป้อนแรงดันที่ 60 % ค่า PD เริ่มมากกว่าปกติ เมื่อป้อนแรงดันเข้าที่ 70% ของแรงดันพิกัด ได้เกิด flashover ขึ้นภายในตัวถัง และเมื่อป้อนแรงดันเข้าที่ 80% ของแรงดันพิกัดก็ยังคงเกิด flashover ขึ้นภายในตัวถังอยู่ จึงได้หยุดการทดสอบไว้เพียงเท่านี้ เนื่องจากว่าหากเพิ่มแรงดันขึ้นไปมากกว่านี้ อาจจะทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับหม้อแปลงทดสอบได้ โดยการแก้ไขก็ได้สั่งทำซิลด์ริงที่ด้านบนและด้านล่างของบุชชิ่ง และได้นำเอาภายในของหม้อแปลงไปอบใหม่เพื่อไล่ความชื้นออกจากตัวถัง เพื่อเพิ่มฉนวนให้มากขึ้น

4.4 การวัดกำลังสูญเสียและแรงดันอิมพีแดนซ์ขณะมีโหลด (Load losses and impedance voltage measurement)

การวัดค่ากำลังสูญเสียกำลังไฟฟ้ามีโหลดต้องวัดที่ความถี่พิกัด โดยการป้อนแรงดันเข้าสู่ขดลวดแรงต่ำจนกระทั่งค่ากระแสถึงค่าพิกัด ค่ากำลังสูญเสียที่วัดได้ให้ปรับไปเป็นค่าสูญเสียที่อุณหภูมิอ้างอิงที่ 75 °C ให้ถือว่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าซึ่งมีค่า I^2R (เมื่อ R เป็นค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง) แปรผันโดยตรงกับความต้านทานและการสูญเสียกำลังไฟฟ้าอื่นๆแปรผกผันกับความต้านทาน แรงดันอิมพีแดนซ์วัดที่ความถี่ที่กำหนดไว้โดยใช้ตัวป้อนที่ให้รูปคลื่นใกล้เคียงกับคลื่นไซน์ การวัดค่าแรงดันอิมพีแดนซ์ต้องวัดที่ความถี่ที่กำหนดโดยการป้อนแรงดันเข้าสู่ขดลวดด้านแรงต่ำจนกระทั่งค่ากระแสถึงค่าพิกัด ค่าแรงดันอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ให้ปรับไปเป็นค่าอุณหภูมิที่ 75 °C



รูปที่ 4.6 วงจรทดสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียและแรงดันอิมพีแดนซ์ขณะมีโหลด

ตารางที่ 4.4 ค่าวัดกำลังสูญเสียและแรงดันอิมพีแดนซ์ขณะมีโหลด

ค่าตัวแปร	ปริมาณ
I_{1SC}	360.8 A
U_{1SC}	21.712 V
P_k	777.65 W
Ambient temp ($^{\circ}C$)	31.3 $^{\circ}C$

จากค่าที่วัดจากการทดสอบได้จะต้องทำการคำนวณอ้างอิงไปที่อุณหภูมิ 75 $^{\circ}C$ ดังต่อไปนี้

$$P_{k(31.3^{\circ}C)} = P_{R(31.3^{\circ}C)} + P_{St(31.3^{\circ}C)} \quad (4.2)$$

เมื่อ $P_{k(31.3^{\circ}C)}$ คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงทดสอบที่อุณหภูมิ 31.3 $^{\circ}C$

$P_{R(31.3^{\circ}C)}$ คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิ 31.3 $^{\circ}C$

$P_{St(31.3^{\circ}C)}$ คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียสเตรย์เมื่อมีภาระที่อุณหภูมิ 31.3 $^{\circ}C$

$$\begin{aligned} P_{R(31.3^{\circ}C)} &= I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \\ &= (360.8^2 \times 3.1 \times 10^{-3}) + (0.5^2 \times 1369) \\ &= 745.7 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{R(75^{\circ}C)} &= P_{R(31.3^{\circ}C)} \times (235+75)/(235+31.3) \\ &= 868.18 \text{ W} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{St(31.3^{\circ}C)} = P_{k(31.3^{\circ}C)} - P_{R(31.3^{\circ}C)}$$

$$= 31.95 \text{ W}$$

$$P_{St(75^{\circ}C)} = P_{St(31.3^{\circ}C)} \times (235+31.3)/(235+75)$$

$$= 27.44 \text{ W}$$

$$P_{k(75^{\circ}C)} = P_{R(75^{\circ}C)} + P_{St(75^{\circ}C)}$$

$$= 868.18 + 27.44$$

$$= 895.62 \text{ W}$$

$$Z_{sc(31.3^{\circ}C)} = U_{1sc} / I_{1sc}$$

$$= 0.06 \Omega$$

$$R_{sc(31.3^{\circ}C)} = P_{k(31.3^{\circ}C)} / I_1^2$$

$$= 777.65 / 360.8^2$$

$$= 5.97 \text{ m}\Omega$$

$$X_{sc(31.3^{\circ}C)} = \sqrt{Z_{sc(31.3^{\circ}C)}^2 - R_{sc(31.3^{\circ}C)}^2}$$

$$= 0.0597 \Omega$$

ค่าอินดักแตนซ์ของขดลวดเมื่อทรานเฟอร์ไปที่ขดลวดแรงสูง (L_{HV})

$$L_{HV} = (X_{sc(31.3^{\circ}C)} \times a^2) / (2\pi F)$$

$$= (0.0597 \times 721.15^2) / (2\pi \times 50)$$

$$= 975.41 \text{ H}$$

$$R_{sc(75^{\circ}C)} = R_{sc(31.3^{\circ}C)} \times (235+75)/(235+31.3)$$

$$= 6.87 \text{ m}\Omega$$

$$X_{sc(75^{\circ}C)} = X_{sc(31.3^{\circ}C)}$$

$$= 0.0597 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{sc(75^{\circ}C)} = \sqrt{0.00687^2 + 0.0597^2}$$

$$= 0.06 \Omega$$

$$\epsilon_{sc} (\%) = \frac{I_1 \times Z_{sc}}{U_1} \times 100$$

$$= [(360.8 \times 0.06) / 416] \times 100$$

$$= 5.2 \%$$

ตารางที่ 4.5 สรุปค่ากำลังสูญเสียและแรงดันอิมพีแดนซ์ขณะมีโหลด

	ค่าคำนวณที่ 75 °C	ค่าวัดได้		%ความคลาดเคลื่อน
		ที่ 31.3 °C	ที่ 75 °C	
P _k (watt)	753.68	777.65	895.62	+18.83%
P _R (watt)	704.37	644.25	868.18	+23.25%
P _{st} (watt)	49.31	31.95	27.44	-44.35%
R _{sc} (Ω)	-	0.00597	0.00687	-
X _{sc} (Ω)	-	0.0597	0.0597	-
L _{HV} (H)	1093.28	975.41	-	-10.78%
Z _{sc} (Ω)	-	0.06	0.06	-
ε _{sc}	5.81	5.2	5.2	-10.49%

4.5 การวัดความต้านทานของฉนวน (Insulation megger test)

การวัดความต้านทานของฉนวนในหม้อแปลงทดสอบเป็นการวัดค่าความต้านทานของฉนวนระหว่างขดลวดกับกราวด์ ในการทดสอบได้ใช้เครื่องทดสอบค่าความต้านของฉนวน (Insulation resistance tester) ด้วยแรงดันกระแสตรง 2.5 kV

ตารางที่ 4.6 ค่าความต้านทานของฉนวน

วัดความต้านทานระหว่าง	ค่าความต้านทาน (MΩ)
ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ (LV-E)	12300

