



การวิเคราะห์ความสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า

เกรียงไกร กิจสวัสดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ปีการศึกษา 2564



การวิเคราะห์ความสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า

เกรียงไกร กิจสวัสดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์



Analysis of Losses Per Cooling Surface Area of Transformer

Kiangkai Kitsawat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Graduate Study, Faculty of Engineering

Southeast Asia University

Academic Year 2021

Copyright by Southeast Asia University

ชื่อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ความสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า
ชื่อนักศึกษา	นายเกรียงไกร กิจสวัสดิ์
รหัสนักศึกษา	6344010004
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร.บุญเลิศ สือเฉย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์

..... คณบดี
(ดร.ภาณุวัฒน์ แตระกุล)

วันที่สอบ: 16 กรกฎาคม พ.ศ. 2565

Thesis Title Analysis of Losses Per Cooling Surface Area of Transformer
Student Name Mr.Kiangkai Kitsawat
Student ID 6344010004
Thesis Advisor Assoc. Prof. Dr.Boonlert Suechoey

Examining Committee


..... Chairman
(Assoc. Prof. Dr.Monthon Leelajindakraierk)


..... Member
(Asst. Prof. Dr.Somsak Siriporananon)


..... Member (Thesis Advisor)
(Assoc. Prof. Dr.Boonlert Suechoey)

This Thesis has been approved to be a Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Graduate Study, Faculty of Engineering


..... Dean
(Dr.Panuwat Taerakul)

Examination Date: July 16, 2022

ชื่อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ความสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า
ชื่อนักศึกษา	นายเกรียงไกร กิจสวัสดิ์
รหัสนักศึกษา	6344010004
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2564
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร. บุญเลิศ สือเฉย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอผลการวิเคราะห์ความสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อนำข้อมูลไปใช้อ้างอิงในการออกแบบหม้อแปลงให้มีอุณหภูมิเป็นไปตามข้อกำหนด โดยทำการทดสอบหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่าย 160 kVA 3 ph 50 Hz 22000-416/240 V Dyn 11 ตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การทดสอบทำโดยจ่ายโหลดให้กับตัวของหม้อแปลงที่ 0-100% แล้วทำการบันทึกค่าความสูญเสีย อุณหภูมิของน้ำมันด้านบน แล้วทำการหาค่าความสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อนเทียบกับอุณหภูมิ ผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้อ้างอิงในการออกแบบพื้นที่ผิวการระบายความร้อนเพื่อให้หม้อแปลงมีการระบายความร้อนที่ดี มีอุณหภูมิเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

Thesis Title	Analysis of Losses Per Cooling Surface Area of Transformer
Student Name	Mr. Kiangkai Kitsawat
Student ID	6344010004
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Academic Year	2021
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Boonlert Suechoey

Abstract

This thesis presents the results of the loss analysis on the cooling surface area of the transformer. To use the information as a reference in the design of transformers to meet the temperature requirements. The transformer used in distribution system 160 kVA 3 ph 50 Hz 22000-416/240 V Dyn 11 was tested according to the Provincial Electricity Authority standard. The test is performed by supplying the load to the transformer at 0-100% and recording the losses. Top oil temperature then, The loss per cooling surface area compared to the temperature was determined. The results of this research can be used as a reference for the design of the cooling surface area for the transformer to have good heat dissipation. The temperature is in accordance with the specified standards.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือ ทั้งในด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.บุญเลิศ สือเฉย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณามอบหมายงานวิจัยอันเป็นประโยชน์ ได้อุทิศความรู้ ความสามารถ ให้คำปรึกษาแนะนำ และให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา

บริษัท พงษ์พิมาณการไฟฟ้า จำกัด และบริษัท ที.ดี.ทรานสฟอร์เมอร์ จำกัด ที่ได้สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์เครื่องมือและสถานที่ในการทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

คณาจารย์ประจำหลักสูตรบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ทุกท่านที่ให้ความรู้จากการเข้าเรียนในรายวิชาบัณฑิตศึกษา ถ่ายทอดประสบการณ์อันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

เพื่อน พี่ น้อง หลักสูตรบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ที่ให้คำแนะนำและกำลังใจตลอดเวลาที่ผู้วิจัยได้ศึกษาอยู่ที่มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์แห่งนี้

นายเกรียงไกร กิจสวัสดิ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
 บทที่ 1 บทนำ.....	 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 สมมุติฐานการวิจัย.....	1
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ระเบียบวิธีวิจัย.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
 บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	 3
2.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	3
2.2 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	4
2.3 ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	5
2.4 น้ำมันหม้อแปลง.....	17
2.5 การระบายความร้อนของหม้อแปลง.....	21
2.6 การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า	25
2.7 การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้า.....	25
2.8 การตรวจวัดทางไฟฟ้า.....	25
2.9 ` การตรวจวัดทางน้ำมัน.....	30
2.10 ตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ (FRA).....	34
2.11 หลักในการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่.....	35
2.12 เทคนิคในการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่.....	35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.13 ตัวอย่างการเชื่อมต่อ.....	38
2.14 การวินิจฉัยความผิดปกติ.....	40
2.15 การเปรียบเทียบ.....	41
2.16 กรณีศึกษา.....	42
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	45
3.1 ขั้นตอนการทดสอบ.....	45
3.2 การคำนวณอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลง.....	47
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	48
4.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	48
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	52
5.1 สรุป.....	52
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	52
เอกสารอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก ก หลักเกณฑ์การตรวจประเมินรายผลิตภัณฑ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระบบจำหน่าย.....	54
ภาคผนวก ข บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	95
ประวัติผู้เขียน.....	105

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	โอกาสการเกิดก๊าซภายในหม้อแปลง.....19
2.2	แสดงชนิดการเกิดฟอลท์.....21
2.3	ค่า PI ในการพิจารณาสภาพของหม้อแปลงฟ้า.....26
2.4	ระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ.....27
2.5	ค่าสภาพของฉนวน (%PF) ที่ 20 องศาเซลเซียส.....27
2.6	ค่ากระแสกระตุ้นวงจรด้านแรงสูง.....28
2.7	ระดับค่าความต้านทานฉนวนแกนเหล็ก.....29
2.8	ค่าแรงดันเบรกดาว์น.....30
2.9	ขีดจำกัดของก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงส่วนในล้านส่วน (ppm).....32
2.10	ค่าการตรวจวัดความชื้น.....33
2.11	ค่าการเสื่อมสภาพของฉนวนที่เป็นของแข็ง.....33
2.12	เกณฑ์ในการพิจารณาแรงดึงผิวของน้ำมัน.....34
2.13	เกณฑ์ในการพิจารณาหาสิ่งเจือปนในน้ำมัน.....34
2.14	ระดับความถี่ที่ใช้พิจารณาความผิดปกติ.....42
3.1	อุณหภูมิอ้างอิงของการปรับผลการทดสอบ.....45
3.2	ขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงชนิดจุ่มน้ำมัน.....46
3.3	ขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน PEA.....46
4.1	ผลการทดสอบอุณหภูมิที่พิกัดโหลด.....48
4.2	ผลการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด.....48
4.3	ผลการทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลงขณะจ่ายโหลด 0-100% ของพิกัดโหลด.....50

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การเกิดเส้นแรงแม่เหล็กของหม้อแปลง.....	4
2.2 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสของขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ.....	5
2.3 เวกเตอร์ของหม้อแปลงขณะมีโหลด.....	5
2.4 แกนเหล็กแบบคอร์.....	6
2.5 แกนเหล็กแบบเชลล์.....	6
2.6 แกนเหล็กแบบตัว H.....	7
2.7 หม้อแปลง 1 เฟส.....	7
2.8 หม้อแปลง 3 เฟส.....	8
2.9 หม้อแปลงขนาดเล็ก.....	9
2.10 หม้อแปลงขนาดกลาง.....	9
2.11 หม้อแปลงกำลัง.....	10
2.12 หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า.....	10
2.13 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า.....	11
2.14 แวรีแอก.....	12
2.15 หม้อแปลงแบบมีถังพักน้ำมัน.....	12
2.16 สภาพของการใช้งานหม้อแปลงแบบมีถังพัก.....	13
2.17 หม้อแปลงแบบปิดผนึก.....	14
2.18 สภาพการใช้งานหม้อแปลงชนิดจุ่มน้ำมันแบบปิดผนึก.....	14
2.19 หม้อแปลงชนิดจุ่มน้ำมันแบบปิดผนึก และบรรจุไนโตรเจน.....	15
2.20 สภาพใช้งานของหม้อแปลงชนิดจุ่มน้ำมันแบบปิดผนึกและบรรจุไนโตรเจน.....	15
2.21 หม้อแปลงชนิดแห้งแบบหล่อเรซิน.....	16
2.22 หม้อแปลงชนิดแห้งแรงดันต่ำ.....	16
2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและก๊าซที่เกิดขึ้น.....	20
2.24 วงจรวัดค่าความต้านทานฉนวน.....	26
2.25 วงจรวัดค่าสภาพของฉนวน (%PF).....	27
2.26 วงจรการวัดค่าความต้านทานของขดลวด.....	28
2.27 วงจรการวัดค่าอัตราส่วนของขดลวด.....	30
2.28 การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยวิธีการวัดความถี่กับหม้อแปลงไฟฟ้า.....	36
2.29 การแบ่งย่านความถี่ต่างๆในการตรวจวัด.....	38

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.30 การเชื่อมต่อแบบ End - to - End Open หรือ Open Circuit Self Admittance (OC).....	39
2.31 การเชื่อมต่อแบบ End - to - End Short – Circuit หรือ Short Circuit Self Admittance (SC).....	39
2.32 การเชื่อมต่อแบบ Capacitive Inter – Winding (CIW) หรือ Inter – Winding (IW).....	40
2.33 การเชื่อมต่อแบบ Inductive Inter – Winding (IIW) หรือ Transfer Admittance (TA).....	40
2.34 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงก่อนและหลังการเกิดการลัดวงจร.....	42
2.35 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงก่อนการบำรุงรักษา.....	42
2.36 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงหลังการบำรุงรักษา.....	43
2.37 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงก่อนและหลังการเกิดความผิดปกติของ หม้อแปลงไฟฟ้า.....	44
3.1 วงจรการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงโดยวิธีลัดวงจร.....	46
4.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด.....	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าในวงจรหนึ่งให้เป็นพลังงานไฟฟ้าที่มีความถี่เท่ากันในอีกวงจรหนึ่ง ซึ่งจะแปลงด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ นอกจากนี้หม้อแปลงไฟฟ้ายังสามารถทำหน้าที่ในการเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าภายในวงจร แต่ไม่สามารถเพิ่มหรือลดกำลังไฟฟ้าและความถี่ได้ โดยหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำงานบนหลักการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับถูกนำไปใช้กับขดลวดปฐมภูมิ แรงดันไฟฟ้าจะถูกเหนี่ยวนำไปยังขดลวดทุติยภูมิส่งผลให้มีกระแสไฟฟ้าออกมาให้ใช้งานได้ โดยการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการหมุนของขดลวดทั้งสองนี้

ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าจึงนับเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าที่ดีจะต้องมีเสถียรภาพและความปลอดภัยสูง ดังนั้นถ้าผู้ผลิตสามารถออกแบบและผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีคุณสมบัติที่ดีทนต่อสภาวะการใช้งานตามมาตรฐานที่กำหนด ก็จะสามารถช่วยให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพและเกิดความมั่นคงต่อระบบไฟฟ้ามากขึ้น ประกอบกับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ทำการปรับปรุงแก้ไขคุณสมบัติ (Specification) ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่าย ให้สามารถทนกระแสลัดวงจรได้ตามที่มาตรฐานกำหนด

งานวิจัยนี้ จึงนำเสนอผลการทดสอบและวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อนขณะจ่ายโหลด เพื่อนำผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการออกแบบพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของหม้อแปลง ปรับปรุงและพัฒนาการออกแบบให้หม้อแปลงใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 นำเสนอวิธีการทดสอบและแสดงผลการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่ายตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคขณะจ่ายโหลดที่พิกัด

1.2.2 ทำการคำนวณหาค่าความสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อน เพื่อให้ได้อุณหภูมิเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

1.2.3 นำผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ ไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการออกแบบพื้นที่ผิวระบายความร้อนของหม้อแปลง ปรับปรุงและพัฒนาการออกแบบให้หม้อแปลงใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.3 สมมติฐานการวิจัย

การใช้โหลดกระแสไฟฟ้าเต็มพิกัดของหม้อแปลง ควรคำนึงถึงประสิทธิภาพการจ่ายโหลดของหม้อแปลง

1.3.1 ความร้อนเกินพิกัดตามที่มาตรฐานกำหนด ส่งผลให้อายุการใช้งานของฉนวนของหม้อแปลงสั้นลง

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 หม้อแปลงที่นำมาทำการทดสอบ เป็นหม้อแปลงชนิดจุ่มในน้ำมันที่ใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคขนาด 160 kVA 3ph 50Hz 22000-416/240V Dyn 11 Class A เป็นขดลวดชนิดทองแดง

1.4.2 การทดสอบจะทำการป้อนแรงดันด้านแรงสูงให้มีกระแสไหลตั้งแต่ 0-100% ของกระแสที่พิกัด

1.5 ระเบียบวิธีวิจัย

ใช้วิธีการทดสอบ คำนวนและวิเคราะห์ผลอุณหภูมิของหม้อแปลงต่อพื้นที่ผิวขณะจ่ายโหลด โดยผลของการวิเคราะห์ตามตัวอย่างข้างต้นจะเป็นเครื่องมือช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถวิเคราะห์ออกแบบ และตัดสินใจเลือกใช้พื้นที่ผิวระบายความร้อนต่อค่าความสูญเสียของหม้อแปลง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้ทำการศึกษาค้นคว้าการทดสอบและแสดงผลการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่ายตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคขณะจ่ายโหลดที่พิกัด

1.6.2 ได้ศึกษาการคำนวณหาค่าความสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อน เพื่อให้ได้อุณหภูมิเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

1.6.3 ได้นำผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ ไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการออกแบบพื้นที่ผิวระบายความร้อนของหม้อแปลง เพื่อปรับปรุงและพัฒนาการออกแบบให้หม้อแปลงใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ แกนเหล็ก ขดลวดตัวนำ และฉนวน อาจจะมีส่วนประกอบย่อยอื่นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดพิกัดของหม้อแปลง เช่น หม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า มีถังบรรจุหม้อแปลง น้ำมันหม้อแปลง ระบายความร้อน ขั้วแรงดันด้านสูง ขั้วแรงดันด้านต่ำ และอื่นๆ เป็นต้น

2.1.1 แกนเหล็ก (Core)

มีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กบางๆ เคลือบด้วยฉนวนนำมาอัดซ้อนกันเป็นรูปแกนของหม้อแปลง ทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก แกนเหล็กที่ดีต้องเป็นเหล็กอ่อนมีส่วนผสมของสารซิลิกอน มีความซึมซับได้ (Permeability) สูง การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss) ต่ำ มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้ในการเหนี่ยวนำสูงถึง 1.35-1.55 เวเบอร์ต่อตารางเมตร เป็นเหล็กประเภทเกรนโอเรียนเตด (Grain oriented steel) ฉนวนที่นำมาฉาบแผ่นเหล็กทั้งสองด้าน มีค่าความเป็นฉนวนตามผิวสูง เพื่อป้องกันการสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวน (Eddy Current) ซึ่งจะเป็นสารจำพวกวานิช (Varnish)

2.1.2 ขดลวด (Winding)

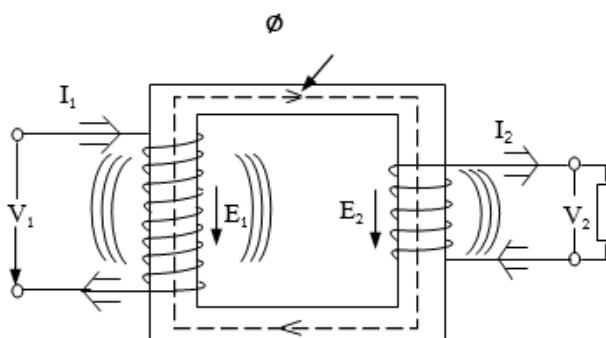
ขดลวดที่ใช้พันหม้อแปลงมีลักษณะเป็นขดลวดทองแดง หรือขดลวดอลูมิเนียมที่หุ้มหรือเคลือบด้วยฉนวน อาจจะเป็นได้ทั้งลวดแบนที่มีพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือลวดกลมก็ได้ หม้อแปลงไฟฟ้ามีขดลวด 2 ชุด คือ ขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding) และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding) โดยขดลวดปฐมภูมิจะเป็นชุดที่รับไฟเข้า ส่วนขดลวดทุติยภูมิเป็นชุดที่จ่ายไฟออกไปใช้งาน

2.1.3 ฉนวน (Insulation)