4.6 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม (Temperature rise test)

การทดสอบอุณหภูมิเพิ่มเป็นการทดสอบเพื่อหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและของน้ำมันซึ่งเป็นฉนวนแทรกซึมของหม้อแปลงทดสอบว่ามีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิบรรยากาศภายนอกเท่าไร

4.6.1 การวัดอุณหภูมิของอากาศโดยรอบหม้อแปลง

อุณหภูมิของอากาศโดยรอบหม้อแปลงต้องวัดโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์อย่างน้อย 3 อันวางที่จุดต่างๆกันรอบหม้อแปลงตรงระดับประมาณครึ่งหนึ่งของส่วนสูงของฉนวนระบายความร้อน จัดเทอร์โมมิเตอร์ให้ห่างจากฉนวนระบายความร้อน 1 – 2 เมตร และป้องกันเทอร์โมมิเตอร์จากการแผ่รังสีความร้อนผิปกติและอากาศร้อนที่ลอยขึ้นจากข้างบน ค่าซึ่งจะใช้เป็นอุณหภูมิของอากาศระบายความร้อนในการทดสอบได้จากผลเฉลี่ยของค่าซึ่งอ่านจากเทอร์โมมิเตอร์

4.6.2 การวัดอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด

การวัดอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดในหม้อแปลง เป็นการวัดทางอ้อมโดยการวัดค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวด อุณหภูมิของขดลวดให้คำนวณโดยวิธีวัดค่าความต้านทานอุณหภูมิของขดลวด T_2 ที่จุดปลายของช่วงเวลาทดสอบต้องคำนวณจากค่าความต้านทาน R_2 ที่อุณหภูมินั้นและค่าความต้านทานที่วัดได้อีกค่าหนึ่ง R_1 ที่อุณหภูมิมิอีกขณะหนึ่ง T_1 โดยใช้สูตรการคำนวณดังนี้

$$T_2 = (R_2/R_1) \times (K+T_1) - K \quad (4.3)$$

เมื่อ T_1, T_2 คือ อุณหภูมิของขดลวดเป็น $^{\circ}\text{C}$
 K มีค่า 235 สำหรับทองแดงและ 225 สำหรับอะลูมิเนียม

4.6.3 การวัดอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันส่วนบนสุด

อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันส่วนบนสุดโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ใส่ลงในช่องเสียบเทอร์โมมิเตอร์ที่มีน้ำมัน

4.6.4 เวลาของการทดสอบ

การทดสอบต้องกระทำติดต่อกันจนกระทั่งอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันส่วนบนสุดไม่เปลี่ยนแปลงเกิน 1°C ต่อชั่วโมงตลอดการ

4.7 การทดสอบการทนได้ที่แรงดันพิกัด (AC voltage withstand test)

การทดสอบความทนได้ที่แรงดันพิกัดแบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลาหนึ่ง ในสภาวะไม่มีโหลดนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันว่าหม้อแปลงทดสอบจะสามารถสร้างแรงดันสูงเหนี่ยวนำได้ต่อเนื่องสำหรับการใช้งานในการทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งตามปกติในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะใช้เวลา 1 นาที

วงจรทดสอบจะเหมือนกับวงจรการทดสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลดทุกประการเพียงแต่ระยะเวลาเท่านั้นที่แตกต่างกัน

4.8 การทดสอบแฟลชโอเวอร์ (Flashover test)

แฟลชโอเวอร์เกิดจากการเบรกดาว์นของอากาศที่พื้นที่ผิวของฉนวน และจะแตกต่างกันซึ่งจะขึ้นอยู่กับวัสดุของตัวฉนวน โดยการทดสอบจะแบ่งออกการทดสอบแฟลชโอเวอร์หนึ่งนาที และการทดสอบอิมพัลส์แฟลชโอเวอร์ โดยใช้เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ซึ่งจะส่งคลื่นอิมพัลส์ขนาด $1/50 \mu\text{s}$

4.8.1 การทดสอบอิมพัลส์แฟลชโอเวอร์ โดยใช้เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ซึ่งจะส่งคลื่นอิมพัลส์ขนาด $1/50 \mu\text{s}$

แรงดันจะเพิ่มขึ้น 50% ของแรงดันอิมพัลส์แฟลชโอเวอร์ (ซึ่งแรงดันจะประมาณครึ่งหนึ่งของแรงดันอิมพัลส์เนื่องจากเกิดแฟลชโอเวอร์ในฉนวน)

4.8.2 การทดสอบแฟลชโอเวอร์แบบหนึ่งนาที

ในการทดสอบแรงดันจะเพิ่มขึ้นประมาณ 10 วินาทีแล้วจะคงที่ตลอด 1 นาทีที่เหลือ โดยแรงดันจะเพิ่มขึ้นอย่างทีละน้อยจนกระทั่งเกิดแฟลชโอเวอร์ขึ้น

ในกรณีการทดสอบฉนวนนั้น แรงดันที่ทำให้เกิดแรงดันเบรกดาว์นนั้นไม่ใช่สิ่งสำคัญ แต่สิ่งสำคัญคือความคงทนของวัสดุ เช่น ความคงทนได้อิเล็กทริก การวัดนั้นจะวัดบนวัสดุฉนวน เพราะฉะนั้น ความคงทนได้อิเล็กทริกและความสูญเสียได้อิเล็กทริกและตัวประกอบกำลังซึ่งจะขึ้นอยู่กับความคงทนได้อิเล็กทริก ความคงทนได้อิเล็กทริกจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ โดยไม่พิจารณาคุณสมบัติของเคมีและกายภาพของตัววัสดุ แต่จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยคือ ความหนาของวัสดุ รูปร่างของวัสดุ รูปคลื่นและความถี่ของแรงดัน รูปร่าง ขนาดของอิเล็กโทรด ความชื้นและอุณหภูมิขณะทำการทดสอบ และความชื้นของวัสดุตัวอย่าง

บทที่ 5

สรุปผลโครงการและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลโครงการ

หม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kv 150 kVA ที่ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างขึ้นมานี้เป็นถังเหล็กโดยจะมีปลอกฉนวนนำสาย (Bushing) โดยปลอกฉนวนนำสายแรงสูงอยู่ด้านบนตัวถัง ปลอกฉนวนนำสายแรงต่ำจะอยู่ด้านล่างของตัวถัง ใช้กระดาษฉนวนระหว่างชั้นขดลวดและมีน้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนแทรกซึมและระบายความร้อน การที่ใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนแทรกซึมทำให้บำรุงรักษาได้ง่าย สามารถตรวจสอบความเป็นฉนวน (Oil dielectric strength) และสามารถสังเกตได้ง่ายหากน้ำมันหม้อแปลงเกิดการรั่วซึม โดยหม้อแปลงทดสอบตัวนี้เป็นหม้อแปลงที่ทำการออกแบบขึ้นใหม่ด้วยที่ยังไม่มีการทดสอบ จึงทำให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้นในการออกแบบและประกอบสร้างได้ โดยเมื่อทำการทดสอบหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEC60076 จึงได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดสอบ

การทดสอบ	ได้รับการทดสอบ	ผ่าน	ไม่ผ่าน	หมายเหตุ
1. การวัดอัตราส่วนแรงดันของขดลวดและการตรวจสอบขั้ว (Voltage ratio measurement and checked porality)	✓	✓		-
2. การวัดความต้านทานของขดลวด (Winding resistance measurement)	✓	✓		-
3. การวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด (Noload losses and magnetizing current measurement)	✓		✓	เกิดเบรกดาวน์ขึ้นภายในตัวถังที่แรงดัน 70%
4. การวัดกำลังสูญเสียขณะที่มีโหลด (Load losses and impedance voltage measurement)	✓	✓		-
5. การวัดความต้านทานของฉนวน (Insulation megger test)		✓		-
6. การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม (Temperature rise test)	-	-	-	เนื่องจากหม้อแปลงยังไม่สามารถทำงานได้สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. การทดสอบการทนได้ที่แรงดันพิกัด (AC voltage withstand test)	-	-	เนื่องจากหม้อแปลงยังไม่สามารถทำงานได้สมบูรณ์
8. การทดสอบแฟลชโอเวอร์ (Flashover test)	-	-	เนื่องจากหม้อแปลงยังไม่สามารถทำงานได้สมบูรณ์

ซึ่งจากการทดสอบแบบไม่มีภาระ (No load test) พบว่า เมื่อทำการป้อนแรงดันเมื่อป้อนแรงดันได้ 70 % ได้เกิดการเบรกดาวนขึ้นภายในตัวถังซึ่งอาจจะเกิดจากฉนวนที่น้อยเกินไป หรือตัวถังที่มีขนาดเล็กเกินไป จึงทำให้เกิดเบรกดาวนขึ้น ซึ่งทำให้ไม่สามารถทดสอบในอีกสามหัวข้อหลังได้ ในอนาคตโครงการนี้ก็จะต้องทำการค้นหาสาเหตุของการเกิดเบรกดาวนและทำการแก้ปัญหาเพื่อไม่ให้เกิดขึ้นในขณะทำการทดสอบแบบไม่มีภาระอีก จึงสรุปได้ว่าโครงการนี้ได้ประสบความสำเร็จในระดับหนึ่งคือได้ทำการประกอบสร้างแล้ว แต่ทำการทดสอบไม่ผ่านจึงต้องทำการปรับแก้ต่อไปในอนาคต โดยกลุ่มโครงการได้ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าในระดับหนึ่ง และได้ใช้ความพยายามในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นแม้จะยังไม่สำเร็จก็ตาม

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเป็นโครงการที่ทำร่วมกับโรงงานจึงทำให้มีอุปสรรคในการติดต่อกันเนื่องจากระยะทางในการเดินทาง ไม่ว่างเวลาเรียนหรือเวลาสอบ หรือเนื่องจากทางโรงงานมีงานเข้ามาเป็นจำนวนมาก จึงทำให้การทำงานร่วมกันเป็นไปได้ช้า และหม้อแปลงทดสอบนี้เป็นหม้อแปลงที่ทางโรงงานได้เคยทำมาแล้ว เมื่อสืบทอดแล้วและทดสอบไม่ผ่าน จึงทำให้ไม่มีบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญในหม้อแปลงทดสอบนี้ และโรงงานก็มีผู้ที่สามารถออกแบบหม้อแปลงทดสอบได้เพียงคนเดียวจึงทำให้เสียเวลาในการทำเป็นอย่างมาก

ตัวถังหม้อแปลงทดสอบเป็นตัวถังเหล็กเรียบไม่มีครีบริบายความร้อน มีน้ำหนักมาก ทำการเคลื่อนย้ายได้ยาก การเคลื่อนย้ายต้องใช้เครนในการยกเนื่องจากไม่มีล้อ จึงควรทำการแก้ไขโดยติดตั้งล้อเข้าไปในตัวถัง โดยถ่วงน้ำหนักจะทำการทดสอบว่ามีรอบรั้วหรือไม่ และมีขนาดตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ เมื่อทดสอบผ่านแล้วจึงจะสามารถนำมาใช้ได้

แกนเหล็กที่ใช้เป็นเหล็กบางเรียงกันหลายๆชั้นเพื่อลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กแต่เมื่อทำการเรียงเหล็กเสร็จเรียบร้อยแล้วนั้นควรจะเก็บไว้ให้ไม่โดนอากาศและความชื้นเนื่องจากจะทำให้เกิดสนิมที่เหล็กและจะทำให้เกิดการสูญเสียในหม้อแปลงมากขึ้น แคลมป์และน็อตต่างๆก็ควรจะลอบมูออกมาเนื่องจากมูจะทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นได้ ควรจะทำให้เกิดเหลี่ยมเกิดมุมน้อยที่สุดคือควรจะทำทุกอย่างให้มนไม่มีคมเพื่อลดการสูญเสียให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด

การพันขดลวดแต่ละชั้นต้องใช้กระดาษฉนวนรองระหว่างชั้นของขดลวดแต่ละขุดนั้นจะทำให้ขดลวดมีขนาดโตขึ้นมากจนเกิดความคลาดเคลื่อนในการออกแบบได้ จึงทำการออกแบบอย่างละเอียด และกระดาษฉนวนยังมีคุณสมบัติในการซึมซับความชื้นได้ดีจึงต้องใช้ระยะเวลาในการอบไล่ความชื้นนาน ซึ่งถ้าใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาอบไล่ความชื้นน้อยเกินไปอาจจะทำให้ความชื้นยังคงค้างอยู่ในกระดาชฉนวนและเมื่อทำการทดสอบก็อาจจะเกิดค่าสูญเสียมาก

โดยหม้อแปลงที่ออกแบบนั้นใช้วัสดุภายในประเทศเกือบทั้งหมดยกเว้นแต่เพียงบุชชิงแรงสูงซึ่งทำการสั่งมาจากต่างประเทศซึ่งทำมีค่าใช้จ่ายจำนวนมาก และยังต้องเสียเวลาการในขนส่งโดยการขนส่งนั้นจะขนส่งทางเรือซึ่งจะกินเวลานานมาก ซึ่งถ้าเป็นไปได้ก็ควรจะสั่งบุชชิงภายในประเทศมากกว่า ซึ่งจะทำให้ประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายลงไปได้มาก

การปรับปรุงพัฒนาสร้างหม้อแปลงทดสอบให้มีขนาดเล็กลงและมีน้ำหนักเบาขึ้นโดยการเพิ่มจำนวนชั้นของแกนเหล็กเพื่อทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็กลดลง ความยาว น้ำหนักของขดลวดและฉนวนจะลดลงไป ซึ่งถ้าทำให้มีขนาดเล็กลงก็จะสามารถพัฒนาไปในเชิงอุตสาหกรรมได้

การอบหม้อแปลงจะต้องทำการอบในเตาสุญญากาศไม่น้อยกว่า 2 สัปดาห์เพื่อให้มั่นใจว่าหม้อแปลงที่สร้างขึ้นอบแห้งสนิท เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นภายในเนื้อฉนวนที่หุ้มลวด

ความล้มเหลวจากการออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบแบบถังเหล็กโดยมีน้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนแทรกซึมและระบายความร้อนนี้จะเป็พื้นฐานของการพัฒนาหม้อแปลงทดสอบแบบถังเหล็กให้มีคุณภาพมากขึ้นจนสามารถผ่านการทดสอบและสามารถเอาไปใช้ได้จริงภายในอนาคตต่อไป แต่การทำหม้อแปลงทดสอบแบบใช้น้ำมันเป็นฉนวนแทรกซึมและระบายความร้อนนั้นมีน้ำหนักมากแต่ถ้าใช้ก๊าซ SF₆ แทนน้ำมันหม้อแปลงก็จะทำให้มีน้ำหนักเบาขึ้นและสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่ายขึ้น โดยจะเหมาะสมกับการนำไปทดสอบที่สนาม (on site)