ฉนวนมีไว้เพื่อป้องกันไม่ให้ขดลวดสัมผัสกับส่วนที่เป็นแกนเหล็ก และป้องกันไม่ให้ขดลวดแต่ละชั้นสัมผัสกันได้ (Short turn) สำหรับลวดตัวนำที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.2-1.3 มิลลิเมตร หากต้องการให้ฉนวนมีคุณภาพดีและทนความร้อนได้มากจะต้องเคลือบด้วยไวนิเฟลกซ์ (Viniflex) หรือพันทับด้วยไหมแคปรอน (Caprone) เทเรไลน์ (Terephthalic acid) หรือฝ้าย และถ้าลวดตัวนำมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 1.3-4.1 มิลลิเมตร จะพันด้วยกระดาษเคเบิล (Cable paper) หลายชั้น ส่วนตัวนำที่มีพื้นที่หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยม จะพันทับด้วยฉนวนไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) สำหรับฉนวนที่คั่นระหว่างชั้นของขดลวดส่วนมากจะเป็นกระดาษเคเบิลหนาประมาณ 0.2 มิลลิเมตร และจำนวนชั้นของกระดาษจะขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังของหม้อแปลง

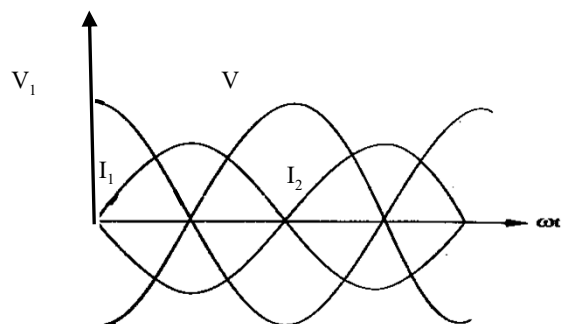
2.2 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดปฐมภูมิ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นที่ขดปฐมภูมิ มีลักษณะของการพุ่งตัวและยุบตัวของสนามแม่เหล็กตามการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นไซน์ทั้งซีกบวกและซีกลบเป็นเช่นนี้ตลอดไป และสนามแม่เหล็กที่พุ่งตัวและยุบตัวนี้ จะตัดกับขดลวดปฐมภูมิทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดปฐมภูมิซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดปฐมภูมินั้น และเรียกแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ว่า แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (Back e.m.f) ส่วนกระแสที่ไหลในขดลวดปฐมภูมิขณะไม่มีโหลดเรียกว่า กระแสกระตุ้น (Excited current) เนื่องจากขดลวดทุติยภูมิพันอยู่บนแกนเหล็กเดียวกันกับขดลวดปฐมภูมิ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดปฐมภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาจะตัดกับขดลวดทุติยภูมิ ดังนั้นจึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดทุติยภูมิ ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของจำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิกับขดลวดปฐมภูมิ และเมื่อต่อโหลดเข้ากับทางด้านทุติยภูมิจะทำให้มีกระแสไหล เพราะหม้อแปลงเป็นอินดักทีฟ กระแสไฟฟ้าที่ขดทุติยภูมิจะล่าหลังแรงดันไฟฟ้าของขดทุติยภูมิ 90 องศา เมื่อแรงดันที่ขดทุติยภูมิล่าหลังกระแสที่ขดปฐมภูมิอยู่ 90 องศา กระแสที่ขดทุติยภูมิจะต่างเฟสกับกระแสที่ไหลในขดปฐมภูมิ 180 องศา

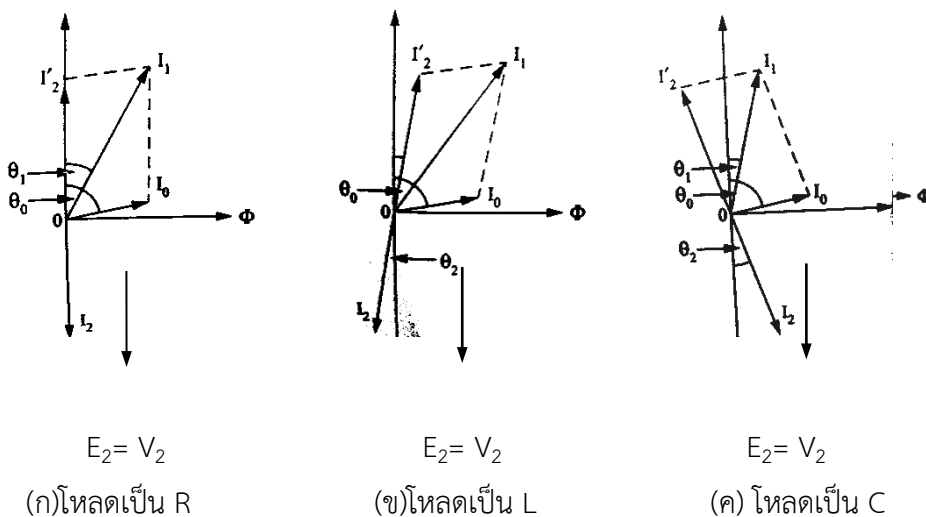


ภาพที่ 2.1 การเกิดเส้นแรงแม่เหล็กของหม้อแปลง

กระแสของขดทุติยภูมิจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าต้านกลับขึ้นในขดทุติยภูมิ แรงดันไฟฟ้าต้านกลับนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าต้านกลับของขดปฐมภูมิ และทำให้แรงดันไฟฟ้าต้านกลับของขดทุติยภูมิอ่อนกำลังลง และทำให้กระแสที่ไหลในขดปฐมภูมิมากกว่า กระแสขณะไม่มีโหลด ในขณะที่กระแสขดทุติยภูมิเพิ่มขึ้นกระแสในขดปฐมภูมิก็จะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนกัน



ภาพที่ 2.2 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสของขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ



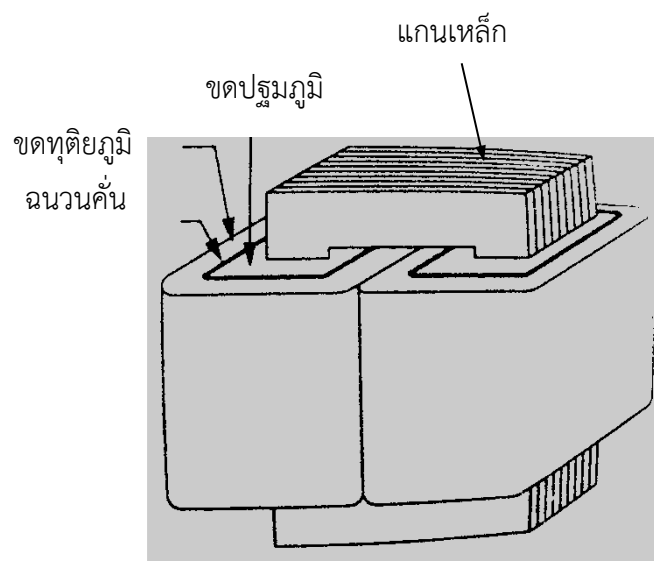
ภาพที่ 2.3 เวกเตอร์ของหม้อแปลงขณะมีโหลด

2.3 ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า

ชนิดของหม้อแปลงสามารถจำแนกตามประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

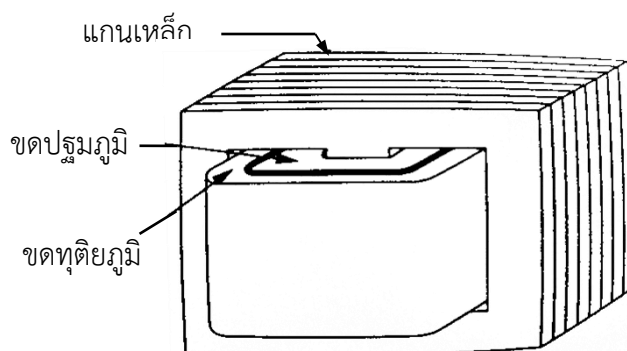
2.3.1 จำแนกตามลักษณะของแกนเหล็ก

1. แกนเหล็กแบบคอร์ (Core Type) เป็นแกนเหล็กแผ่นบางๆ มีลักษณะเป็นรูปตัว L สองตัวประกบเข้าหากัน หรือเป็นรูปตัว U กับตัว I นำมาประกอบเข้าด้วยกัน มีวงจรแม่เหล็กเป็นแบบวงจรเดียวหรือวงจรอนุกรม ซึ่งมีขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิพันอยู่บนแกนเหล็กทั้งสองด้านแยกกันอยู่คนละข้าง



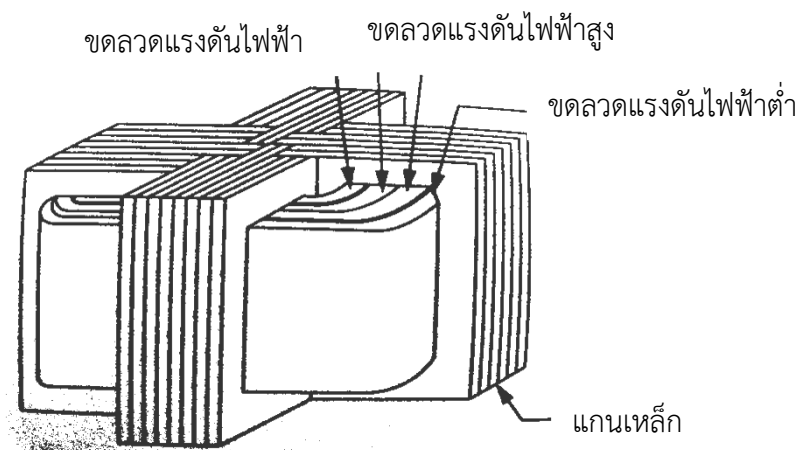
ภาพที่ 2.4 แกนเหล็กแบบคอร์

2. แกนเหล็กแบบเชลล์ (Shell Type) แกนเหล็กแบบนี้มีลักษณะเป็นรูปตัว E กับ I เมื่อประกอบเข้าด้วยกันจะมีวงจรแม่เหล็ก 2 วง หรือ วงจรแม่เหล็กแบบขนาน ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิจะพันอยู่ที่ขากลางของแกนเหล็ก



ภาพที่ 2.5 แกนเหล็กแบบเชลล์

3. แกนเหล็กแบบตัว H หรือแบบกระจาย เป็นการรวมกันระหว่างแกนเหล็กแบบคอร์กับแบบเชลล์หรือรวมตัว L เข้ากับตัว EI มีวงจรแม่เหล็กล้อมรอบขดลวดหม้อแปลง ขดลวดแรงดันสูงจะพันไว้ระหว่างขดลวดแรงดันต่ำทั้งสองชุด และระหว่างขดลวดแต่ละชุดจะพันด้วยฉนวนไฟฟ้า การพันขดลวดหม้อแปลงแบบนี้จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลน้อยที่สุด



ภาพที่ 2.6 แกนเหล็กแบบตัว H

2.3.2 จำแนกตามระบบไฟฟ้า

1. หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว (Single Phase Transformer) เป็นหม้อแปลงที่ใช้กับระบบไฟฟ้า 1 เฟส มีขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิอย่างละหนึ่งชุด



ภาพที่ 2.7 หม้อแปลง 1 เฟส

2. หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส (Three Phase Transformer) เป็นหม้อแปลงที่ใช้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส มีขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิอย่างละ 3 ชุด ต่อเข้าด้วยกันเป็นแบบวาย (Wye) หรือแบบเดลตา (Delta)



ภาพที่ 2.8 หม้อแปลง 3 เฟส

2.3.3 จำแนกตามฟลักซ์ของแรงดันไฟฟ้าเข้าและออก

1. หม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่ม (Step up Transformer) เป็นหม้อแปลงที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าออกมากกว่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าหม้อแปลง เช่น หม้อแปลงที่ใช้ในระบบส่งไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต โดยใช้ปรับระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดในโรงไฟฟ้า ซึ่งปกติจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าประมาณ 20 กิโลโวลต์ ให้สูงขึ้นเป็น 69,115,230 และ 500 กิโลโวลต์ ส่งไปตามสายส่งไฟฟ้าแรงสูง หรืออาจจะมีหม้อแปลงมากกว่า หนึ่งตัวใช้ยกระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นเป็นช่วงๆก็ได้ นอกจากนี้หม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มยังใช้กับหลอดนีออนที่ทำเป็นรูปอักษรหรือตกแต่งเป็นรูปต่างๆ

2. หม้อแปลงไฟฟ้าลด (Step down Transformer) หม้อแปลงชนิดนี้จะจ่ายแรงดันด้านออกน้อยกว่าแรงดันด้านเข้า เช่น หม้อแปลงขนาดเล็กที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดร้านขายอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ หม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งหม้อแปลงของการไฟฟ้านครหลวงมีแรงดันไฟฟ้าด้านสูง 11,22 และ 33 กิโลโวลต์ และแรงดันไฟฟ้าด้านต่ำในระบบ 3 เฟส 400/230 โวลต์ และระบบ 1 เฟส 460/230 โวลต์ ส่วนหม้อแปลงของการไฟฟ้านครหลวงใช้กับแรงดันไฟฟ้าด้านสูง 12,24 กิโลโวลต์ และแรงดันไฟฟ้าด้านต่ำในระบบ 3 เฟส 416/240 โวลต์ และระบบ 1 เฟส 480/240 โวลต์

3. หม้อแปลงไอโซเลตติ้ง (Isolating Transformer) หม้อแปลงชนิดนี้จะจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้านนอกเท่ากับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า เช่น หม้อแปลงที่ใช้กับโต๊ะทดลองของห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิแยกออกจากกัน เมื่อเกิดข้อบกพร่องในการทดลองหรือเกิดการลัดวงจร จะเกิดความเสี่ยงน้อยกว่าเมื่อไม่มีหม้อแปลง สาเหตุมาจากการยุบตัวของเส้นแรงแม่เหล็กทำให้ไม่เกิดการอาร์กที่รุนแรง นับเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกันระบบไฟฟ้าชนิดหนึ่ง และยังใช้กับเครื่องจักรที่นำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งใช้กับแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ โดยการแปลงไฟจาก 380 โวลต์ 3 เฟส 3 สาย ให้เป็น 380/220 โวลต์ 3 เฟส 4 สาย

2.3.4 จำแนกตามพิกัดขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า

1. หม้อแปลงขนาดเล็ก มีพิกัด 1000 โวลต์ –แอมป์ลงมา เป็นหม้อแปลงที่นำมาใช้กับภาคจ่ายไฟของเครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังรวมถึงหม้อแปลงขนาดเล็กที่ใช้ในการเชื่อมโยงสัญญาณของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วย



ภาพที่ 2.9 หม้อแปลงขนาดเล็ก

2. หม้อแปลงขนาดกลาง มีพิกัด 1-1000 กิโลโวลต์-แอมป์ ส่วนใหญ่จะใช้กับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวง ใช้กับโรงงาน โรงพยาบาล สำนักงาน อาคารสูงและที่พักอาศัย



ภาพที่ 2.10 หม้อแปลงขนาดกลาง

3. หม้อแปลงกำลัง มีขนาดตั้งแต่ 1000 โวลต์-แอมป์ขึ้นไป เป็นหม้อแปลงที่มีใช้งานกับระบบส่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ใช้กับสถานีไฟฟ้าแรงสูง การผลิตและการส่งจ่ายไฟฟ้า



ภาพที่ 2.11 หม้อแปลงกำลัง

2.3.5 จำแนกตามการใช้งานของเครื่องมือวัด

เป็นหม้อแปลงที่ใช้สำหรับเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า เช่น เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า หรือ กิโลวัตต์-ฮาวมิเตอร์ เพื่อวัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าแต่ละเดือน ซึ่งการวัดโดยตรงของแรงดันหรือ กระแสสูงๆ ทำให้ต้องใช้เครื่องมือวัดขนาดใหญ่ซึ่งมีราคาแพง หม้อแปลงเครื่องมือวัดจะมีขนาดเล็ก และราคาไม่แพง ถูกออกแบบให้มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับเครื่องมือวัด มีความปลอดภัยและ เที่ยงตรงสูง มี 2 ชนิดด้วยกัน

1. หม้อแปลงแรงดัน (Potential Transformer) เป็นหม้อแปลงแรงดันขนาดเล็กใช้แปลงแรงดันไฟฟ้าสูงๆ เป็นแรงดันไฟฟ้าต่ำๆ ใช้กับโวลต์มิเตอร์ วัตต์มิเตอร์ และกิโลวัตต์ฮาว มิเตอร์ พิกัดกำลังเอาต์พุตจะบอกเป็นโวลต์-แอมป์(VA) ส่วนพิกัดแรงดันจะบอกแรงดันไฟฟ้าของ ขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ เช่น 1500/100 โวลต์ , 4800/120 โวลต์ , 22000/220 โวลต์ เป็นต้น



ภาพที่ 2.12 หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า

2. หม้อแปลงกระแส (Current Transformer) เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานสำหรับลดกระแสสูงๆ ที่ไหลในสายไฟฟ้าให้มีค่าลดต่ำลง เพื่อนำไปต่อเข้ากับแอมมิเตอร์ วัดคีมิตอร์ และกิโลวัตต์-ฮาวมิเตอร์เช่นเดียวกัน ขนาดกำลังเอาต์พุตจะบอกเป็นโวลต์-แอมป์ (VA) พิกัดกระแสบอกเป็นอัตราส่วน เช่น 100/5 , 200/5, 300/5 เป็นต้น



ภาพที่ 2.13 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

2.3.6 จำแนกตามลักษณะของการพันขดลวด

1. หม้อแปลงแบบแยกขดลวด ซึ่งขดลวดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิที่พันอยู่บนแกนเหล็กทั้งสองชุดแยกออกจากกัน โดยไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดของขดลวดต่อถึงกัน เป็นหม้อแปลงที่มีใช้งานโดยทั่วไป

2. หม้อแปลงแบบใช้ขดลวดชุดเดียวร่วมกัน หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า หม้อแปลงออโต (Auto Transformer) หม้อแปลงแบบนี้มีขดลวดเป็นชุดเดียวที่ทำหน้าที่เป็นทั้งขดปฐมภูมิ และ ขดทุติยภูมิ จึงทำให้ประหยัดลวดทองแดง และมีราคาถูกกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบขดลวด 2 ชุด อัตราส่วนของหม้อแปลงแบบออโตจะต่ำ ซึ่งส่วนมากแล้วจะไม่เกินกว่า 4 : 1 สามารถแปลงแรงดันได้ทั้งลดลงและเพิ่มขึ้น ส่วนมากจะนำไปใช้เพื่อชดเชยแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมของสายเคเบิลที่จ่ายไปยังโหลด ใช้เป็นอุปกรณ์สตาร์ทของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ใช้กับหม้อแปลงของเตาหลอมโลหะ(Furnace Transformer) และใช้เป็นหม้อแปลงกำลังในสถานีไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต

2.3.7 จำแนกตามลักษณะการปรับแรงดันไฟฟ้า

1. หม้อแปลงแบบมีแทปแยก ซึ่งลักษณะของแทปแยกจะอยู่ทางด้านขดทุติยภูมิ มีให้เลือกใช้งานตามความต้องการ เช่น 6,12,24,48 โวลต์ หรืออาจจะเป็นแบบมีแทปศูนย์อยู่ตรงกลาง เช่น 36-0-36โวลต์ และ 48-0-48 โวลต์ เป็นต้น ส่วนมากจะนำไปใช้งานกับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดเล็ก เครื่องขยายเสียง

2. หม้อแปลงแบบปรับค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเนื่อง ซึ่งเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโตชนิดหนึ่ง เรียกว่า แวรีแอก หรือ สไลด์ เรกกูเลเตอร์ (Slide regulator) ขดลวดจะพันอยู่รอบๆ แกนทอรอยด์ (Toroid) ที่ด้านบนของขดลวดจะถูกกดให้แบนเพื่อให้แรงดันสัมพันธ์กับขดลวดได้ดี



ภาพที่ 2.14 แวรีแอก

2.3.8 จำแนกตามการผลิตของโรงงาน

1. หม้อแปลงชนิดจุ่มน้ำมันแบบมีถังพัก (Conservator Type) เป็นหม้อแปลงแบบถังเปิด (Open Type) คือมีช่องทางให้อากาศถ่ายเทเข้าและออกจากตัวถังได้ตามกระแสเพิ่ม-ลด ของปริมาตรน้ำมันจากความร้อนของการใช้งาน ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดความดันสูงในตัวถัง โดยหม้อแปลงจะมีช่องในการระบายอากาศ หม้อแปลงระบบถังเปิดได้รับการปรับปรุงพัฒนาเรื่อยมา จนกระทั่งกลายมาเป็นแบบที่มีถังน้ำมันสำรองขนาดเล็กอยู่บนตัวถังหลัก และติดตั้งสารดูดความชื้นเพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นจากภายนอกเข้ามาทำปฏิกิริยากับน้ำมันหม้อแปลงที่จะเป็นอันตรายต่อหม้อแปลงได้



ภาพที่ 2.15 หม้อแปลงแบบมีถังพักน้ำมัน

จากภาพที่ 2.15 น้ำมันจะเติมเต็มในถังหม้อแปลงหลักและล้นมาถึงถังสำรอง โดยระดับน้ำมันจะอยู่ประมาณไม่เกินครึ่งหนึ่งของถังสำรองและเมื่อหม้อแปลงจ่ายกระแสเพื่อใช้งาน ขดลวดจะร้อนทำให้น้ำมันร้อนและขยายปริมาตรเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โดยน้ำมันจะเพิ่มปริมาตรสูงสุดได้ประมาณ 7 % ของน้ำมันทั้งหมดที่อยู่ในหม้อแปลง เมื่อระดับน้ำมันเพิ่มขึ้นอากาศเหนือระดับน้ำมันที่อยู่ในถังสำรองจะถูกดันออกสู่บรรยากาศภายนอกและเมื่อหม้อแปลงเย็นตัวลง น้ำมันจะลดปริมาตรลงทำให้ระดับของน้ำมันลดลงด้วย อากาศภายนอกจึงถูกดูดเข้ามาในถังสำรองเพื่อปรับสมดุลของความดัน การที่หม้อแปลงมี อุณหภูมิลดลงอาจเกิดจากการลดการจ่ายกระแสโหลด หรือการที่อุณหภูมิแวดล้อมลดลง หรือที่สำคัญคือ การที่หม้อแปลงได้รับความเย็นจากน้ำฝนนั่นเอง ขณะที่อากาศถูกดูดเข้าไปจะเอาความชื้น หรือน้ำเข้าไปด้วย จึงต้องมีการติดตั้งชุดหม้อกรองอากาศใส่สารดูดความชื้น (Silicagel) เพื่อดูดซับความชื้นจากภายนอกไม่ให้เข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำมันหม้อแปลงได้ระดับหนึ่ง

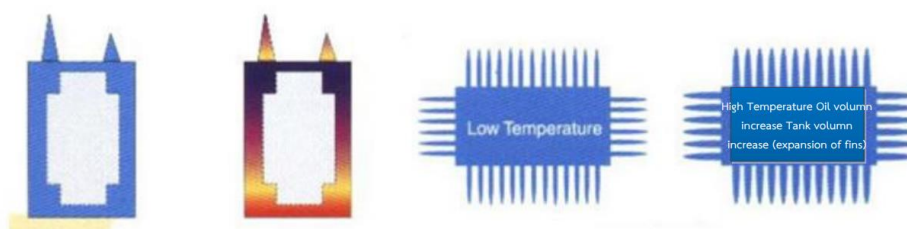


ภาพที่ 2.16 สภาพของการใช้งานหม้อแปลงแบบมีถังพัก

2. หม้อแปลงชนิดจุ่มน้ำมันแบบปิดผนึก (Hermetically Sealed Fully Oil Filled) หม้อแปลงชนิดนี้จะป้องกันความชื้นและออกซิเจนได้ 100 % ไม่มีถังพักน้ำมันสำรอง น้ำมันของหม้อแปลงจะเติมเต็มถึงปิดผนึกอย่างดีไม่ให้อากาศจากภายนอกเข้าได้ น้ำมันจะช่วยในการระบายความร้อนให้กับ Bushing และประกันบริเวณฝาถังได้ เมื่อหม้อแปลงจ่ายกระแสให้กับ โหลดความร้อนในหม้อแปลงจะเพิ่มขึ้น ปริมาตรของน้ำมันจะเพิ่มขึ้นตาม ครีบริบายความร้อนแบบ ลูกฟูก (Corrugated) จะเกิดการพองตัวทำให้รักษาระดับของความดันในตัวถังมีค่าเท่าเดิม และเมื่อน้ำมันลดปริมาตรลงครีบลูกฟูกก็จะหุบตัวลง เรียกตัวถังแบบนี้ว่า ตัวถังแบบยืดหยุ่น (Elastic Tank) ดังนั้นการเพิ่มขึ้นและลดลงของปริมาตรภายในหม้อแปลงจึงไม่ต้องกังวลเรื่องความดันสูงที่จะเกิดกับตัวถังของหม้อแปลง



ภาพที่ 2.17 หม้อแปลงแบบปิดผนึก

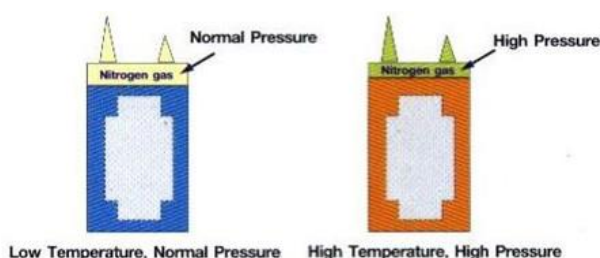


ภาพที่ 2.18 สภาพการใช้งานหม้อแปลงชนิดจุ่มน้ำมันแบบปิดผนึก

3. หม้อแปลงชนิดจุ่มน้ำมันแบบปิดผนึกและบรรจุก๊าซไนโตรเจน (N_2 Gas Sealed)
หม้อแปลงชนิดจุ่มน้ำมันแบบปิดผนึกและบรรจุก๊าซไนโตรเจน ตัวถังของหม้อแปลงจะออกแบบทำให้มีความสูงเพิ่มขึ้นและจะต้องเติมน้ำมันให้ท่วมชุดขดลวดและแทป แต่เติมไม่เต็มถัง โดยปล่อยให้มีส่วนว่างใต้ฝาถัง ซึ่งมีปริมาตรเพียงพอต่อการขยายตัวของน้ำมัน และที่ช่องว่างจะเติมด้วยก๊าซเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำมัน ส่วนใหญ่จะใช้ก๊าซไนโตรเจน ในขณะที่น้ำมันหม้อแปลงมีปริมาตรเพิ่มขึ้นและถึงแม้ว่าภายในถังมีช่องว่างอากาศไว้รองรับการขยายตัว แต่น้ำมันที่เพิ่มขึ้นจะไปอัดให้ปริมาตรของอากาศลดลง ทำให้เกิดความดันภายในตัวถังหม้อแปลง



ภาพที่ 2.19 หม้อแปลงชนิดจุ่มน้ำมันแบบปิดผนึก และบรรจุไนโตรเจน



ภาพที่ 2.20 สภาพใช้งานของหม้อแปลงชนิดจุ่มน้ำมันแบบปิดผนึกและบรรจุไนโตรเจน

ข้อดีของตัวถังหม้อแปลงชนิดนี้ คือ สามารถผลิตได้ง่าย เนื่องจากเป็นตัวถังแบบคงตัว ไม่ต้องการขยายตัวเหมือนแบบลูกฟูก และมีข้อเสีย คือ ตัวถังต้องรับความดันสูงกว่าหม้อแปลงชนิดอื่นๆ และอายุของประกันสั้น เนื่องจากไม่มีน้ำมันหล่อเย็นให้กับประกันบริเวณฝาถังและที่บูชชิง (Bushings) หม้อแปลงชนิดนี้ที่ฝาถังด้านบนมักนิยมติดอุปกรณ์วัดความดัน (Pressure Gauge) เพื่อให้ผู้ใช้งานมองเห็นค่าความดันจริง และเพื่อตรวจสอบสถานะของก๊าซไนโตรเจนว่ายังคงมีอยู่หรือถูกดันให้รั่วออกไปแล้ว

4. หม้อแปลงชนิดแห้งแบบหล่อเรซิน (Dry Type Cast Resin) เป็นหม้อแปลงที่มีความปลอดภัยมากที่สุด เหมาะสำหรับติดตั้งภายในอาคาร เนื่องจากสารเรซิน (Resin) และส่วนผสมที่ใช้หล่อหุ้มขดลวดหม้อแปลงมีคุณสมบัติคงทนต่อไฟไหม้ได้ดี หม้อแปลงชนิดนี้ขดลวดแรงดันสูงจะห่อหุ้มด้วยฉนวน Class F ซึ่งเป็นไฟเบอร์กลาสหล่อด้วยเรซิน มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุทุกส่วนใกล้เคียงกันมากที่สุด จะไม่มีโอกาสแตกร้าวอันเกิดจากการใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆ ส่วนไฟเบอร์กลาสที่หล่ออยู่ในเรซินมีคุณสมบัติทำให้ขดลวดคงทนต่อความเค้นเชิงกลได้ดี สำหรับขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงจะมีลักษณะเป็นทองแดงแผ่นบางหุ้มด้วยฉนวน Prepreg ขดลวดทองแดงแผ่นบางมีคุณสมบัติทนต่อกระแสกระชากและกระแสลัดวงจร เนื่องจากสามารถกระจายกระแสกลับที่วิ่งตามผิวได้ดีกว่า และสามารถรักษาสมดุลย์ของแรงที่เกิดจากขดลวดแรงดันสูง ทำให้แรงในแนวแกนจะถูกหักล้างให้เป็นศูนย์ตลอดเวลาแม้ในสภาวะลัดวงจร

ฉนวน Prepreg ที่ห่อหุ้มแผ่นทองแดงเป็นวัสดุที่คงทนและมีความยืดหยุ่นสูงสามารถรองรับการขยายตัวของขดลวดทองแดงจากการจ่ายกระแสสูงๆ และยังป้องกันความชื้นในอากาศได้ 100 % ขดลวดแรงดันต่ำจะถูกเคลือบผิวด้วยแผ่นเรซินในขั้นตอนสุดท้ายก่อนการอบความร้อนทำให้ขดลวดคงทนต่อแรงในแนวนรัศมี อันเกิดจากกระแสลัดวงจร ทำให้หม้อแปลงที่ผลิตมีคุณภาพสูง



ภาพที่ 2.21 หม้อแปลงชนิดแห้งแบบหล่อเรซิน

5. หม้อแปลงชนิดแห้งแรงดันต่ำ (Low Volt Dry Type) เป็นหม้อแปลงขนาดเล็ก ไม่ใหญ่มากนัก ใช้สำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้าให้กับเครื่องจักรเป็นการเฉพาะ เช่น แปลงไฟจาก 380 โวลต์ เป็น 220 โวลต์ หรือแปลงไฟ 380 โวลต์ 3 เฟส 3 สาย ให้เป็น 380 โวลต์ 3 เฟส 4 สาย นิยมติดตั้งในบริเวณพื้นที่ทำงานของเครื่องจักร เพราะเป็นการประหยัดและมีความปลอดภัย



ภาพที่ 2.22 หม้อแปลงชนิดแห้งแรงดันต่ำ

จะเห็นว่าโครงสร้างหลักการทำงาน และชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า นับเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่ต้องรู้และทำความเข้าใจอย่างลึกซึ้ง ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ต่อการนำไปใช้งาน การเลือกใช้หม้อแปลงได้อย่างถูกต้องมีความเหมาะสมกับสถานที่นั้นๆ และคำนึงถึงการบำรุงรักษาของหม้อแปลงแต่ละชนิดอย่างถูกวิธี เพื่อให้เกิดความปลอดภัย และสามารถใช้งานหม้อแปลงได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ คำนึงค่าต่อการลงทุนในการดำเนินกิจการต่างๆ ตลอดจนการช่วยกันอนุรักษ์พลังงาน และรักษาสสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบมาจากการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า

2.4 น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันหม้อแปลงมีหน้าที่หลักคือเป็นฉนวน และระบายความร้อนจากภายในหม้อแปลงออกสู่บรรยากาศภายนอก โดยฉนวนน้ำมันที่ดีจะต้องมีค่า Breakdown Voltage สูงตามมาตรฐานจะต้องมีค่าคุณสมบัติอื่นๆ ตามมาตรฐาน IEC 296 หรือ BS 148/1978 หรือ ASTM D 3487 น้ำมันที่ดีนอกจากจะระบายความร้อนได้ดีมีสภาพเป็นฉนวนแล้ว ต้องไม่รวมตัวกับความชื้นได้ง่ายไม่ทำปฏิกิริยากับอุปกรณ์ที่แช่อยู่จะต้องไม่เป็นกรด ต่าง กำมะถัน มีความหนืดต่ำ และตกตะกอนยาก

2.4.1 องค์ประกอบของน้ำมันหม้อแปลง

ส่วนประกอบส่วนใหญ่ในน้ำมันหม้อแปลงซึ่งจะมีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจน ธาตุทั้งสองนี้รวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีปริมาณมากกว่า 75%ขึ้นไปส่วนกำมะถัน ไนโตรเจน ออกซิเจน และธาตุอื่นๆ โดยจะอยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ละลายอยู่ในน้ำมันดิบ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงนั้นมีขนาดโมเลกุลตั้งแต่เล็กที่สุดคือ มีเทน ซึ่งมีอะตอมของคาร์บอนเพียง 1 ตัวไปจนถึงขนาดโมเลกุลที่ใหญ่โดยมีอะตอมของคาร์บอนถึง 80 ตัว สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลคือ

1. Normal Paraffins หรือที่เรียกกันทางศัพท์เคมีว่า N-Alkanes สารไฮโดรคาร์บอนประเภทนี้มีโครงสร้างเป็นอะตอมของคาร์บอนเรียงต่อกันเป็นเส้นยาวแต่ละตัวของคาร์บอนก็มีอะตอมไฮโดรเจนจับอยู่จนอิ่มตัวขนาดโมเลกุลของสารประเภทนี้ในน้ำมันดิบมีตั้งแต่ตัวที่ประกอบด้วย 1 อะตอม ของคาร์บอนไปจนถึงราว 42 อะตอม มีสูตรทางเคมีดังนี้ C_nH_{2n-2} มี n เป็นจำนวนอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุล