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC 60296, 2003, Fluids for eletrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear
- [2] สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง** , ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2528
- [3] IEC 60060, 1973, High-voltage test techniques
- [4] สำรวย สังข์สะอาด,ปริพนธ์ พัฒนสัตยวงศ์, “หม้อแปลงทดสอบแบบชั้นบันได 200 kV 10 kVA” ,รายงานการวิจัย ,ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2531
- [5] มนตรี ไทยมานะ, “การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบ 100 kV ใช้ก๊าซ SF6 เป็นฉนวน”, วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต , ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ,บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529
- [6] ประมวล คงสาคร,คงระพันธ์ พงษ์พิทักษ์, “การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 150 kV 5 kVA แบบใช้น้ำมันเป็นฉนวนแทรกซึม” ,วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ,ปีที่ 13 ,ฉบับที่ 1 ม.ค. – มี.ค. 2546
- [7] IEC 60076, 2004, Power Transformer



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 150 kVA

Design and Construction a testing transformer 300kv 150 kVA

วัฒน์กิจ ช้างพินิจ ศิวาพัชฌ์ วรวัชต์จิราโชค ศุภวัฒน์ โชคสวัสดิ์ไพศาล และ สรสิข คชสิทธิ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-762-0986 E:mail :raterko_17@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นรายงานผลการศึกษาและออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 150 kVA 50 Hz มีขดลวดสองชุด ใช้ตัวถังเป็นเหล็ก ปลูกฉนวนนำสายไฟไม่ครีบทำด้วยพอร์ซเลน ใช้กระดาษฉนวนเป็นฉนวนระหว่างขดลวดกับส่วนที่ต่อลงดิน โดยที่จะใช้น้ำมันหม้อแปลง (Mineral Oil) เป็นฉนวนแทรกซึมและทำการระบายความร้อน โดย โครงสร้างของหม้อแปลงทดสอบจะประกอบด้วยขดลวดสองชุดคือขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูง โดยที่ขดลวดแรงสูงจะพันซ้อนอยู่บนขดลวดแรงต่ำโดยจะพันแบบทรงกระบอกรวมแกนและใส่แผ่นซิลด์ทองแดงหุ้มที่ปลายและนิวทรัลของขดลวดแรงต่ำสูงเพื่อช่วยในการกระจายแรงดันเสิร์จ ฉนวนที่ใช้ห่อหุ้มขดลวดและกันระหว่างชั้นจะเป็นกระดาษฉนวน แกนเหล็กจะเป็นเหล็กแบบแผ่นเหล็กลามิเนตผสมซิลิคอน ที่ผ่านการรีดเย็นเพื่อลดค่ากระแสไหลวนในแกนเหล็ก ทำการจัดวางแบบคอร์ โดยที่ขดลวดและแกนเหล็กจะจุ่มน้ำมันเพื่อให้มันนั้นเป็นฉนวนทางไฟฟ้าและนำความร้อนที่เกิดขึ้นจากแกนเหล็กออกสู่ภายนอก

คำสำคัญ: หม้อแปลงทดสอบ, ขดลวดแรงต่ำ, ขดลวดแรงต่ำสูง

Abstarct

This paper presents a design and construction of a single phase 300 kV 150 kVA 50 Hz tank type oil immersed testing transformer. The testing transformer having two windings with a bushing made by porcelain and insulation paper is used as insulation between the windings and grounded parts. The mineral oil is used as a space insulation and coolant. The main structure consists of two windings, low voltage winding is wound around the steel core, high voltage winding is wound as concentric cylinder on the top of the low voltage winding. At the beginning and end of

high voltage winding add a copper shield which in order to reduced the gradient of surge voltage. The insulation paper and pressboard are used for support and internal insulation system. The steel core is made from grain oriented silicon steel laminations which in order to reduced the eddy current loss in the steel core.

Keyword : Testing Tranformer , Low voltage winding , High voltage winding

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงสามารถผลิตได้ในประเทศ เช่น ลูกถ้วย ฉนวนไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ซึ่งได้รับการยอมรับจากทั้งภาครัฐบาลและเอกชน หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงก็เป็นอุปกรณ์สำคัญหลักสำหรับการสร้างแรงดันสูงทั้งกระแสสลับ และกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ ในการศึกษาวิจัยด้านไฟฟ้าแรงสูงเพื่อแก้ปัญหาหรือพัฒนา ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูง ก็สามารถนับได้ว่าหม้อแปลงทดสอบแรงสูงเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญยิ่งและเนื่องจากห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังนั้นมีอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจำนวนมาก แต่อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงภายในห้องปฏิบัติการนั้น ยังไม่มีอุปกรณ์ที่จะสามารถทดสอบอุปกรณ์เหล่านั้นได้ ดังนั้นจึงได้มีการสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 150 kVA เพื่อที่จะสามารถทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงภายในห้องปฏิบัติการว่ามีความปลอดภัยในการใช้งานหรือไม่

2. ส่วนประกอบและโครงสร้างของหม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบส่วนใหญ่จะเป็นชนิดหนึ่งเฟส มีกำลังต่ำเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแต่มีแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงเพื่อที่จะนำไปทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงชนิดอื่นๆได้แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วารณิใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถปรับได้โดยการปรับแรงดันทางด้านปฐมภูมิซึ่งส่วนใหญ่มีค่าไม่เกิน 2kV โครงสร้างภายในจะประกอบด้วยขดลวดอย่างน้อยสองชุดพันอยู่บนแกนเหล็ก ชุดที่พันอยู่กับแกนเหล็กจะเป็นขดลวดแรงดันต่ำเป็นชุดที่ป้อนกำลังไฟฟ้าเข้า ขดลวดชุดต่อมาพันทับอยู่บนขดลวดแรงดันต่ำคือขดลวดแรงดันซึ่งเป็นขดลวดที่จ่ายกำลังไฟฟ้าออก โดยที่แกนเหล็กและขดลวดนั้นจะวางอยู่ในถังและจุ่มแช่อยู่ในฉนวนแทรกซึม

2.1 แกนเหล็ก

แกนเหล็กจะทำหน้าที่เป็นทางผ่านที่ดีของเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อให้เกิดความเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก โดยพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก จำนวนรอบขดลวดและแรงดันจะสัมพันธ์ตามสมการ

$$E = 4.44NFBA \quad (1)$$

แกนเหล็กจะประกอบขึ้นจากแผ่นบางเนื่องจากต้องการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก อันเกิดจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก การออกแบบหน้าตัดของแกนเหล็กจะทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมหลายชั้นอัดกันในวงกลมเพื่อให้สามารถใช้พื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหตุผลทางกายภาพในการพันขดลวดให้มีลักษณะเป็นวงกลมได้ง่ายขึ้น สดการเสียดสีระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก และเมื่อขณะใช้งานจะเกิดแรงระหว่างขดลวดก็จะไม่ทำให้ขดลวดเสียรูปและแกนเหล็กภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้เหล็กผสมซิลิคอนเพื่อเพิ่มค่าความต้านทานจำเพาะทำให้การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนลดลง

2.2 ขดลวด

เส้นลวดอาบนำยฉนวน ขดลวดจะพันด้วยเส้นลวด อาบนำยฉนวน Poly Formol Resin (PVF) ซึ่งทนน้ำมันได้ดี เยี่ยม มีความเหนียวยืดหยุ่นเป็นพิเศษ ทนต่อการขีดถู และสามารถนำความร้อนได้ถึง 180°C การเลือกชนิดวัสดุที่จะนำมาทำเป็นขดลวดจะพิจารณาจากน้ำหนักต่อปริมาตร สภาพต้านทาน ความแข็งแรงทางกล ความคงทนต่อความกัดกร่อน การขยายตัว ราคาของวัสดุ รูปแบบและขนาดของขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำจะต้องคำนึงถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดต่างๆ ของขดลวดว่าจะต้องไม่เกินค่าที่ทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนหรือเกิดเบรกดาวนในฉนวน