2. ISO Paraffins หรือที่เรียกกันทางศัพท์เคมีว่า ISO - Alkanes มีลักษณะของโครงสร้างเป็นอะตอมของคาร์บอนเรียงต่อกันโดยแยกสาขาออกด้านข้างด้วยแต่ละตัวของคาร์บอนก็มีอะตอมไฮโดรเจนจับอยู่จนอิ่มตัวดังนั้นก็จะมีสูตรทางเคมีเหมือนกับพวก Normal Paraffins คือ C_nH_{2n-2} พวก Paraffins ทั้งสองประเภทนี้มีอยู่มากในน้ำมันเชื้อเพลิงใส (Distillates)

3. Naphthenes หรือที่เรียกกันทางศัพท์เคมีว่า Cyclo - Alkanes มีลักษณะของโครงสร้างโดยประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนต่อเรียงตัวกันเป็นวงอาจจะเป็นวงละ 5 ตัว 6 ตัว หรือ 7 ตัวโดยมีตัวต่ออย่างข้างล่างซึ่งมีสูตรทางเคมีเป็น C_nH_{2n-2} โดยที่ n เป็นจำนวนอะตอมของคาร์บอน และมี Rn เป็นจำนวนของวงคาร์บอนที่มีอยู่ในโมเลกุล

4. Aromatics หรือที่เรียกกันทางศัพท์เคมีว่า Arenes เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างประกอบด้วย Benzenes Ring

5. Mixed Naphtheno - Aromatics เป็นไฮโดรคาร์บอนประเภทที่มีทั้ง Naphthenic Ring และ Aromatic Rings อยู่ในโมเลกุลเดียวกัน

2.4.2 การเกิดก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง

ถ้าน้ำมันและกระดาษฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าไปทำการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ จะทำให้เราทราบผลที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงเมื่อเราเก็บตัวอย่างของข้อมูลดังนี้

1. กระดาษฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าส่วนใหญ่ ใช้กระดาษชุบน้ำมันและกระดาษอัดแรงเนื่องจากขีดจำกัดของฉนวนประเภทนี้จะใช้กับอุณหภูมิได้ถึง 105 °C เนื่องจากกระดาษสามารถดูดซึมความชื้นได้ง่ายจากบรรยากาศ ฉะนั้นการฉนวนประเภทนี้ จะต้องปลอดจากความชื้น ในขณะที่ใช้งานน้ำมันหม้อแปลงทำหน้าที่เป็นฉนวนและระบายความร้อนโดยวนเวียนผ่านแกนเหล็ก และที่ขดลวดอุณหภูมิใช้งานอยู่ในช่วง -40 ถึง +50°C ออกซิเดชันอาจเกิดขึ้นในน้ำมันได้ ถ้าหากน้ำมันสัมผัสกับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะเป็นผลให้เกิดหยดน้ำ กรด และตะกอน ก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกัดกร่อนฉนวนกระดาษและโลหะส่วนตะกอนที่เกิดขึ้น จะทำให้การระบายความร้อนของขดลวดลดลงอุณหภูมิของน้ำมัน จะสูงขึ้นจนแตกตัวออกเป็นไฮโดรเจนและก๊าซไฮโดรคาร์บอนซึ่งนำไปสู่การระเบิดของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ซึ่งปัญหาต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้วเราสามารถป้องกันและแก้ปัญหาได้โดยการตรวจวัดค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันเป็นระยะๆ และอาจต้องกรองน้ำมันเพื่อขจัดสิ่งเจือปนทั้งหลายที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ตามเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้วหรือต้องมีการสับเปลี่ยนสารดูดความชื้น (Silicagel) ตามวาระอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง

2. เกิดความร้อนสูงภายในกระดาษฉนวน เมื่อกระดาษฉนวนมีความร้อนเกิดขึ้นมากจากการวิเคราะห์ในเบื้องต้นแสดงให้เห็นถึงการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนที่อุณหภูมิประมาณ 140 องศาเซลเซียส จะเกิดการสะสมก๊าซภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนี้คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) น้ำ (H₂O)

3. เกิดความเสียหายกับกระดาษฉนวน เมื่อกระดาษฉนวนได้รับความร้อนจนเกิดความเสียหายเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส (สำหรับหม้อแปลงประเภทซิลต์) โดยการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์(CO) สูงกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) (หรือในบางครั้งอาจจะสูงกว่า 4 เท่าโดยเทียบกับค่ามาตรฐาน)

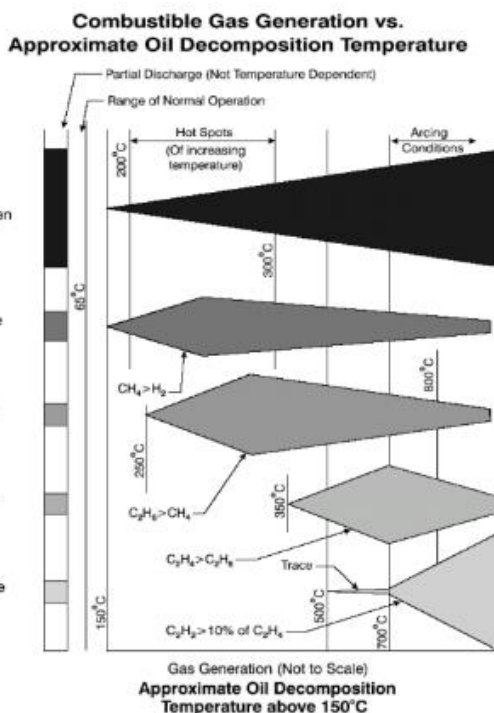
4. การเกิดความร้อนภายในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อฉนวนน้ำมันหม้อแปลงถูกทำให้มีความร้อนสูงเกิน 500 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนดังนี้ เอทิลีน (C₂H₄) อีเทน(C₂H₆) มีเทน (CH₄) และเมื่อความร้อนต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส จะเกิดสารประกอบของออกซิเจนดังนี้ คาร์บอนไดออกไซด์(CO₂)(400°C) น้ำ(H₂O)(200°C) ดังนั้น ก๊าซที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยทั่วไปมีอยู่ 7 ก๊าซ ได้แก่ ไฮโดรเจน(H₂), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂), คาร์บอนมอนนอกไซด์(CO), มีเทน(CH₄), อีเทน(C₂H₆), เอทิลีน(C₂ H₄), อะเซทิลีน(C₂ H₂) โดยที่ก๊าซแต่ละชนิดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดก๊าซจะไม่เท่ากันจะมีเพียง ไฮโดรเจน และอะเซทิลีน ที่มีอัตราเพิ่มมากขึ้นไปตามอุณหภูมิ ส่วนก๊าซที่เหลือจะเพิ่มตามอุณหภูมิไปจนถึง จุดหนึ่งแล้วกลับลดลงมา แม้อุณหภูมิสูงขึ้นไปอีกก็ตามแต่ด้วย การที่ไฮโดรเจนเกิดขึ้นตั้งแต่ อุณหภูมิไม่สูงนักและที่สำคัญคืออัตราการเกิดไม่ถูกกระทบด้วยผลของความร้อน

5. น้ำมันหม้อแปลงได้รับความร้อนสูงมาก ในกรณีที่ได้รับความเครียดทางไฟฟ้าสูงมากมี Hydrogen Gas สูงและมี Hydrocarbon Gas ต่ำ แสดงถึงเกิด Partial Discharge มี Hydrogen Gas สูงและมี Hydrocarbon Gas สูง ยกเว้น Acetylene Gas แสดงว่าเกิด Overheat ที่บริเวณจุดต่อถ้าจุดที่เกิดมีฉนวนกระดาษอยู่ด้วยก็จะพบ Carbon Dioxide Gas สูงด้วย สัดส่วนของปริมาณ Hydrocarbon Gas ต่างๆ ที่นำมาจับคู่เปรียบเทียบกับกันจะทำให้ทราบถึงอุณหภูมิที่จุดนั้นได้มีก๊าซ เช่นเดียวกับกรณีที่เกิด Overheat และพบ Acetylene ด้วยแสดงว่าเกิด Arcing ก๊าซ Carbon Dioxide และ Carbon Monoxide เกิดขึ้นจากการใช้งานปกติ ฉนวนประเภท Cellulose เสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นที่ลวดตัวนำขณะจ่าย Load เช่น อาร์ก จะทำให้เกิดก๊าซภายในน้ำมันหม้อแปลงซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 โอกาสการเกิดก๊าซภายในน้ำมันหม้อแปลง

ก๊าซ	เปอร์เซ็นต์ที่จะเกิด
ไฮโดรเจน(H ₂)	60.0 – 80.0%
อะซีทิลีน(C ₂ H ₂)	10.0 – 25.0%
มีเทน(CH ₄)	1.5 – 3.5%
อีเทน(C ₂ H ₆)	1.0 – 2.9%

จากตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ชนิดของก๊าซและปริมาณของก๊าซที่เกิดขึ้น จะพบว่า ปริมาณก๊าซของ H₂, CH₄ และ CO จะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยตามอายุของหม้อแปลงซึ่งถือว่าเป็นเรื่องปกติ การเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษมีสาเหตุมาจากความร้อนและทำให้เกิดก๊าซ CO, CO₂, H₂, CH₄ และ O₂ ซึ่งการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษจะเริ่มขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 100°C หรือน้อยกว่า ดังนั้นการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าที่อุณหภูมิไม่เกิน 90°C นั้นเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งพอลจะเป็นผลจากการเกิดจุดร้อนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงกว่านี้และเป็นผลให้เกิดก๊าซเจือปนน้ำมันหม้อแปลง



ภาพที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและก๊าซที่เกิดขึ้น

2.4.5 การตรวจวัดทางน้ำมัน

การวิเคราะห์ก๊าซ (Dissolved Gas Analysis) ที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงเป็นการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะวิกฤต เพื่อเฝ้าติดตามการทำงานทางกลและทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งเป็นวิธีการที่มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวินิจฉัยความผิดปกติและปัญหาที่เกิดจากการใช้งานกับหม้อแปลงไฟฟ้าและตัวเปลี่ยนแท๊ป หรืออุปกรณ์ชนิดฉนวนน้ำมันถูกใช้งานภายใต้สภาวะความร้อนและความเครียดทางสนามไฟฟ้าสูงๆ อาจจะมีโอกาสทำให้เกิดความผิดปกติขึ้นได้ ในที่สุดความผิดปกติอาจจำแนกได้ 3 ประเภทด้วยกันคือ

1. การเกิดเบรกดาวน์บางส่วน
2. การเกิดความร้อนสูง
3. การเกิดอาร์ก

พลังงานที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะเป็นผลทำให้เกิดความผิดปกติขึ้น และเป็นสาเหตุทำให้น้ำมันเกิดเบรกดาวน์ผลของการเบรกดาวน์หรือที่เรียกว่าก๊าซที่เจือปนในน้ำมัน ทำให้เกิดการปนเปื้อนซึ่งสามารถทำการตรวจวัดเพื่อหาชนิดและความรุนแรง ของความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ การวิเคราะห์น้ำมันหม้อแปลงจากการเกิดก๊าซเจือปนในน้ำมันทำให้เราสามารถตรวจวัดความผิดปกติ ที่เริ่มเกิดได้ ก่อนที่จะเกิดความเสียหายกับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งนำไปสู่การเกิดไฟดับและความสูญเสียอีกหลายอย่างตามมาในการตรวจวัดปริมาณก๊าซที่เจือปนในน้ำมันหม้อแปลงโดยใช้เครื่องมือที่มีชื่อว่า MYRKOS Transformer Fault Gas Analyzer ซึ่งเครื่องมือชนิดนี้ถูกออกแบบมาให้มีความถูกต้อง

แม่นยำสำหรับการตรวจวัดก๊าซทั้ง 7 ชนิดซึ่งเกิดจากความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดฉนวนด้วยน้ำมันได้แก่ ไฮโดรเจน(H₂), คาร์บอนไดออกไซด์(CO₂), คาร์บอนมอนนอกไซด์(CO),มีเทน(CH₄), อีเทน(C₂H₆), เอทิลีน(C₂H₄), อะเซทิลีน(C₂H₂) - Fault Gas ก๊าซที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงและเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปสามารถแสดง ได้ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.2 แสดงชนิดการเกิดฟอลท์

ก๊าซที่ตรวจสอบพบ	ความหมาย
ก๊าซ N ₂ +5% หรือน้อยกว่า O ₂	การใช้งานปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด seal type
ก๊าซ N ₂ มากกว่า 5% ของก๊าซ O ₂	ตรวจรอยรั่วของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด seal type
ก๊าซ N ₂ , CO ₂ , CO หรือทั้งหมด	หม้อแปลงไฟฟ้าใช้งานโหลดเกินหรือเกิดความร้อนในการทำงาน สาเหตุ เนื่องจากเกิดเบรกดาวน์ในกระดาดฉนวน ให้ตรวจสอบเงื่อนไขการใช้งาน
ก๊าซ N ₂ และ H ₂	เกิดดิสชาร์จบางส่วน เกิดแยกน้ำเป็นออกซิเจนหรือเกิดสนิม
ก๊าซ N ₂ , H ₂ , CO ₂ และ CO	เกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นภายในกระดาดฉนวนหรือเกิดจากการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าเกินโหลด
ก๊าซ N ₂ , H ₂ , CH ₄ และเกิดปริมาณเล็กน้อย	สปาร์คหรือเกิดความผิดปกติ เนื่องจากการเกิดเบรกดาวน์ภายในน้ำมันหม้อแปลง
ก๊าซ N ₂ ร่วมกับ H ₂ ปริมาณสูงและมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น C ₂ H ₂ เล็กน้อย	เกิดอาร์กชนิดที่มีพลังงานสูงมาก สาเหตุเนื่องจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันอย่างรวดเร็ว
ก๊าซ N ₂ ร่วมกับ H ₂ ปริมาณสูง, CH ₄ และ C ₂ H ₄ ในปริมาณสูงและมี C ₂ H ₂ เล็กน้อย	เกิดอาร์กในน้ำมันที่อุณหภูมิสูงภายในบริเวณแคบๆ ตัวอย่างเช่น เกิดลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด
มีปริมาณก๊าซเหมือนข้างบน แต่มี CO ₂ และ CO เกิดร่วมอยู่ด้วย	เกิดอาร์กในน้ำมันที่อุณหภูมิสูงภายในบริเวณแคบๆ ของกระดาดฉนวน

2.5 การระบายความร้อนของหม้อแปลง

การสูญเสีย (Losses) พลังงานไฟฟ้าต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงเช่น การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) การสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper Loss) และในส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงในขณะที่จ่ายโหลดอยู่ พลังงานสูญเสียทั้งหมดจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของวัสดุมีโอกาสมากกว่าจุดสูงสุดที่วัสดุนั้นจะทนได้ และทำลายฉนวนของหม้อแปลงในที่สุด ทำให้หม้อแปลงใช้งานไม่ได้ (Failure) ดังนั้นการระบายความร้อนของหม้อแปลงจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง การระบายความร้อน ถ้ากระทำถูกวิธีจะสามารถเพิ่มอัตรากำลัง(Rating) ของหม้อแปลงได้โดยขนาดเท่าเดิม หรืออาจลดขนาด(กว้าง, ยาว, สูง) ของหม้อแปลงได้โดยที่ขนาด

กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงยังคงเดิม โดยธรรมชาติแล้วความร้อนจะระบายออก(Dissipate)ตามผิวของวัตถุ (Material) ด้วยวิธีการแผ่รังสี(Radiation) และวิธีการนำพา(Convection) ในหม้อแปลงนั้นการระบายความร้อนจะใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับขนาดทั้งรูปร่างและอัตรากำลังของหม้อแปลงที่ใช้ หม้อแปลงก่อนที่จะถูกนำไปใช้งานนั้นอุณหภูมิภายในหม้อแปลงเท่ากับอุณหภูมิรอบ ๆ ภายนอก (Ambient Temperature) หลังจากที่หม้อแปลงจ่ายโหลด อุณหภูมิภายในหม้อแปลงโดยเฉพาะส่วนที่มีกระแสไหล(Active Component) จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะถ่ายเทความร้อนให้แก่วัสดุหรืออากาศรอบ ๆ ทำให้มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดๆ หนึ่งก็จะไม่เพิ่มขึ้นอีก แสดงว่าความร้อนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีกระแสไหลผ่าน จะเท่ากับความร้อนที่ระบายออกผลก็คือ อุณหภูมิคงที่

2.5.1 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

ความร้อนในหม้อแปลงชนิดจุ่มน้ำมันมีระบบถ่ายเทความร้อน 2 ขั้นตอนคือ

1. ระบบความร้อนของแกนเหล็กและขดลวดถ่ายเทสู่น้ำมัน
2. ระบบความร้อนของน้ำมันถ่ายเทสู่อากาศ โดยความร้อนจะถูกถ่ายเทด้วยวิธีใด

วิธีหนึ่ง

เมื่อพิจารณาถึงวิธีการถ่ายเทความร้อนจากขดลวดของหม้อแปลงไปสู่บรรยากาศแวดล้อม การถ่ายเทความร้อนแต่ละวิธีจะถูกปฏิบัติแยกจากกัน โดยการนำความร้อนมีความสำคัญน้อยที่สุด และการพาความร้อนมีความสำคัญมากที่สุด ดังนั้นการออกแบบการระบายความร้อนของหม้อแปลง จึงพิจารณาเฉพาะการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเท่านั้น

2.5.2 การแผ่รังสีความร้อน

การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการแผ่รังสีความร้อน เกิดขึ้นเพราะทุกส่วนของวัสดุที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเหนืออุณหภูมิแวดล้อม จะแผ่พลังงานความร้อนมาในรูปของคลื่น (Waves) พลังงานความร้อนสูงสุดที่ถูกแผ่ออกมาที่อุณหภูมิหนึ่ง จะเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นหนึ่ง แต่หากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจุดของพลังงานความร้อนสูงสุดจะเลื่อนไปในช่วงความยาวคลื่นที่สั้นกว่า โดยทั่วไปพื้นที่ของพลังงานความร้อนสูงสุดมักอยู่ในช่วงอินฟราเรด(Infrared Spectrum) พื้นที่สำหรับการแผ่รังสีความร้อนที่มีประสิทธิภาพคือ พื้นผิวภายนอกที่ห่อหุ้มด้วยวัสดุ พื้นผิวที่แผ่รังสีความร้อนได้จริงคือ ผลคูณของความสูงและความยาวของถังผิวเรียบ (Plain Tank) ที่ห่อหุ้มหม้อแปลง อย่างไรก็ตามสีของพื้นผิวซึ่งมีแฟคเตอร์ของการแผ่รังสี(Emissivity Factor) ถ้าพื้นผิวมีสีดำสนิทจะมีแฟคเตอร์ของการแผ่รังสีเท่ากับ 1 แต่ถ้าแฟคเตอร์ของการแผ่รังสีน้อยกว่า 1 ประสิทธิภาพของการแผ่รังสีความร้อนจะมีค่าลดลงเท่ากับพื้นที่ผิวที่ห่อหุ้มคูณด้วยแฟคเตอร์ของการแผ่รังสี การแผ่รังสีของสีที่ใช้ในทางปฏิบัติส่วนมากจะมีค่าใกล้เคียงกับ 1 โดยทั่วไปประมาณ 0.90-0.95 เช่น สีเขียวหรือสีเทาเป็นต้น การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการแผ่รังสีความร้อนสามารถเขียนเป็นสมการโดยกฎของสเตฟานโบลซ์มานน์ (Stefan Boltzman Law) ได้ดังนี้

$$W_{\text{rad}} = 5.7 \times 10^{-8} \times E(T_2 - T_1) \quad (2.1)$$

โดยที่

W_{rad}	คือ	กำลังไฟฟ้าสูญเสียวัตต์ต่อตารางเมตรของพื้นผิว
E	คือ	แฟคเตอร์ของการแผ่รังสี (0.90-0.95)
T_1	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของบรรยากาศแวดล้อม (°C)
T_2	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัสดุส่วนที่ร้อน (°C)

2.5.3 การพาความร้อน

เมื่อนำวัสดุที่ร้อนจุ่มลงไปลงในของไหล ความร้อนของวัตถุจะถูกพาออกจากพื้นผิวของวัตถุไปสู่ตัวกลางที่เย็นกว่าวัตถุนั้น การเพิ่มอุณหภูมิในของไหลจะทำให้ความหนาแน่นของตัวกลางลดลง ดังนั้นจะทำให้เกิดขบวนการไหลเวียนของของไหล โดยของไหลที่เบากว่าจะจากไปและจะมีของไหลที่หนักกว่ามาแทนที่ ขบวนการไหลเวียนของของไหลจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ความร้อนที่ถูกถ่ายเทโดยการพาความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$W_{\text{con}} = K\theta_c n \quad (2.2)$$

โดยที่

W_{con}	คือ	กำลังไฟฟ้าสูญเสียวัตต์ต่อตารางเมตร
K	คือ	ค่าคงที่
θ_c	คือ	อุณหภูมิเพิ่ม (°C)

n คือ ค่ายกกำลังประมาณ 1.0-1.25 ขึ้นอยู่กับรูปร่างและพื้นผิวของวัตถุที่จะระบายความร้อนสำหรับถังตั้งเรียบอยู่ในอากาศที่มีความสูงประมาณ 60 ซม. ขึ้นไป และมีอุณหภูมิเพิ่มถึง 75 องศาเซลเซียส

การสูญเสียที่ทำให้เกิดอุณหภูมิเพิ่ม มีการเปลี่ยนแปลงตามรากที่สองของความหนาแน่นของอากาศ สำหรับพื้นที่ผิวของถังหม้อแปลงที่มีการติดครีระบายความร้อน ซึ่งต้องมีความต้านทานของการไหลของอากาศ จึงจำเป็นต้องมีค่าแฟคเตอร์แก้ไขคือ แฟคเตอร์ความเสียดทานของอากาศ (Air Friction Factor) ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับลักษณะของครีระบายความร้อน ดังนั้นแฟคเตอร์นี้จะต้องหาค่าโดยการทดลอง

$$W_{\text{con}} = 2.17 F_a \theta_c 1.25 \quad (2.3)$$

โดยที่

F_a	คือ	แฟกเตอร์ความเสียหายของอากาศ
P	คือ	ความกดดันของบรรยากาศ (ที่ระดับน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ 1)

2.5.4 การถ่ายเทความร้อนร่วมของการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อน

ผลรวมของการถ่ายเทความร้อน จากถึงหม้อแปลงพื้นผิวแนวตั้งเรียบสามารถรวมเป็นสมการ

ดังนี้

$$W = 5.7 \times 10^{-8} E (T_2 - T_1) + 2.17 F_a \theta_c 1.25 \quad (2.4)$$

โดยที่

W_{rad}	คือ	กำลังไฟฟ้าสูญเสียวัดต่อตารางเมตรของพื้นผิว
E	คือ	แฟกเตอร์ของการแผ่รังสี (0.90-0.95)
T_1	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของบรรยากาศแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)
T_2	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัสดุส่วนที่ร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

ในทางปฏิบัติพื้นที่ผิวของตัวถังหม้อแปลงอาจจะไม่สามารถระบายความร้อนออกสู่อากาศเพื่อให้อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะใช้งานมีค่าไม่สูงเกินกว่าข้อกำหนดได้ ดังนั้นผู้ออกแบบจึงต้องทำการออกแบบให้หม้อแปลงมีพื้นที่ผิวในการระบายความร้อนได้อย่างเพียงพอโดยทำการติดตั้งครีระบายความร้อนที่ด้านข้างของตัวถังหม้อแปลงเพื่อช่วยในการระบายความร้อน พื้นที่ผิวของการระบายความร้อนหาได้จากสมการ

$$A_R = W_t / W_k \quad (2.5)$$

โดยที่

A_R	คือ	พื้นที่ผิวของการระบายความร้อน (วัดต่อตารางเมตร)
W_t	คือ	กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของหม้อแปลง (วัตต์)
W_k	คือ	ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อน (วัดต่อตารางเมตร)

2.6 การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า

การบำรุงรักษาส่วนใหญ่มีจุดมุ่งหมายเพื่อรักษาอุปกรณ์ให้อยู่ในสภาพใหม่และปลอดภัยอยู่เสมอ ซึ่งการกระทำเช่นนั้นอาจไม่เหมาะสมเมื่อคิดในแง่เศรษฐศาสตร์ เช่น ราคาในการบำรุงรักษาสูงเกินไป เมื่อเทียบกับมูลค่าของอุปกรณ์ หรือความเสี่ยงเมื่อเกิดความเสียหาย ดังนั้นการกำหนดตารางในการบำรุงรักษาจึงต้องคำนึงถึงหลายองค์ประกอบ ทั้งทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเศรษฐศาสตร์ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

1. ความสำคัญของอุปกรณ์ที่มีต่อระบบ ประเมินเป็นมูลค่าของความเสียหาย
2. สภาพของการใช้งานนั้นเสี่ยงต่อความเสื่อมของอุปกรณ์หรือไม่ เช่น หม้อแปลงมีความจำเป็นต้องจ่ายโหลดเกินปกติบ่อยครั้ง หรือมีการที่ป้องกันที่ไม่ดีนัก ต้องทำการตรวจสอบบ่อยขึ้น
3. สภาพแวดล้อมของสถานที่ติดตั้ง เช่น ร้อนจัด มีฝุ่นมาก มีสารเคมีแพร่กระจายอยู่ในอากาศ ต้องมีการปรับระยะเวลาในการตรวจสอบให้เหมาะสม

2.7 การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าถือเป็นสิ่งที่สำคัญ โดยจะมีการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อให้หม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติและยังทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีอายุการใช้งานที่นานขึ้น ซึ่งในระบบฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบด้วย ฉนวนน้ำมัน กระดาษ ซิลิกา ฉนวนทองแดง โดยวัสดุเหล่านี้จะมีการเสื่อมสภาพเมื่อมีความชื้น เหม่า หรือสิ่งเจือปนอื่นๆ และก๊าซ ปะปนอยู่ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการ ลัดวงจรหรือระเบิดได้ ดังนั้นจึงควรทำการตรวจสอบสภาพ และบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ เพื่อเป็นการลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น อีกทั้งยังทำให้ได้ประโยชน์และประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน

สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง นับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบไฟฟ้า จึงต้องมีการตรวจสอบและบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ โดยทั่วไปจะมีการตรวจสอบทุกๆ 6 เดือน หรือ 1 ปี เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งในการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้ามักจะใช้การตรวจวัดทางไฟฟ้า และ การตรวจวัดทางน้ำมัน ในการประเมินสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

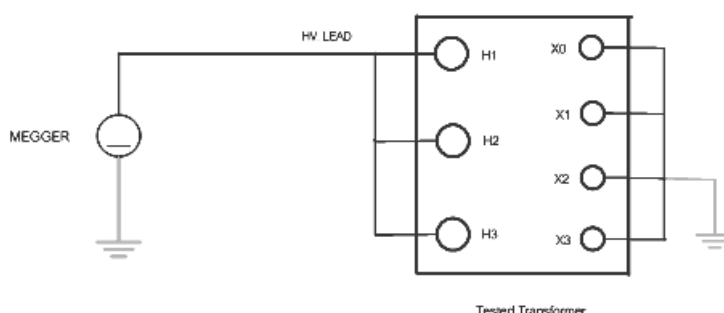
2.8 การตรวจวัดทางไฟฟ้า

2.8.1 การวัดค่าความต้านทานของฉนวน

สำหรับการทดสอบค่าความต้านทานของฉนวน เพื่อตรวจสอบแนวโน้มของการเสื่อมสภาพของฉนวนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งขั้นตอนในการทดสอบเป็นวิธีการลัดวงจรของขดลวดในแต่ละชุดของหม้อแปลงเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะให้แรงดันทดสอบมีค่าเท่ากันในแต่ละเฟส ถ้าขดลวดทดสอบมีพิกัดแรงดันตั้งแต่ 3,300 V ขึ้นไปให้ทดสอบด้วยแรงดัน 2,500 Vdc และถ้าพิกัดแรงดันน้อยกว่า 3,300 V ลงมาให้ทดสอบด้วยแรงดัน 1,000 Vdc จากนั้นทดสอบตั้งแต่ 1 นาที ถึง 10 นาที แล้วคำนวณค่า Polarization Index (PI) หรือค่าอัตราส่วนความต้านทานฉนวนที่นาที่ที่ 10 ต่อนาที่ ที่ 1 ตามมาตรฐาน IEEE C57.125-1999

ตารางที่ 2.3 ค่า PI ในการพิจารณาสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

สภาพ	PI
ดี	มากกว่า 2.0
พอใช้	1.25 – 2.0
อาจเกิดความผิดปกติ	1.1 – 1.25
อันตราย	น้อยกว่า 1.1



ภาพที่ 2.24 วงจรวัดค่าความต้านทานฉนวน

2.8.2 การวัดค่าความสูญเสียทางฉนวน

สำหรับการวัดค่าความสูญเสียทางฉนวนจะทำการทดสอบเพื่อตรวจหาการย่อยสลายของฉนวนที่มักเกิดจากความชื้นหรือคาร์บอนที่ปนเปื้อนอยู่ ซึ่งจะบอกถึงการเสื่อมสภาพของฉนวนบุหุ้ม และขดลวด ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับการวัดค่าความต้านทานของฉนวน ซึ่งจะบอกถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยเป็นทดสอบเพื่อวัดค่าการสูญเสียในฉนวน (Dielectric Loss) โดยผลที่วัดได้จะเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่สูญเสียไปในฉนวนกับผลคูณของแรงดันและกระแสที่จ่ายให้กับหม้อแปลงนั้น จุดประสงค์เพื่อหาการเสื่อมสภาพของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า โดยถ้าค่าความต้านทานของฉนวนอยู่ในสภาพอันตรายก็ไม่ต้องทดสอบค่าความสูญเสียและ %PF แต่ถ้าค่าความต้านทานของฉนวนอยู่ระหว่าง 1.1 – 1.15 ให้ทำการทดสอบค่าความสูญเสียและ %PF ที่แรงดัน 2.5 kV ก่อนแล้วจึงทำการทดสอบตาม Data Test ที่แนบมากับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยต้องบันทึกอุณหภูมิของน้ำมัน อากาศ และความชื้นสัมพัทธ์

ตารางที่ 2.4 ระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ

แรงดันที่พิกัดของขดลวด (kV)	แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (kV)
3 -5	2.5
5 - 10	5
> 10	10

ตารางที่ 2.5 ค่าสภาพของฉนวน (%PF) ที่ 20 องศาเซลเซียส

ชนิด	สภาพดี (%PF)	น่าสงสัย (%PF)	อันตราย (%PF)
Power Tx	< 0.5	0.5 – 1.0	> 1.0
Dist Tx	< 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
DRY - Type	< 2.0	2.0 – 5.0	> 5.0
ASKAREL	< 0.5	0.5 – 10.0	> 10.0

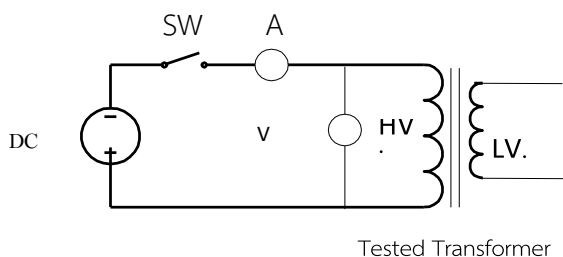


ภาพที่ 2.25 วงจรวัดค่าสภาพของฉนวน (%PF)

2.8.3 การวัดค่าความต้านทานของขดลวด

เป็นการวัดความต้านทานของขดลวดแต่ละชุด เพื่อเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ระหว่างเฟสว่ามีขดลวดใดผิดปกติหรือไม่ สำหรับการทดสอบ กระแสที่ทดสอบไม่ควรเกิน 15% ของกระแสพิกัดของหม้อแปลง โดยการสับสวิตช์และรองจนกว่า โวลต์มิเตอร์ และ แอมป์ มิเตอร์ จะหยุดนิ่ง (SteadyState) ทำการอ่านค่ากระแสและแรงดันพร้อมกัน โดยโวลต์มิเตอร์ที่ใช้ควรมีค่าความต้านทานสูงเมื่อเทียบกับขดลวดทดสอบในกรณีที่โวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัดมีค่าความต้านทานยังไม่สูงพอเมื่อเทียบกับขดลวดทดสอบ ซึ่งทำให้ไม่สามารถอ่านค่ากระแสที่ถูกต้องของขดลวดได้ ก็ให้อ่านค่าแรงดันก่อนแล้วปลดโวลต์มิเตอร์ออกหลังจากนั้นจึงอ่านค่ากระแส บันทึกค่าอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันระหว่างการทดสอบสำหรับฉนวน (Dry Type) ในกรณีที่ปลดหม้อแปลงออกจากระบบ

นานเกิน 8 ชั่วโมง ให้ใช้อุณหภูมิของอากาศแทนอุณหภูมิของขดลวดได้ ความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานที่วัดได้ไม่ควรเกิน 5 % (IEEE Std . 62-1995) เมื่อเทียบกับค่าทดสอบจากโรงงาน (Factory Test) ที่อุณหภูมิเดียวกัน และใช้เทียบกันระหว่างเฟส



ภาพที่ 2.26 วงจรการวัดค่าความต้านทานของขดลวด

2.8.4 การวัดค่าของกระแสกระตุ้นวงจรด้านแรงสูง

การวัดค่ากระแสกระตุ้นวงจรด้านแรงสูงเป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบสภาพของขดลวดว่ามีการลัดวงจรระหว่างขดลวดหรือไม่ ซึ่งการทดสอบจะใช้เครื่องวัด %PF โดยทำการวัดค่ากระแสกระตุ้นด้วยแรงดันสูงที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงด้านเดียว โดยวัดที่ชุดของขดลวดแรงดันสูงสุด (ในกรณีบำรุงรักษาให้วัดที่ชุดของขดลวดที่ใช้งาน โดยไม่ต้องเลื่อน ชุดของขดลวดตามมาตรฐาน NETA MTS-05)