2.3 ฉนวน

เนื่องจากหม้อแปลงทดสอบจะต้องเป็นตัวกำเนิดแรงดันสูง ดังนั้นการออกแบบฉนวนจะต้องเป็นจุดที่ต้องพิจารณาอย่างรอบคอบเพราะมีผลต่อความปลอดภัยและอายุการใช้งานของตัวหม้อแปลงทดสอบด้วยโดยจะมีฉนวนดังต่อไปนี้

- 1) น้ำมันหม้อแปลง น้ำมันหม้อแปลงนั้นจะทำหน้าที่เป็นฉนวนแทรกซึมและช่วยในการระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) กระดาษฉนวน กระดาษฉนวนใช้เป็นฉนวนระหว่างชั้นขดลวดระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำและระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก เนื่องจากกระดาษมีรูพรุน จึงต้องอบแห้งและแช่น้ำมันหม้อแปลง

2.4 ปลอกฉนวนนำสาย

ปลอกฉนวนนำสายทำหน้าที่เป็นฉนวนกันระหว่างส่วนที่เป็นแรงสูงกับส่วนที่ต่อลงดิน โดยปลอกฉนวนนำสายอาจจะทำมาจากวัสดุ เช่น พอร์ซเลน เส้นใยแก้ว โดยสำหรับหม้อแปลงที่ใช้ภายนอกอาคารปลอกฉนวนนำสายไฟอาจจะทำลักษณะเป็นครีบบนโดยจะเพิ่มระยะรั้วตามผิวเพื่อป้องกันการรบกวนไฟตามผิว

3. การออกแบบและประกอบสร้าง

3.1 การออกแบบแกนเหล็ก

หม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบนี้ ประกอบด้วย ขดลวดแรงต่ำ ขดลวดแรงสูง รูปลักษณะขดลวดทั้งสองเป็นแบบชั้นทรงกระบอกและแกนเหล็กจะเป็นแบบคอร์เนื่องจากแกนเหล็กที่ใช้ในการออกแบบมีค่า B_c ที่เข้าใกล้ย่านอิ่มตัวประมาณ 1.7 Wb/m^2 ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า B_c เท่ากับ 1.4 Wb/m^2 ซึ่งพื้นที่ตัดขวางแกนเหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$A_{Fe} = C \sqrt{\frac{S_n}{f}} \quad (4)$$

เมื่อ $C = 7.15 \text{ cm}^2 \text{ J}^{-1/2}$

จากการคำนวณการออกแบบแกนเหล็กในสมการที่ (2) ได้พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กเท่ากับ 0.03916 m^2 โดยออกแบบตามรูปดังต่อไปนี้



รูปที่ 2 แกนเหล็กทั้งหมด

3.2 การออกแบบขดลวดแรงต่ำ

เส้นลวดของขดลวดแรงต่ำจะใช้ลวดทองแดงทาบแบนหุ้มด้วยกระดาษฉนวน ซึ่งมีขนาดดังต่อไปนี้

ขดลวดหุ้มกระดาษฉนวน

$3.6 \times 10.6 \text{ mm}$

พื้นที่ตัดขวางของขดลวดหุ้มกระดาษฉนวน 38.16 mm^2

ซึ่งในการพันแต่ละรอบจะใช้ขดลวดจำนวน 9 เส้นพันไปพร้อมๆกัน ทำให้พื้นที่ภาคตัดขวางในแต่ละรอบของการพัน เท่ากับ 343.44 mm^2 โดยมี การพันขดลวดทางด้านแรงต่ำเป็นทรงกระบอก (N_1) จำนวน 34 รอบ โดยแบ่งการพันเป็น 2 ชั้น ชั้นละ 17 รอบ จากการออกแบบแกนเหล็กทำให้ทราบว่แกนเหล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง (Core diameter) 246 mm และทำการหุ้มด้วยกระดาษฉนวนหนา 12 mm จึงทำการเริ่มพันขดลวดแรงต่ำ (Inner diameter LV) ที่เส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 270 mm

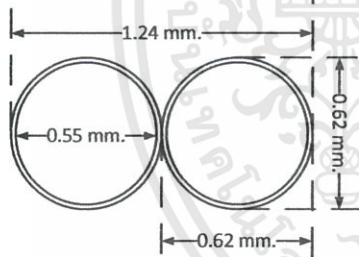
3.3 การออกแบบขดลวดแรงสูง

เส้นลวดของขดลวดแรงสูงจะใช้ขดลวดอาบน้ำยา (PVF) ซึ่งมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่หน้าตัด ดังต่อไปนี้

เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดอาบน้ำยา 0.62 mm

พื้นที่ภาคตัดขวางลวดเปลือย 0.23758 mm^2

จำนวนรอบทั้งหมดของขดลวดแรงสูง $N_2 = 24519$ รอบ โดยการพันไปพร้อมกันทีละ 2 เส้น ทำให้พื้นที่หน้าตัดของการพันแต่ละชุด (A_2) เท่ากับ 0.475 mm^2



รูปที่ 3 ภาคตัดขวางของขดลวดแรงสูงที่ใช้พันในแต่ละชุด

ขดลวดพันแบบขดลวดชั้นทรงกระบอก โดยจะแบ่งเป็น 63 ชั้น และแบ่งเป็น 10 กลุ่มย่อย โดยพันชั้นที่ 1 จำนวน 474 รอบชั้นถัดไปจะลดลงชั้นละ 3 รอบ ตั้งแต่ชั้นที่ 31 เป็นต้นไปจำนวนรอบการพันจะลดลงชั้นละ 2 รอบ

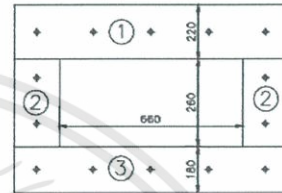
3.3 การออกแบบตัวถัง

ขนาดของตัวถังถูกกำหนดด้วยขนาดของโครงสร้างภายในหม้อแปลง คือ ขดลวด และ แกนเหล็ก ซึ่งตัวถังจะเป็นตัวระบายความร้อนให้กับหม้อแปลง ผ่านทางผิวของตัวถัง ในกรณีนี้หม้อแปลงเป็นหม้อแปลงทดสอบจึงไม่จำเป็นที่ตัวถังจะต้องมีครีบบเพื่อระบายความร้อน เนื่องจากเป็นการใช้งานในช่วงเวลาสั้นๆ ดังนั้นพื้นผิวของถังที่เรียกก็เพียงพอในการ

ระบายความร้อนแล้ว ส่วนความสูงของตัวถังนั้น ขึ้นอยู่กับความยาวของปลายลวดฉนวนนำสาย และความสูงของขดลวดในถัง

3.4 การตัดเหล็กและประกอบเหล็ก

หม้อแปลงทดสอบประกอบด้วยโครงสร้างหลักคือ แกนเหล็กขดลวด ตัวถังและฉนวน โดยการสร้างและประกอบหม้อแปลงทดสอบนั้นสามารถแบ่งออกไปทำในแต่ละส่วนตามที่ได้ออกแบบไว้แล้วจึงนำมาประกอบเข้าด้วยกันเพื่อที่จะได้ประหยัดเวลาในการสร้าง