ตารางที่ 2.6 ค่ากระแสกระตุ้นวงจรด้านแรงสูง

สภาพ	ปริมาณกระแสกระตุ้น (mA)
ดี	< 50
น่าสงสัย	50 and < 100
อันตราย	100

2.8.5 การวัดค่าความต้านทานฉนวนแกนเหล็ก (Core Insulation Resistance)

การวัดค่าความต้านทานฉนวนแกนเหล็กเป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบฉนวนระหว่างแกนเหล็กกับตัวถังของหม้อแปลงว่าเกิดการชำรุด หรือเสื่อมสภาพหรือไม่ สำหรับวิธีการวัดค่าความต้านทานของแกนเหล็กจะใช้แรงดันในการทดสอบไม่เกิน 1,000 Volt โดยมีขั้นตอนในการทดสอบคือการหาตำแหน่งของจุดต่อสายดินของแกนเหล็กให้พบ ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าสมัยใหม่จะมีจุดต่อสายดินจะต่อภายในออกมาที่บูทซึ่งขนาดเล็กที่ตัวหม้อแปลง แล้วทำการปลดสายที่ต่อจากจุดต่อสายดินของแกนเหล็กลงตัวถังของหม้อแปลงหรือต่อลงดินแล้วทำการวัดค่าฉนวนของแกนเหล็กเทียบกับกราวด์ โดยพิจารณาค่าความต้านทานฉนวนแกนเหล็กเทียบกับกราวด์ ซึ่งสามารถพิจารณาได้ ดังนี้

ตารางที่ 2.7 ระดับค่าความต้านทานฉนวนแกนเหล็ก

ลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้า	ค่าความต้านทานของแกนเหล็ก	การประเมินสภาพ
หม้อแปลงใหม่	> 100 MΩ	ปกติ
	> 100 MΩ	ปกติ
หม้อแปลงที่ผ่านการใช้งานใน	10 – 100 MΩ	แสดงการเสื่อมของฉนวน
ระบบ	< 10 MΩ	ฉนวนเสื่อมสภาพทำให้เกิด กระแสไหลวน

2.8.6 การวัดค่าอัตราส่วนของขดลวด (Winding Ratio Measurement)

การวัดค่าอัตราส่วนของขดลวดทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิว่ามีอัตราจำนวนรอบตามที่กำหนดไว้หรือไม่ ซึ่งอัตราส่วนของขดลวดอาจเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากหลายปัจจัยรวมถึงความเสียหายทางกายภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าและความผิดปกติของฉนวนที่เสื่อมสภาพ โดยหากอัตราส่วนของขดลวดเปลี่ยนแปลงไปเกิน 0.5% อาจส่งผลกระทบต่อระดับของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งการวัดค่าอัตราส่วนของขดลวดเป็นการทดสอบด้วยวิธี Volt Meter Method (มีเครื่องมือเป็นชุดสำหรับทดสอบอัตราส่วนซึ่งสามารถอ่านค่าได้เลยสำหรับที่นิยมใช้คือเครื่อง Multi-amp TR#800) สำหรับการทดสอบให้พิจารณาความเหมาะสมของแรงดันโดยใช้แรงดันไม่เกิน 80% ของพิกัดแรงดันหม้อแปลง ซึ่งจะทำให้การวัดในทุกชุดของขดลวดและทุกเฟสของหม้อแปลง โดยการหาค่าอัตราส่วนให้นำค่าแรงดัน L-L ไปหาค่าอัตราส่วนของขดลวดและในกรณีที่ต้องใช้ค่าแรงดัน L-N การคำนวณหาค่าอัตราส่วนคำนวณได้จากสูตร

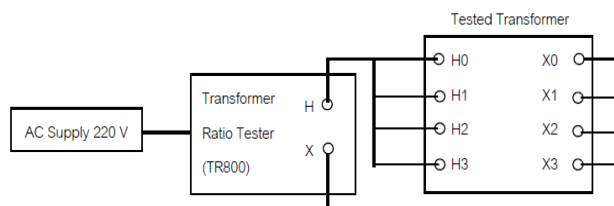
หมายเหตุ : ค่าอัตราส่วนของขดลวดกำหนดให้เป็นทศนิยม 4 ตำแหน่งสำหรับการหาค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนของขดลวดคำนวณได้จากสูตร

$$\% \text{ Error} = \frac{R_m - R_r}{R_r} \times 100 \quad (2.2)$$

โดยที่

%Error	=	ความคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนขดลวด
R_m	=	อัตราส่วนของขดลวดที่วัดได้
R_r	=	อัตราส่วนของขดลวดจาก Name Plate

โดย ค่าความคลาดเคลื่อนที่วัดได้ต้องไม่เกิน 0.5% เมื่อเทียบกับอัตราส่วนจาก Name Plate ตามมาตรฐาน ANSI C57.12.90-1973



ภาพที่ 2.27 วงจรการวัดค่าอัตราส่วนของขดลวด

2.9 การตรวจวัดทางน้ำมัน

2.9.1 การวัดความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์

กระแสสลับ (AC Breakdown Strength) ของน้ำมันเป็นการวัดความสามารถของน้ำมันในการคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้ากระแสสลับ โดยปราศจากการเกิดความเสียหายตามมาตรฐาน ASTM D877, D1816 หรือ IEC156 ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์จะบอกให้ทราบถึงสิ่งเจือปนที่อยู่ในน้ำมันในรูปของสิ่งสกปรก (Contamination) เช่น เศษเส้นใยของฉนวนแข็ง เศษตัวนำ (Conductive particles) น้ำ ฝุ่นละออง หรือความสกปรกต่างๆ น้ำมันที่มีความสกปรกปนอยู่มากจะมีค่า Breakdown ต่ำ น้ำมันที่สะอาดหรือผ่านการกรองมาใหม่ๆ จะมีค่า Breakdown สูงปกติจะทำการทดสอบทุก 6 เดือน สำหรับหม้อแปลงที่มีความสำคัญมากและจะทำการทดสอบทุก 1 ปี สำหรับหม้อแปลงปกติ ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM D877-87 หรือ D1816 , IEC156 กำหนดว่าไม่ควรต่ำกว่า 26 kV จึงจะถือว่าพอใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัย

ค่าแรงดันเบรกดาวน์ขั้นต่ำของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM D877-87 สามารถแบ่งสภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ดังนี้

ตารางที่ 2.8 ค่าแรงดันเบรกดาวน์

Dielectric Breakdown Voltage at 50 Hz [kV]	ระดับแรงดันไฟฟ้า	Good
	≤ 69 kV	> 26
มาตรฐาน ASTM D877	69 – 288 kV	> 26
	> 345 kV	> 26
	≤ 69 kV	> 30
มาตรฐาน IEEE c57.106	69 – 288 kV	> 30
	> 345 kV	> 30
	< 72.5 kV	> 40
มาตรฐาน IEC 60156	72.5 – 170 kV	> 50
	> 170 kV	> 60

2.9.2 การวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนในน้ำมันหม้อแปลง (Dissolved Gas Analysis)

การวิเคราะห์ก๊าซ (Dissolved Gas Analysis) ที่เจือปนในน้ำมันหม้อแปลงเป็นการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะวิกฤต เพื่อเฝ้าติดตามการทำงานทางกลและทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวินิจฉัยความผิดปกติและปัญหาที่เกิดจากการใช้งานกับหม้อแปลงไฟฟ้าและตัวเปลี่ยนชุดขดลวด หรืออุปกรณ์ชนิดฉนวนน้ำมันถูกใช้งานภายใต้สภาวะความร้อนและความเครียดทางสนามไฟฟ้าสูงๆ อาจจะมีโอกาสทำให้เกิดความผิดปกติขึ้นได้ในที่สุดความผิดปกติอาจจำแนกได้ 3 ประเภทด้วยกันคือ

- 1.การเกิดเบรกดาวน์บางส่วน
- 2.การเกิดความร้อนสูง
- 3.การเกิดอาร์ก

พลังงานที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะเป็นผลทำให้เกิดความผิดปกติขึ้น และเป็นสาเหตุทำให้น้ำมันเกิดเบรกดาวน์ ผลของการเบรกดาวน์หรือที่เรียกว่าก๊าซที่เจือปนในน้ำมัน ทำให้เกิดการปนเปื้อนซึ่งสามารถทำการตรวจวัดเพื่อหาชนิดและความรุนแรงของความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ การวิเคราะห์น้ำมันหม้อแปลงจากการเกิดก๊าซเจือปนในน้ำมัน ทำให้เราสามารถตรวจวัดความผิดปกติที่เริ่มเกิดได้ก่อนที่จะเกิดความเสียหายกับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งนำไปสู่การเกิดไฟดับและความสูญเสียอีกหลายอย่างตามมาในการตรวจวัดปริมาณก๊าซที่เจือปนในน้ำมันหม้อแปลง ด้วยเครื่อง MYRKOS Transformer Fault Gas Analyzer ซึ่งเครื่องมือชนิดนี้ถูกออกแบบมาให้มีความถูกต้องแม่นยำ สำหรับการตรวจวัดก๊าซทั้ง 7 ชนิดซึ่งเกิดจากความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดฉนวนด้วยน้ำมันได้แก่ ไฮโดรเจน (H_2) , คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) , คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) , มีเทน (CH_4) , อีเทน(C_2H_6) , เอทิลีน (C_2H_4) , อะเซทิลีน (C_2H_2) Fault Gas ก๊าซที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงและเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป

การวินิจฉัยหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้ค่าของก๊าซที่ละลายอยู่ในน้ำมัน คู่มือใช้ในการจำแนกความเสี่ยงที่อาจเป็นไปได้โดยใช้ DGA เพื่อวิเคราะห์ปัญหาที่อาจจะเกิดกับหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE C-57-104-1991 ซึ่งจะดูจากค่าก๊าซแต่ละชนิดและก๊าซที่เผาไหม้ทั้งหมดเพื่อใช้ในการประเมินหม้อแปลงไฟฟ้าโดยจะมีอยู่ 4 เงื่อนไข คือ

ตารางที่ 2.9 ขีดจำกัดของก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงส่วนในล้านส่วน (ppm)

Dissolved key gas concentration limits [$\mu\text{L/L}(\text{ppm})^2$]								
Status	Hydrogen (H_2)	Methane (CH_4)	Acetylene (C_2H_2)	Ethylene (C_2H_4)	Ethane (C_2H_6)	Carbon Monoxide (CO)	Carbon Dioxide (CO_2)	TDCG ^b
1	100	120	1	50	65	350	2,500	720
2	100-700	121-400	2-9	51-100	66-100	351-570	2,500- 4,000	721- 1920
3	701-1800	401-1000	10-35	101-200	101-150	571-1,400	4,001- 10,000	1921- 4630
4	>1800	>1000	>35	>200	>150	>1400	>10000	>4630

หมายเหตุ TDCG คือ ก๊าซที่สามารถติดไฟได้ (Total Dissolved Combustible Gas)

1. เจือนไข 1 ก๊าซที่สามารถติดไฟได้เจือปนอยู่ในน้ำมันมีปริมาณต่ำกว่าระดับที่กำหนดไว้แสดงว่าหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานอยู่ในเกณฑ์ปกติ แต่ถ้าก๊าซที่สามารถติดไฟเจือปนอยู่ในน้ำมันเกินระดับที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.8 ควรทำการตรวจสอบเพิ่มเติม

2. เจือนไข 2 ก๊าซที่สามารถติดไฟได้เจือปนอยู่ในน้ำมันอยู่ในช่วงนี้ แสดงว่าระดับของก๊าซที่สามารถติดไฟได้เจือปนอยู่ในน้ำมันเพิ่มขึ้นมากกว่าระดับปกติ ซึ่งเกินกว่าที่ระบุไว้ในตารางที่ 2.8 ควรทำการตรวจสอบเพิ่มเติม ซึ่งความผิดปกติอาจสามารถตรวจพบจากการทดสอบหาก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมัน เพื่อคำนวณหาปริมาณของก๊าซที่เพิ่มขึ้น

3. เจือนไข 3 ก๊าซที่สามารถติดไฟได้เจือปนอยู่ในน้ำมันอยู่ในช่วงนี้ แสดงถึงการสลายตัวของฉนวนกระดาษหรือน้ำมันที่มีระดับสูง ถ้าก๊าซบางชนิดมีปริมาณสูงกว่าที่กำหนดไว้ แสดงว่าอาจเกิดความผิดปกติขึ้นแล้ว ดังนั้น จึงควรทำการตรวจสอบบ่อยขึ้น เพื่อทำการคำนวณหาปริมาณของก๊าซแต่ละชนิดที่เพิ่มขึ้น

4. เจือนไข 4 ก๊าซที่สามารถติดไฟได้เจือปนอยู่ในน้ำมันอยู่ในช่วงนี้ แสดงถึงการสลายตัวของฉนวนกระดาษหรือน้ำมันที่มากเกินไป ควรทำการซ่อมบำรุงทันที

2.9.3 การตรวจวัดความชื้น (Water Content test)

เป็นการตรวจเพื่อหาความชื้นหรือน้ำที่ปะปนอยู่ภายในน้ำมันหม้อแปลง จะทำการตรวจวัดโดยวิธี Coulometric Karl Fisher Titration ด้วย Electricity Titration ซึ่งเป็นการเติมอิเล็กโตรไลต์เข้าไปใน Titration Cell แล้วทำการวัดความชื้นจากการเกิดขึ้นของ Free Iodine ที่ใช้ในการไตเตรตด้วยเครื่อง Mitsubishi Portable Karl Fisher Moisture Meter Model CA-21 ตามมาตรฐาน ASTM D1533

ตารางที่ 2.10 ค่าการตรวจวัดความชื้น

Water Content [mg/kg]	ระดับแรงดันไฟฟ้า	Good
มาตรฐาน ASTM D1553	≤ 69 kV	≤ 69 kV
	≤ 35	≤ 35
	69 – 288 kV	69 – 288 kV
มาตรฐาน IEEE c57.106	69 kV	69 kV
	< 15	< 15
	69 – 288 kV	69 – 288 kV
มาตรฐาน IEC 60814	< 72.5 kV	< 72.5 kV
	< 10	< 10
	72.5 – 170 kV	72.5 – 170 kV

2.9.4 การวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของฉนวนที่เป็นของแข็ง (Furan)

โดยจะถูกสร้างขึ้นมาจากเซลล์โอสในการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษที่เกิดจากความร้อน และเกิดการออกซิเดชันและความเครียดทางไฟฟ้า ความเข้มข้น Furans ที่วัดโดยโครมาโต ของเหลวประสิทธิภาพสูง (HPLC) หรือก๊าซ chromatography - Mass Spectrometry (GC/MS) อยู่บนพื้นฐานตามมาตรฐาน ASTM D 5837

ตารางที่ 2.11 ค่าการเสื่อมสภาพของฉนวนที่เป็นของแข็ง

Furan Analysis	Voltage Class	Acceptable value (ppb)
ASTM D5873	> 115 kV	< 1000 for open type
		< 100 for sealed type

2.9.5 การวัดแรงตึงผิวของน้ำมัน (Interfacial Tension)

ในการวัดแรงตึงผิวของน้ำมันหม้อแปลง จะทำการวัดแรงตึงในแนวตั้ง ซึ่งเป็นแรงตึงผิวของของเหลวที่กระทำกับวัตถุทดสอบ ด้วยเครื่อง Ring/Plate Tensiometer TD1C เป็นการวัดแรงตึงผิวตรงรอยต่อของของเหลว 2 ชนิด คือ น้ำและน้ำมันมีหน่วยเป็น dynes/cm หรือ mN/m. ค่า IFT จะบอกถึง contaminants และ products ของ deterioration polar groups ของน้ำมัน ซึ่งจะมีผลทำให้น้ำมันเกิดเป็นยางเหนียวและมีกรดเพิ่มขึ้นกำหนดให้ recondition น้ำมันเมื่อค่า IFT ลดลงเหลือ 24 mN/m และ reclaimed เมื่อน้ำมันลดค่าลงเหลือ 16 mN/m ปกติจะทำการทดสอบทุก 1 ปี ตามมาตรฐาน ASTM D 971-99 a

ตารางที่ 2.12 เกณฑ์ในการพิจารณาแรงดึงผิวของน้ำมัน

Interfacial Tension (mN/m)	ระดับแรงดันไฟฟ้า	Good
มาตรฐาน ASTM D971	≤ 69 kV	> 24
	69 – 288 kV	> 26
	> 345 kV	> 30
มาตรฐาน IEEE c57.106	69 kV	> 25
	69 – 288 kV	> 30
	> 345 kV	> 32
มาตรฐาน ISO 6295	< 72.5 kV	> 28
	72.5 – 170 kV	
	> 170 kV	