STEP 1



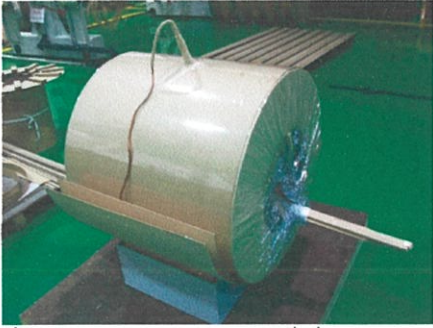
STEP 2

รูปที่ 6 ลำดับการประกอบเหล็ก

3.5 การพันขดลวดและฉนวนของขดลวด

ขดลวดแรงต่ำและแรงสูงนั้นจะมีรูปแบบการพันซ้อนกันเป็นแบบทรงกระบอกรวมแกน โดยที่ขดของขดลวดแรงต่ำจะอยู่ ติดกับแกนเหล็กโดยจะมีปลอกในหนา 3 มิลลิเมตร เป็นฉนวนระหว่างแกนเหล็กกับขดลวดขดลวดแรงดันต่ำนั้นจะเป็นขดลวดที่ถูกพันขึ้นก่อนขดลวดแรงดันสูงโดยในการพันแต่ละรอบจะใช้ขดลวดจำนวน 9 เส้น ซึ่งแต่ละเส้นมีความหนา 3 mm และความกว้าง 10 mm จะพันทั้งหมด 34 รอบ แบ่งออกเป็น 2 ชั้นๆละ 17 รอบ และเมื่อถึงรอบที่ 8.5 และ 25.5 ก็จะทำ Transpose สายเพื่อให้สายมีขนาดเท่ากัน การพันขดลวดแรงสูงนั้นจะพันทั้งสิ้น 63 ชั้น โดยจะแบ่งออกเป็นกลุ่มทั้งสิ้น 10 กลุ่ม โดยจะพันซ้อนทับกันไปในแต่ละชั้น ซึ่งในระหว่างชั้นนั้นก็จะมีกระดาษฉนวนความหนา 0.13 mm ชั้นระหว่างชั้นเพื่อกันไม่ให้ขดลวดแต่ละชั้นมาชนกันเพื่อป้องกันการลัดวงจรภายในขดลวด โดยในระหว่างกลุ่มนั้นก็จะมีชั้นกระดาษแองโกล่าริงติดไว้ กระดาษแองโกล่าริงนั้นจะช่วยลดและกระจายความเครียดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวด และเมื่อพันขดลวดเสร็จสิ้นทั้ง 63 ชั้นแล้วนั้นจะทำการใส่กระดาษย่นทั้งสิ้น 10 ชั้น เพื่อป้องกันการลัดวงจรในหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 ขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำที่พันเสร็จสมบูรณ์

3.6 การประกอบแกนเหล็กเข้ากับขดลวด

เมื่อพันขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำเสร็จแล้วนั้น ก็จะนำมาประกอบเข้ากับแกนเหล็ก โดยจะต้องถอดแกนเหล็กออกฝั่งหนึ่งออก เพื่อจะสามารถนำขดลวดเข้ามาประกอบเข้ากับแกนเหล็กแล้วเมื่อประกอบแกนเหล็กเข้ากับขดลวดทั้งสองเสร็จสมบูรณ์แล้วนั้น จะนำไปทดลองติดตั้งในถังเพื่อทดสอบว่าแกนเหล็ก ขดลวดและแคลมป์ สามารถใส่ลงพอดีในตัวถังที่ได้ออกแบบ



รูปที่ 11 แกนเหล็กและขดลวดและแคลมป์ภายในตัวถังหม้อแปลงทดสอบ

4. การทดสอบหม้อแปลงทดสอบและการประเมินผล

การทดสอบจะใช้มาตรฐานเทคนิคการทดสอบไฟฟ้าตามที่ได้แนะนำไว้ในมาตรฐาน IEC 60076 ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับการออกแบบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและจะนำมาเป็นตัวอย่างในการทดสอบโดยรายการการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ออกแบบไว้มีรายการดังต่อไปนี้

1. การวัดอัตราส่วนแรงดันของขดลวดและการตรวจสอบขั้ว
2. การวัดความต้านทานของขดลวด
3. การวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด
4. การวัดกำลังสูญเสียขณะที่มีโหลด
5. การวัดความต้านทานของฉนวน

4.1 การวัดอัตราส่วนแรงดันของขดลวดและการตรวจสอบขั้ว

การวัดสัดส่วนจำนวนรอบก็เพื่อวัตถุประสงค์ในเพื่อทราบค่าสัดส่วนจำนวนรอบระหว่างขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำ วิธีทดสอบคือ Turn ratio meter วัดอัตราส่วนของแรงดันต่อวัตต์ที่แต่ละจุดแยกและให้ตรวจสอบขั้วของหม้อแปลง 1 เฟส

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการวัดอัตราส่วนแรงดันของขดลวดและการตรวจสอบขั้ว

ขั้ววัด	ค่าจากการคำนวณ	ค่าจากการวัด	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
U-O : u-v	721.15	724.71	+ 0.49 %

4.2 การวัดค่าความต้านทานของขดลวด

การวัดค่าความต้านทานของขดลวด ก็เพื่อวัตถุประสงค์สำคัญเพื่อที่จะนำค่าทดสอบที่ได้ไปคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียของขดลวด (Copper losses)

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าความต้านทานของขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ

ขดลวดวัด	ค่าความต้านทานของขดลวด			
	ค่า ค.ต.ท. จากการคำนวณที่ 75 C	ค่า ค.ต.ท. จากการวัดที่ 31.3 C	ค่า ค.ต.ท. จากการวัดที่ 75 C	% ความคลาดเคลื่อน
ขดลวดแรงต่ำ	2.49 mΩ	3.1 mΩ	3.6 mΩ	+44.57 %
ขดลวดแรงสูง	1522.6 Ω	1369 Ω	1593 Ω	+4.66 %

ผลการวัดค่าความต้านทานที่ได้มีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการผิดพลาดจากการอ่านมิเตอร์ของเครื่องวัดและความยาวของขดลวดที่ใช้ในการคำนวณค่าความต้านทานกับความยาวของขดลวดจริงที่ไม่เท่ากันจึงเป็นสาเหตุให้เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณกับการวัดมีความคลาดเคลื่อนไป

4.3 การวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด

การวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลดของหม้อแปลงทดสอบนั้นเป็นการทดสอบโดยการเปิดวงจรทางด้านขดลวดแรงดันสูงและป้อนแรงดันเข้าที่ขดลวดแรงดันต่ำ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กที่วัดได้นั้นไม่คิดรวมค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดเพราะกระแสไฟฟ้าในขณะที่ไม่มีโหลดนั้นมีค่าน้อยมาก การทดสอบป้อนแรงดันกระแสลับเข้าทางด้านขดลวดแรงต่ำที่ละชั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขงไม่มีโหลด

เปอร์เซ็นต์	แรงดันอินพุท (V)	แรงดันเอาต์พุท(KV)	กระแส(A)	PD (pC)
10	42.04	30.5	5.39	2.6
20	84.56	61.3	10.88	2.5
30	124.12	90.0	15.97	2.4
40	167.03	121.0	21.37	2.7
50	208.95	151.4	25.72	2.4
60	249.48	180.8	29.06	291.6
70	292.54	212.0	33.45	2380
80	333.07	241.4	42.5	3600
90				
100				
110				

เมื่อป้อนแรงดันเข้าที่ 70% ของแรงดันพิกัด ได้เกิด flashover ขึ้นภายในตัวถัง และเมื่อป้อนแรงดันเข้าที่ 80% ของแรงดันพิกัดก็เกิด flashover ขึ้นภายในตัวถังอยู่ จึงได้หยุดการทดสอบไว้เพียงเท่านี้ เนื่องจากว่าหากเพิ่มแรงดันขึ้นไปมากกว่านี้ อาจเกิดความเสียหายขึ้นกับหม้อแปลงทดสอบได้