2.9.6 การทดสอบเพื่อหาสิ่งปนเปื้อน (Neutralization Number (tg d), Acidity)

เป็นการทดสอบเพื่อหาสิ่งปนเปื้อนหรือสารเคมีบางชนิดที่ปะปนอยู่ในน้ำมัน ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นกรดที่เกิดจากน้ำมันเสื่อมสภาพ ตามมาตรฐาน ASTM D644-95

ตารางที่ 2.13 เกณฑ์ในการพิจารณาหาสิ่งเจือปนในน้ำมัน

Acid Number (mg KOH/g)	ระดับแรงดันไฟฟ้า	Good
มาตรฐาน ASTM D974	69 kV	0.2
	69 – 288 kV	0.2
	> 345 kV	0.1
มาตรฐาน IEEE c57.106	≤ 69 kV	0.2
	69 – 288 kV	0.15
	> 345 kV	0.1
มาตรฐาน IEC 62021	72.5 kV	0.15
	72.5 – 170 kV	0.1
	> 170 kV	0.1

2.10 การตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ (FRA)

หม้อแปลงไฟฟ้าคือองค์ประกอบสำคัญส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้า โดยความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าอาจนำไปสู่ความเสียหายต่อระบบที่รองรับ ซึ่งอาจเกิดจากการขาดการตรวจสอบ และบำรุงรักษา สิ่งที่สำคัญที่สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาเหล่านี้ คือการตรวจสอบประสิทธิภาพของหม้อแปลงเป็นประจำ

การวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ (Frequency Response Analysis : FRA) เป็นวิธีการตรวจสอบหม้อแปลงเพื่อดูแนวโน้มที่เปลี่ยนแปลงทางกายภาพภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีความไว

ในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งการเปลี่ยนแปลงภายในขดลวดอาจนำไปสู่การลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่จะแสดงถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงแม้จะเกิดความเสียหายเพียงเล็กน้อย โดยการประเมินสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าควรมีการเปรียบเทียบกับตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีอื่นๆ เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ร่วมกัน

2.11 หลักในการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่

สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเราจำเป็นต้องมีการตรวจสอบด้วยวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ เพื่อติดตามผลกระทบที่เกิดขึ้นกับตัวหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อที่จะให้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอยู่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการตรวจวัดนั้นจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบเนื่องจากหลายกรณีเพื่อตรวจหาความผิดปกติของหม้อแปลง

2.12 เทคนิคในการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่

จนถึงขณะนี้การวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ยังมีความหลากหลายมาตรฐาน ในการตั้งค่าที่ใช้ในการวัด นอกจากนี้ยังมีวิธีในการวัดแยกเป็น 2 วิธี คือ วิธีการกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำ (Low Voltage Impulse ; LVI) และ วิธีการกวาดความถี่ (Sweep Frequency Response Analysis ; SFRA)

2.12.1 วิธีการกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำ (Low Voltage Impulse)

การกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำเป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากแรงดันกระตุ้นที่เริ่มทดสอบ โดยแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการกระตุ้นจากเครื่องกำเนิด ซึ่งจะทำให้การวัดพร้อมกับแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ หรือกระแสจากกราวด์ ซึ่งสามารถทำการวัดได้หลายจุดในเวลาเดียวกัน ซึ่งการวัดค่าจาก Time domain จะแปลงไปยัง Frequency domain โดยการคำนวณ Fourier Transform และ Transfer Function ซึ่งจะทำให้การแปลงสัญญาณทั้งสอง

ข้อดีของวิธีการกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำ

1. สามารถตรวจวัดได้หลายจุดในเวลาเดียวกัน ลดเวลาการหยุดทำงานของหม้อแปลงขณะทำการตรวจวัด

ข้อเสียของวิธีการกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำ

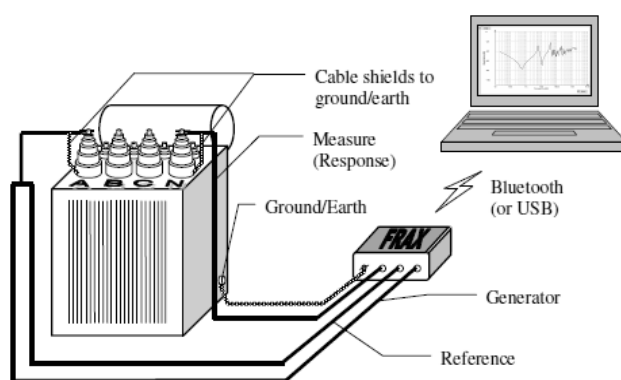
1. ที่ความถี่ต่ำสัญญาณที่ได้จะมีความละเอียดต่ำ
2. ไม่สามารถกรองสัญญาณรบกวนได้
3. คลื่นความถี่และกำลังของสัญญาณที่ส่งเข้าไปยังหม้อแปลงไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับความแม่นยำของสัญญาณที่ได้รับ

4. มีอุปกรณ์จำนวนมาก

5. ความถูกต้องขึ้นอยู่กับวิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์

2.12.2 วิธีการกวาดความถี่ (Sweep Frequency Response Analysis)

วิธีการกวาดความถี่จะทำการทดสอบโดยการปล่อยสัญญาณความถี่ตั้งแต่ 20 Hz – 2 MHz เข้าไปยังหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อนำสัญญาณที่ได้จากการตอบสนองต่อความถี่ในช่วงความถี่ต่างๆ มาทำการวิเคราะห์ผล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ได้จะขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำและค่าการเก็บประจุที่เปลี่ยนแปลงไปภายในตัวหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งวิธีการกวาดความถี่เป็นวิธีที่ช้ากว่าวิธีการกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำ เนื่องจากวิธีนี้จะทำการกวาดความถี่ที่ใช้กระตุ้นเพียงสัญญาณเดียวกับขั้วของหม้อแปลงที่ทำการเชื่อมต่ออยู่ โดยจะทำการปล่อยสัญญาณเข้าสู่ขั้วของหม้อแปลงที่ต้องการทดสอบ ซึ่งจะมีการกวาดความถี่ตั้งแต่ความถี่ต่ำจนถึงความถี่สูงครั้งละ 1 ขั้วเท่านั้น จึงทำให้ต้องใช้เวลาในการทดสอบนานเพื่อทำการทดสอบให้ครบทุกจุด



ภาพที่ 2.28 การเชื่อมต่ออุปกรณ์การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า วิธีการกวาดความถี่กับหม้อแปลงไฟฟ้า

ข้อดีของวิธีการกวาดความถี่

1. สัญญาณที่ใช้ในการวิเคราะห์มีช่วงที่กว้าง
2. สามารถปรับความถี่ในการทดสอบได้
3. สามารถควบคุมความละเอียดโดยการกำหนดช่วงความถี่ได้
4. มีอุปกรณ์น้อย

ข้อเสียของวิธีการกวาดความถี่

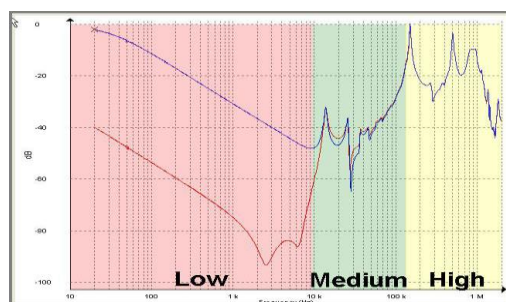
1. มาตรฐานในการเปรียบเทียบการส่งผ่านพลังงานมีอยู่หลายมาตรฐาน ซึ่งจะแบ่งช่วงของความถี่ในการพิจารณาแตกต่างกัน
 2. ในการวัดหม้อแปลงแต่ละลูกต้องใช้เวลานานขึ้นอยู่กับ จำนวนจุดที่ต้องการวัดและระดับในการกรองสัญญาณรบกวน
 3. เทคนิคในการหาค่าเฉลี่ยต้องใช้เวลานาน
- ซึ่งในโครงการนี้จะใช้การตรวจสอบการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าภายใต้วิธีการกวาดความถี่ (Sweep Frequency Response Analysis)

การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ด้วยวิธีการกวาดความถี่ถือเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้า ทั้งภายในแกนเหล็ก ภายในขดลวด และส่วนเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยการวัดค่าของการตอบสนองต่อความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่างๆ และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง ซึ่งความแตกต่างที่ปรากฏจะบ่งบอกถึงความเสียหายที่หม้อแปลงได้รับ ซึ่งสามารถตรวจสอบเพิ่มเติมได้ด้วยการตรวจสอบภายในโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าในลำดับต่อไปสำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีการกวาดความถี่ มีรายละเอียดพื้นฐานดังนี้

1. เป็นการทดสอบแบบ off – line
2. มีการวัดการตอบสนองของความถี่ในช่วงที่กว้าง และ ผลที่ได้จากการตอบสนองของ Transfer Function มีหน่วยเป็น dB
3. การเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองความถี่ในช่วงความถี่ต่างๆ สามารถตรวจพบได้เมื่อทำการวัดเทียบกับค่าอ้างอิงที่ทำการบันทึกไว้
4. เป็นวิธีที่สามารถตรวจสอบความผิดปกติที่หลากหลาย เช่น ภายในขดลวดภายในแกนเหล็ก และ จุดเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าในการตรวจสอบเพียงวิธีเดียวสำหรับความผิดปกติที่สามารถตรวจพบ
5. ความผิดปกติภายในขดลวด เช่น ความผิดปกติภายในโครงสร้างของขดลวดระยะระหว่างขดลวด และการลัดวงจร
6. ความผิดปกติภายในแกนเหล็ก เช่น การเคลื่อนที่ของแกนเหล็ก การเชื่อมต่อของสายดิน ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแกนเหล็ก
7. ความผิดปกติและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง เช่น ชิ้นส่วนต่างๆของหม้อแปลงจุดเชื่อมต่อต่างๆ ภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

ซึ่งความถี่ที่ใช้ในการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่นั้นจะใช้ความถี่ตั้งแต่ประมาณ 20 Hz – 2 MHz โดยจะแบ่งอย่างง่ายออกเป็น 3 ช่วงความถี่คือ

1. ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency) ประมาณ 20 Hz – 10 kHz สามารถบ่งบอกถึงสภาพของแกนเหล็กภายในหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ย่านความถี่ปานกลาง (Medium Frequency) ประมาณ 10 kHz – 100 kHz สามารถบ่งบอกถึงสภาพภายในขดลวดต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า
3. ย่านความถี่สูง (High frequency) ประมาณ 100 kHz – 2 MHz สามารถบ่งบอกถึงสภาพของชิ้นส่วนในการเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า



ภาพที่ 2.29 การแบ่งย่านความถี่ต่างๆในการตรวจวัด

การตรวจสอบหม้อแปลงด้วยวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ ถือเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการประเมินผลของการชาร์จหรือการเสียบรูปของขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยแนวคิดของการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่สำหรับการประเมินสภาพภายในหม้อแปลง ขึ้นอยู่กับความจริงที่ว่า การเบี่ยงเบนหรือการผิดรูปทางเรขาคณิตของขดลวดเป็นการเปลี่ยนแปลงระยะภายใน ซึ่งจะส่งผลให้ความจุและการเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายในของหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งความแตกต่างของสิ่งเหล่านี้จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองความถี่ ซึ่งสังเกตได้จากการส่งผ่านพลังงาน (Transfer Function) ภายในหม้อแปลงจากด้านแรงดันด้านอินพุตและแรงดันด้านเอาต์พุต

2.13 ตัวอย่างการเชื่อมต่อ

ในการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบการตอบสนองความถี่เข้ากับตัวหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีด้วยกันหลายวิธี โดยขึ้นอยู่กับความต้องการในการตรวจสอบว่าต้องการทราบความผิดปกติในส่วนใดของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยจะยกตัวอย่างการเชื่อมต่อใน 2 มาตรฐาน ดังต่อไปนี้

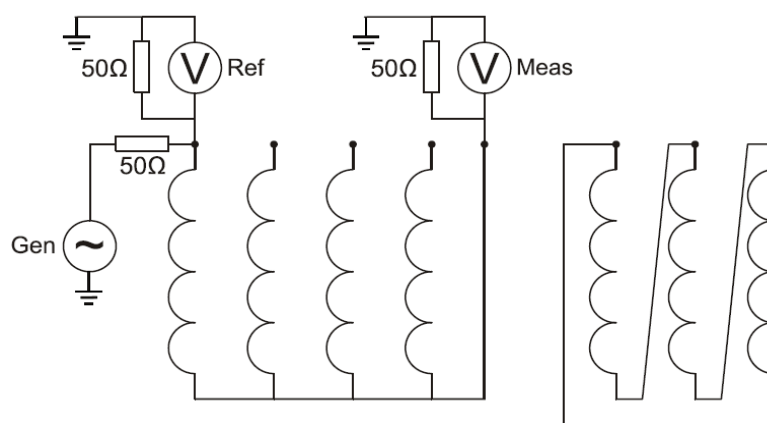
2.13.1 แบบ CIGRE report 342

1. End - to - End Open
2. End - to - End Short – Circuit
3. Capacitive Inter – Winding (CIW)
4. Inductive Inter – Winding (IIW)

2.13.2 แบบ IEEE FRA draft

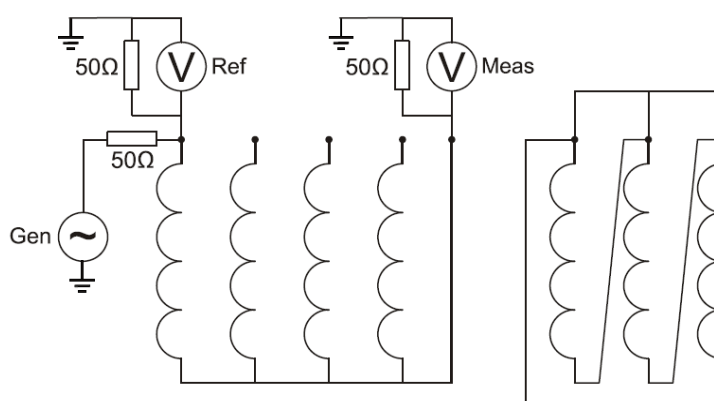
1. Open Circuit Self Admittance (OC)
2. Short Circuit Self Admittance (SC)
3. Inter – Winding (IW)
4. Transfer Admittance (TA)
5. การเชื่อมต่อแบบ End - to - End Open หรือ Open Circuit Self Admittance (OC) สัญญาณความถี่ จะถูกปล่อยเข้าสู่ขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า โดย

จะใช้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำในการทดสอบซึ่งถือเป็นการทดสอบพื้นฐานในการตรวจสอบขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นการวัดที่ค่าแรงดันและกระแสกระตุ้นของแต่ละเฟส



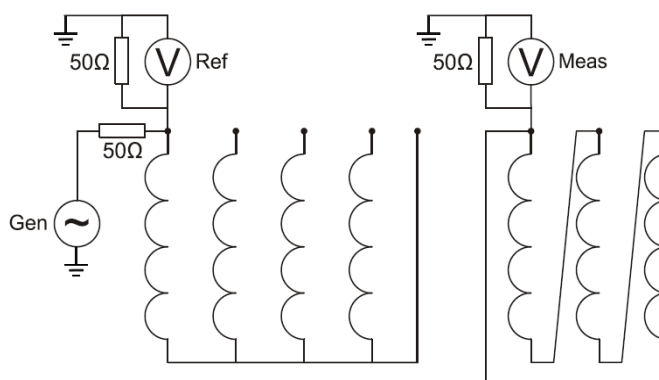
ภาพที่ 2.30 การเชื่อมต่อ End - to - End Open หรือ Open Circuit Self Admittance (OC)

การเชื่อมต่อแบบ End - to - End Short - Circuit หรือ Short Circuit Self Admittance (SC) การวัดจะเหมือนกับแบบแรกแต่ในขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า จะทำการลัดวงจรถึงกันโดยปล่อยสัญญาณความถี่ต่ำ เข้าสู่ขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบค่าความต้านทานภายในขดลวด



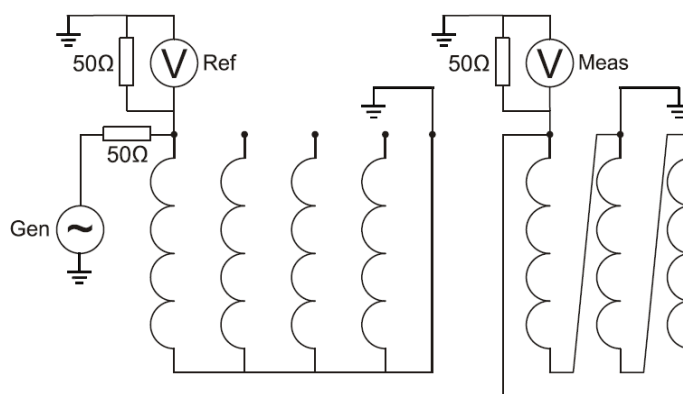
ภาพที่ 2.31 การเชื่อมต่อ End - to - End Short - Circuit หรือ Short Circuit Self Admittance (SC)