4.4 การวัดกำลังสูญเสียและแรงดันอิมพีแดนซ์ขณะมีโหลด

การวัดค่ากำลังสูญเสียกำลังไฟฟ้ามืดต้องวัดที่ความถี่พิกัด โดยการป้อนแรงดันเข้าสู่ขดลวดแรงต่ำจนกระทั่งค่ากระแสถึงค่าพิกัด การวัดค่าแรงดันอิมพีแดนซ์ต้องวัดที่ความถี่ที่กำหนดโดยการป้อนแรงดันเข้าสู่ขดลวดด้านแรงต่ำจนกระทั่งค่ากระแสถึงค่าพิกัด

ตารางที่ 4.4 ค่าวัดกำลังสูญเสียและแรงดันอิมพีแดนซ์ขณะมีโหลด

ค่าตัวแปร	ปริมาณ
I_{1sc}	360.8 A
U_{1sc}	21.712 V
P_k	777.65 W
Ambient temp (C)	31.3 C

ตารางที่ 4.5 สรุปค่ากำลังสูญเสียและแรงดันอิมพีแดนซ์ขณะมีโหลด

	ค่าคำนวณที่ 75 C	ค่าวัดได้		%ความคลาดเคลื่อน
		ที่ 31.3 C	ที่ 75 C	
P_k (watt)	753.68	777.65	895.62	+18.83%
P_R (watt)	704.37	644.25	868.18	+23.25%
P_{st} (watt)	49.31	31.95	27.44	-44.35%
R_{sc} (Ω)	-	0.00597	0.00687	-
X_{sc} (Ω)	-	0.0597	0.0597	-
L_{HV} (H)	1093.28	975.41	-	-10.78%
Z_{sc} (Ω)	-	0.06	0.06	-
	5.81	5.2	5.2	-10.49%

4.5 การวัดความต้านทานของฉนวน

การวัดความต้านทานของฉนวนในหม้อแปลงทดสอบเป็นการวัดค่าความต้านทานของฉนวนระหว่างขดลวดกับกราวด์ ในการทดสอบได้ใช้เครื่องทดสอบค่าความต้านทานของฉนวน ด้วยแรงดันกระแสตรง 2.5 kV

ตารางที่ 4.6 ค่าความต้านทานของฉนวน

วัดความต้านทานระหว่าง	ค่าความต้านทาน (M Ω)
ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ (LV-E)	12300

5 .สรุปผลโครงการและข้อเสนอแนะ

หม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 150 kVA ที่ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างขึ้นมาเป็นถึงหลักโดยจะมีปลอกฉนวนนำสาย (Bushing) ใช้กระดาดฉนวนระหว่างชั้นขดลวดและมีน้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนแทรกซึมและระบายความร้อน การใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนแทรกซึมทำให้บำรุงรักษาได้ง่าย โดยหม้อแปลงทดสอบตัวนี้เป็นหม้อแปลงที่ทำการออกแบบขึ้นใหม่ด้วยที่ยังไม่มีมีการทดสอบ จึงทำให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้นในการออกแบบและประกอบสร้างได้ ทุกการทดสอบการผ่านไปได้ด้วยดี ยกเว้นเพียงการทดสอบเดียวคือการทดสอบแบบไม่มีภาระทำการป้อนแรงดันเมื่อป้อนแรงดันได้ 70 % ได้เกิดการเบรกควานขึ้นภายในตัวถังซึ่งอาจจะเกิดจากฉนวนที่น้อยเกินไป หรือตัวถังที่มีขนาดเล็กเกินไป จึงทำให้เกิดเบรกควานขึ้น ในอนาคตโครงการนี้ก็จะต้องทำการค้นหาสาเหตุของการเกิดเบรกควานและทำการแก้ปัญหาเพื่อไม่ให้เกิดขึ้นในขณะที่ทำการทดสอบแบบไม่มีภาระอีก จึงสรุปได้ว่าโครงการนี้ได้ประสบความสำเร็จในระดับหนึ่งคือได้ทำการประกอบสร้างแล้ว แต่ทำการทดสอบไม่ผ่านจึงต้องทำการปรับแก้ต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

[1] IEC 60296, 2003, Fluids for eletrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear

[2] สำรวย สังข์สะอาด, *วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง*, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528

[3] IEC 60060, 1973, High-voltage test techniques

[4] สำรวย สังข์สะอาด, ปรีทนต์ พัฒนสัตยวงศ์, “หม้อแปลงทดสอบแบบขึ้นบันได 200 kV 10 kVA” ,รายงานการวิจัย ,ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531

[5] มนตรี ไทยมานะ, “การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบ 100 kV ใช้ก๊าซ SF6 เป็นฉนวน”, วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต , ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ,บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529

[6] ประมวล คงสาคร, คกระพันธ์ พงษ์พิทักษ์, “การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 150 kV 5 kVA แบบใช้น้ำมันเป็นฉนวนแทรกซึม” , *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ* ,ปีที่ 13 ,ฉบับที่ 1 ม.ค. – มี.ค. 2546

[7] IEC 60076, 2004, Power Transformer



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 150 kVA Design and Construction of a testing transformer 300 kV 150 kVA

วัฒน์กิจ ช่างพินิจ ศิวาพัชกร วรวิชิจิราโชค ศุภวัฒน์ โชคสวัสดิ์ไพศาล สรสิข คชสิทธิ์ ศิริวัฒน์ โพธิ์เวทกุล พิรุณภูมิ ยุทธโกวิท
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นรายงานผลการศึกษาค้นคว้าและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 150 kVA 50 Hz ใช้ตัวถังเป็นโลหะ ปอลอดอมวน้ำสายไฟมีคิริกับตัวขั้วขอยเชื่อม ใช้กระดาษคอนวามเป็นฉนวนระหว่างขดลวดกับส่วนที่ค่อลอมิน โครงสร้างของหม้อแปลงทดสอบจะประกอบด้วยขดลวดสองชุดคือขดลวดแรงดันต่ำและขดลวดแรงดันสูง โดยที่ขดลวดแรงดันสูงจะพันขึ้นอยู่บนขดลวดแรงดันต่ำโดยจะพันแบบประกบซ้อนกันบนขดลวดแรงดันสูงและขดลวดแรงดันต่ำจะพันรอบขดลวดแรงดันสูงเพื่อช่วยในการกระจายแรงดันเนื่อง อนุวาทที่ใช้อยู่บนขดลวดและกันระหว่างขดลวดจะเป็นอนุวาทกระดาษ แทนเหล็กจะเป็นแม่เหล็กแบบแผ่นเหล็กกล้า มีอนุวาทสี่ชนิดคือคิริ ทำการวัดความดันด้วย โดยที่ขดลวดและแม่เหล็กจะฉนวนกันด้วยฉนวนเพื่อไม่ให้มีอนุวาทเป็นอนุวาทไฟฟ้าและนำความร้อนที่เกิดขึ้นจากแม่เหล็กออกสู่ภายนอก

Abstract

This paper presents a design and construction of a single phase 300 kV 150 kVA 50 Hz testing transformer. The testing transformer having a bushing made by porcelain and insulation paper is used as insulation between the windings and grounded parts. The mineral oil is used as a space insulation and coolant. Low voltage winding is wound around the steel core, high voltage winding is wound as concentric cylinder on the top of the low voltage winding. At the beginning and end of high voltage winding add a copper shield which in order to reduced the gradient of surge voltage. The insulation paper and pressboard are used for support and internal insulation system. The steel core is made from grain oriented silicon steel laminations.

1. บทนำ

เนื่องจากการปฏิบัติงานไฟฟ้าแรงสูงของสถานีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังยังมีอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเข้ามารับการทดสอบจำนวนมาก แต่แหล่งจ่ายแรงดันสูงภายในห้องปฏิบัติการนั้นยังจะสามารถทดสอบอุปกรณ์ดังกล่าวได้ ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบ 300 kV 150 kVA เพื่อที่จะสามารถรองรับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2. วัตถุประสงค์ที่เกี่ยวข้อง

หม้อแปลงทดสอบเป็นชนิดหนึ่งที่มี แรงดันไฟฟ้าจากอีกด้านหนึ่งที่จะนำไปทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงได้ โครงสร้างภายในประกอบด้วยแกนเหล็กซึ่งประกอบด้วยแกนและขดลวดที่ค่อลอมิน โครงสร้างของหม้อแปลงทดสอบเป็นแบบประกบซ้อนกันบนขดลวดแรงดันสูงและขดลวดแรงดันต่ำจะพันรอบขดลวดแรงดันสูงเพื่อช่วยในการกระจายแรงดันเนื่อง อนุวาทที่ใช้อยู่บนขดลวดและกันระหว่างขดลวดจะเป็นอนุวาทกระดาษ แทนเหล็กจะเป็นแม่เหล็กแบบแผ่นเหล็กกล้า มีอนุวาทสี่ชนิดคือคิริ ทำการวัดความดันด้วย โดยที่ขดลวดและแม่เหล็กจะฉนวนกันด้วยฉนวนเพื่อไม่ให้มีอนุวาทเป็นอนุวาทไฟฟ้าและนำความร้อนที่เกิดขึ้นจากแม่เหล็กออกสู่ภายนอก

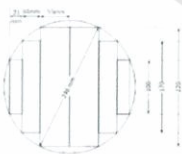
3. การออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบ

3.1 ชื่อกำหนดของหม้อแปลงทดสอบที่ชื่อการออกแบบ

กำลังไฟฟ้า (S) 150 kVA, แรงดันไฟฟ้าเข้าด้านแรงต่ำ (V₁) 416 V, แรงดันขั้วออกด้านแรงสูง (V₂) 300 kV, กระแสเปลี่ยนเข้า (I₁) 360 A, กระแสขั้วออก (I₂) 0.5 A, จำนวนขดลวด 1 phase, ความถี่ (f) 50 Hz

3.2 การออกแบบแกนเหล็ก

แกนเหล็กจะเป็นแบบคอร่า ซึ่งจากการคำนวณจะได้พื้นที่ตัดขวางแกนเหล็กเท่ากับ 391.6 cm² เส้นผ่านศูนย์กลางของภาคตัดขวางแกนเหล็กเท่ากับ 0.246 m และเหล็กที่ใช้แม่เหล็กเรียกว่าคือ 0.055Wb โดยใช้ภาคตัดขวางแกนเหล็กเป็นแบบ Core Steel มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตร 3 ชิ้น ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ภาพตัดขวางของแกนเหล็ก

3.3 การออกแบบขดลวด

- ด้านแรงดันต่ำ ใช้ขดลวดที่มีขนาด 3 x 10 mm มีความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 1.35 A/mm² ใช้ทองในการพันแต่ละรอบจำนวน 9 เส้น โดยมีการนำขดลวดทางด้านแรงดันเป็นทรงประกบซ้อนกัน 34 รอบ โดยแบ่งการพันเป็น 2 ชั้น ชั้นละ 17 รอบ

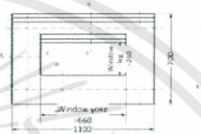
- ด้านแรงดันสูง ใช้ขดลวดที่มีขนาด 0.24 mm มีความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 1 A/mm² โดยในการพันแต่ละรอบจึงใช้ขดลวด 2 เส้น และได้จำนวนรอบของขดลวดแรงสูง 24519 รอบ โดยแบ่งการพันเป็น 63 ชั้น และแบ่งขดลวดย่อยสำหรับการพันรอบข้างกันเป็น 10 กลุ่ม



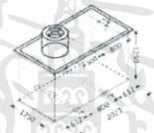
รูปที่ 2 การพันขดลวดแรงต่ำ ขดลวดแรงสูง และฉนวน ล้อปรอบแกนเหล็ก

3.4 การกำหนดมิติโลหะ

ความกว้างของการพันขดลวดทั้งหมดเท่ากับ 588 mm, ความยาว window yoke ของแกนเหล็กเท่ากับ 660 mm, ความยาว window leg เท่ากับ 259.5 mm จะได้ลักษณะของแกนเหล็กและตัวถังดังนี้



รูปที่ 3 ภาพขนาดของแกนเหล็ก



รูปที่ 4 ลักษณะของตัวถังหม้อแปลง

3.5 เลือกฉนวนน้ำสาย

เลือกฉนวนน้ำสายเป็นชนิด Oil Impregnated Paper Bushing ตามมาตรฐาน IEC 60137 แรงดันที่ทดสอบ 170 kV กระแสที่ทดสอบ 800 A แรงดันที่ทนได้ 750 kV และใช้ไฟฟ้าความถี่ใช้งาน 325 kV/cm ระบุไว้ในแรงดันที่ใช้ งาน 25 ถึง 40 °C คุณภาพฉนวนนี้จะมีอุณหภูมิถึง 105 °C ใช้พีวีซีขนาดโดยมีระยะการวัด 1595 mm ระยะ ควี่ 5270 mm

3.6 การประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบ



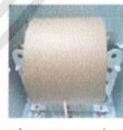
รูปที่ 5 การประกอบแกนเหล็ก



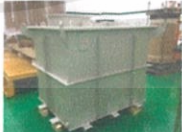
รูปที่ 6 การพันขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูง



รูปที่ 7 การประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็ก



รูปที่ 8 การวัดระยะเพื่อใส่สาย



รูปที่ 9 ตัวถัง



รูปที่ 10 ปอลอดอมวน้ำสาย

สรุปผลและการวิเคราะห์

หม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 150 kVA ที่ทำการออกแบบและสร้างนี้ เป็นแบบใช้โลหะที่ใช้น้ำมันเป็นอนุวาทและระบายความร้อน โดยจะออกแบบให้สามารถทำการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ 300 kV ได้ และจะทำการทดสอบเมื่อทำการประกอบสร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว โดยจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60076 ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นายวัฒนกิจ ช่างพินิจ เกิดเมื่อวันที่ 25 สิงหาคม พ.ศ.2534 ที่จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาจากโรงเรียนจุฬารามราชวิทยาลัยพิษณุโลก และสำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email : zyberiaz@hotmail.com

ฝึกงานที่ : บริษัท ว.ไซยา อินเตอร์เนชันแนล จำกัด



นายศิวาพัชญ์ วรวิฑ์จจิราโชค เกิดเมื่อวันที่ 24 ตุลาคม พ.ศ.2534 ที่จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาจากโรงเรียนสารสิทธิ์พิทยาลัย และสำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email : mek_2410@hotmail.com

ฝึกงานที่ : โรงไฟฟ้าราชบุรีพาวเวอร์



นายศุภวัฒน์ โชคสวัสดิ์ไพศาล เกิดเมื่อวันที่ 6 มีนาคม พ.ศ.2535 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาจากโรงเรียนบางกะปิ และสำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email : supawat_chk@hotmail.com

ฝึกงานที่ : บริษัท ฟุจิ ทัสโก้ จำกัด



นายสรสิช คชสิทธิ์ เกิดเมื่อวันที่ 16 มกราคม พ.ศ.2535 ที่จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาจากโรงเรียนนลาชาลกรุงเทพ และสำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail : RateRko_17@hotmail.com

ฝึกงานที่ : บริษัท ฟุจิ ทัสโก้ จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้