การเชื่อมต่อแบบ Capacitive Inter - Winding (CIW) หรือ Inter - Winding (IW) สัญญาณความถี่จะถูกปล่อยเข้าสู่ขดลวดด้านทุติยภูมิและจะทำการวัดที่ขดลวดด้านปฐมภูมิในเฟสเดียวกัน การทดสอบนี้เป็นการตรวจสอบค่าการเก็บประจุและค่าการสูญเสียต่อค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์



ภาพที่ 2.32 การเชื่อมต่อแบบ Capacitive Inter – Winding (CIW) หรือ Inter – Winding (IW)

การเชื่อมต่อแบบ Inductive Inter – Winding (IIW) หรือ Transfer Admittance (TA) สัญญาณความถี่ถูกปล่อยเข้าสู่ ขดลวดด้าน ทดี่ยภูมิและทำ การวัดที่ขดลวดด้าน ปฐมภูมิเหมือนกับการเชื่อมต่อในวิธีที่สาม จะแตกต่างกันที่แต่ละด้านของขดลวดจะทำ การต่อลงดินซึ่งการทดสอบนี้ จะเป็นการตรวจสอบการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของขดลวดจากด้านปฐมภูมิไปสู่ด้านทุติยภูมิ



ภาพที่ 2.33 การเชื่อมต่อ Inductive Inter – Winding (IIW) หรือ Transfer Admittance (TA)

2.14 การวินิจฉัยความผิดปกติ

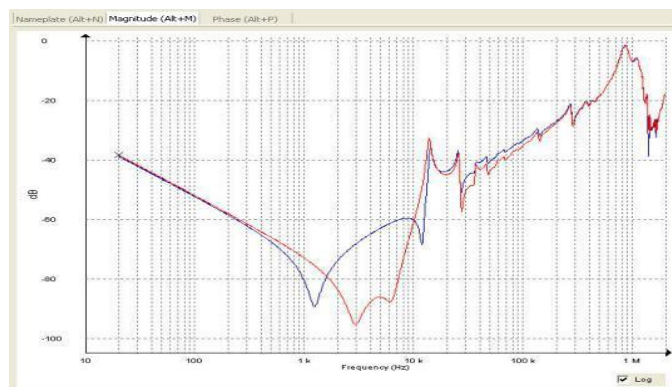
การวินิจฉัยความผิดปกติของหม้อแปลงประกอบด้วยการวัดค่าความต้านทานของแกนเหล็ก ขดลวดและชิ้นส่วนต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ในช่วงความถี่ต่างๆและนำมาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงเพื่อทำการเปรียบเทียบเพื่อหาความเบี่ยงเบนไปของกราฟแสดงการตอบสนองความถี่ แม้จะเป็นเพียงการเบี่ยงเบนแม้เพียงเล็กน้อย หากไม่ได้รับการตรวจสอบและทำการบำรุงรักษาอาจส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าได้ในอนาคต โดยความเสียหายของหม้อแปลงไฟฟ้าอาจเกิดขึ้นจากหลายกรณี เช่น เกิดลัดวงจรภายในระบบซึ่งอาจส่งผลทำให้หม้อแปลงเกิดการชำรุด เกิดความเสียหายในหลาย

ส่วนของตัวหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้น ถ้าใช้การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่จะพบว่าการตอบสนองที่ความถี่ต่ำการไหลวนของกระแสภายในแกนเหล็ก โดยหากภายในแกนเหล็กมีความเสียหายก็จะส่งผลให้การตอบสนองต่อความถี่ในย่านความถี่ต่ำเปลี่ยนแปลงไปด้วย ในขณะที่ย่านความถี่ปานกลางจะมีความไวต่อความผิดปกติหรือการเปลี่ยนแปลงภายในคุณสมบัติของขดลวด หากมีการเพิ่มขึ้นของความถี่หมายถึงการเคลื่อนไหวยของแกนขดลวดลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยปกติหมายถึงการเคลื่อนไหวยของรัศมีในขดลวดชั้นใน ส่วนในย่านความถี่สูงการตอบสนองต่อความถี่สูงของหม้อแปลงมีความไวต่อความผิดปกติที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติของชิ้นส่วนของขดลวดและส่วนเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

การเปรียบเทียบที่ดีที่สุดคือการทำการเชื่อมต่อเครื่องมือวัดในจุดเดียวกันกับที่ทำการวัดในครั้งแรกเพื่อเก็บค่าอ้างอิง โดยหากเป็นหม้อแปลงน้ำมันก็ควรจะมีระดับของน้ำมันใกล้เคียงกับปริมาณที่ทำการวัดเพื่อเก็บค่าอ้างอิงและเป็นน้ำมันชนิดเดิม เนื่องจากชนิดของน้ำมันปริมาณน้ำมันและค่าความชื้นที่อยู่ภายในน้ำมันหม้อแปลง อาจส่งผลต่อการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าได้

2.15 การเปรียบเทียบ

โดยทั่วไปภาพของการตอบสนองความถี่มีจุดมุ่งหมายในการตรวจสอบความเบี่ยงเบน ของการตอบสนองความถี่ในช่วงต่างๆ ซึ่งลักษณะของการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนในความถี่ใหม่อาจแสดงถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้า แม้ว่าการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่สามารถตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าได้ แต่ยังคงต้องการ การวินิจฉัยเพิ่มเติมด้วยการตรวจสอบวิธีอื่นๆ เพื่อนำผลมาวิเคราะห์ร่วมกัน ในการเปรียบเทียบสัญญาณของการตอบสนองความถี่ โดยทั่วไปจะเป็นการส่งผ่านพลังงานจากด้านอินพุตและเอาต์พุต ซึ่งโดยปกติจะมีความต้านทานของขดลวด อัตราส่วนแรงดันระหว่างขดลวดหรือการลดลงของสัญญาณที่ได้จากการวัด โดยในการวัดเพื่อเก็บค่าอ้างอิงมักจะเป็นการเปรียบเทียบกับเฟสอื่นๆ เทียบกับการวัดเพื่อเปรียบเทียบความคล้อยคลึงกันของสัญญาณและในการตรวจสอบจริง เมื่อทำการวัดเพื่อเทียบกับสัญญาณอ้างอิงจะมีความถูกต้องเชื่อถือได้มากขึ้นโดยรูปแบบที่ได้เมื่อนำเปรียบเทียบกับกันจะมีความแม่นยำ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบระหว่างการเปลี่ยนแปลงจากความแตกต่างมาประกอบกันเพื่อหาความเปลี่ยนแปลงภายในหม้อแปลง ซึ่งการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของการส่งผ่านพลังงาน จะมีความสัมพันธ์ต่อความผิดปกติของหม้อแปลง ซึ่งสิ่งเหล่านี้ปกติจะตรวจสอบได้ยากและใช้เวลานาน และการประเมินมักมีความผิดพลาด ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างมาก



ภาพที่ 2.34 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงก่อนและหลังการเกิดการลัดวงจร

ตารางที่ 2.14 ระดับความถี่ที่ใช้พิจารณาความผิดปกติ

ความถี่	ความผิดปกติที่ตรวจพบ
< 2 kHz	การเสียวรูปของแกนเหล็ก การลัดวงจรของขดลวด และ สนามแม่เหล็กตกค้าง
2 kHz - 20 kHz	การเคลื่อนที่ของขดลวดระหว่างขดลวดกับโครงสร้างภายใน
20 kHz - 400 kHz	การเสียวรูปของขดลวดหลัก หรือ ขดลวดในชุดต่างๆ
400 kHz – 1 MHz	การเคลื่อนที่ของขดลวดหลัก และ ขดลวดในชุดต่างๆ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของกราวด์

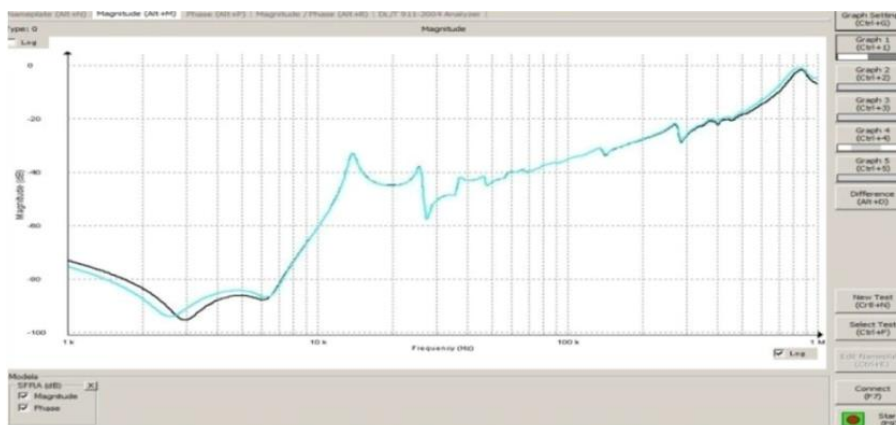
2.16 กรณีศึกษา

2.16.1 การตรวจสอบก่อนและหลังการบำรุงรักษา

การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า ทำได้ในหลายกรณี เช่น ตัวอย่างการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ก่อนและหลังการบำรุงรักษา โดยทำการทดสอบกับหม้อแปลง Single - phase Generator Transformer , 400 kV



ภาพที่ 2.35 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงก่อนการบำรุงรักษา



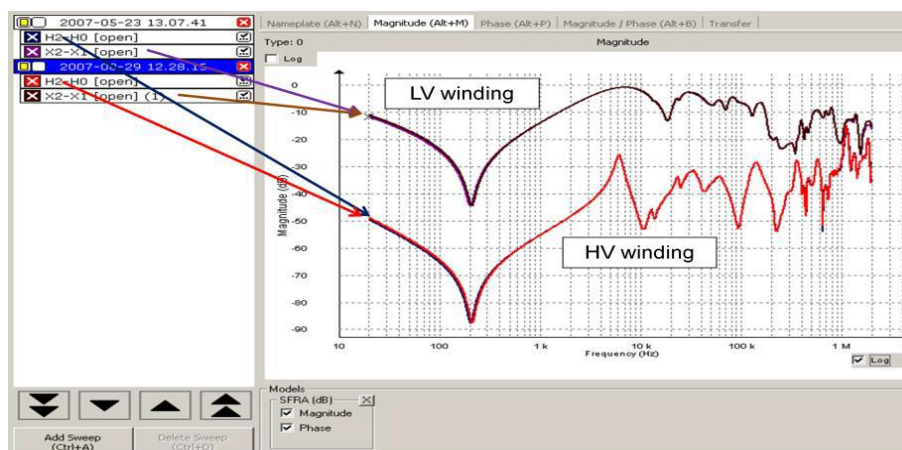
ภาพที่ 2.36 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงหลังการบำรุงรักษา

จากภาพที่ 2.35 เส้นสีฟ้าแสดงการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำการวัดเป็นค่าอ้างอิงขณะเริ่มติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า ส่วนเส้นสีเขียวแสดงการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าหลังจากเกิดความผิดปกติของระบบจึงได้ทำการตรวจสอบ เพื่อหาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งพบว่าในช่วงความถี่ต่ำถึงช่วงความถี่ปานกลางที่ประมาณ 10 Hz – 100 kHz กราฟที่ได้มีความแตกต่างกับค่าอ้างอิงมาก จึงต้องทำการตรวจสอบเพิ่มเติมและบำรุงรักษาซึ่งพบความเสียหายในส่วนของแกนเหล็กและขดลวดภายในหม้อแปลง

จากภาพที่ 2.36 เส้นสีฟ้าแสดงการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำการวัดเป็นค่าอ้างอิงส่วนเส้นสีดำแสดงการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าหลังจากทำการบำรุงรักษา ซึ่งจะเห็นว่ากราฟที่ได้จากการตรวจวัดหลังการบำรุงรักษามีความใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงมากขึ้น

2.16.2 การตรวจสอบหม้อแปลงหลังการเกิดความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในการเกิดการลัดวงจรภายในระบบหรือความผิดปกติใดๆ ที่เกิดขึ้นภายในระบบอาจมีความกังวลว่าความผิดปกติใดๆ ที่เกิดขึ้นในระบบอาจส่งผลกระทบต่อหม้อแปลงที่ทำการจ่ายพลังงาน จึงมีความจำเป็นต้องทำการตรวจสอบโดยในการทดสอบนี้จะทำการตรวจสอบหม้อแปลง Single phase Generator Step – up transformer 105 MVA



ภาพที่ 2.37 การตอบสนองความถี่หม้อแปลงก่อนหลังการเกิดความผิดปกติหม้อแปลงไฟฟ้า

จากภาพที่ 2.37 เป็นการตรวจวัดการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยจากกราฟ เส้นสีม่วงคือค่าอ้างอิงส่วนสีน้ำตาลคือการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าหลังจากเกิดการลัดวงจรของด้านปฐมภูมิ และเส้นสีน้ำเงินคือค่าอ้างอิงส่วนสีแดงคือการตอบสนองความถี่หลังจากเกิดการลัดวงจรของด้านทุติยภูมิ จากการพิจารณากราฟแสดงการตอบสนองความถี่ของทั้งด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิแสดงว่าการเกิดความผิดปกติภายในระบบไม่ได้ส่งผลกระทบต่อตัวหม้อแปลงไฟฟ้า

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

บทนี้นำเสนอขั้นตอน และวิธีดำเนินงาน ในการวิเคราะห์ความสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อนำข้อมูลไปใช้อ้างอิงในการออกแบบหม้อแปลงให้มีอุณหภูมิเป็นไปตามข้อกำหนด โดยทำการทดสอบหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่าย 160 kVA 3 ph 50 Hz 22000-416/240 V Dyn 11 Class A ขดลวดเป็นชนิดทองแดง ตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) การทดสอบทำโดยจ่ายโหลดให้กับหม้อแปลงที่ 0-100% แล้วทำการบันทึกค่าความสูญเสียอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน แล้วทำการหาค่าความสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อนเทียบกับอุณหภูมิโดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

3.1 ขั้นตอนการทดสอบ

3.1.1 การทดสอบประจำ (Routine Test)

การทดสอบประจำนี้ หม้อแปลงจำหน่ายที่ผลิตหรือสร้างขึ้นจะต้องผ่านการทดสอบประจำทุกเครื่อง ลักษณะของการทดสอบให้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิแวดล้อม(Ambient Temperature) ระหว่าง 10 - 40 °C ผลของการทดสอบให้รับผลการทดสอบไปที่อุณหภูมิอ้างอิงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อุณหภูมิอ้างอิงของการปรับผลการทดสอบ

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

3.1.2 ขีดจำกัดของอุณหภูมิเพิ่ม (Limits of Temperature Rise)

ตามมาตรฐาน IEC 60076-2 ได้กำหนดขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงที่ระบายความร้อนด้วยน้ำมันโดยอากาศธรรมชาติ(Oil-Immersed Self-Cooled Transformer) หรือตัวย่อ ONAN โดยกำหนดให้อุณหภูมิแวดล้อม(Ambient Temperature) สูงสุดเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส สถานที่ติดตั้งใช้งานไม่เกิน 1000 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล กรณีที่สถานที่ติดตั้งใช้งานสูงเกิน 1000 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยจะลดลง 1 องศาเซลเซียสต่อระยะความสูงทุกๆ 400 เมตร สำหรับแกนเหล็กและชิ้นส่วนอื่นๆ อุณหภูมิต้องไม่สูงถึงค่าที่จะทำให้แกนเหล็กหรือส่วนที่ติดกันเสียหาย

ตารางที่ 3.2 ขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงชนิดจุ่มน้ำมัน

	อุณหภูมิเพิ่ม (K)
น้ำมันส่วนบน (Top Oil)	ไม่เกิน 60
ขดลวด	ไม่เกิน 65

3.1.3 ขีดจำกัดของอุณหภูมิเพิ่มตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

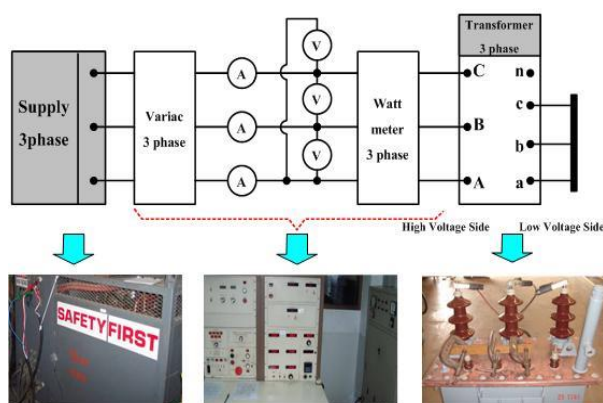
ตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้กำหนดขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่าย โดยกำหนดให้อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temperature) เฉลี่ย 40 องศาเซลเซียส สูงสุดเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส โดยอ้างอิงมาจากมาตรฐาน (IEC 60076-2) สถานที่ติดตั้งใช้งานไม่เกิน 1000 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล

ตารางที่ 3.3 ขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน PEA

	อุณหภูมิเพิ่ม (K)
น้ำมันส่วนบน (Top Oil)	ไม่เกิน 50
ขดลวด	ไม่เกิน 55

1. หม้อแปลงที่นำมาทำการทดสอบ เป็นหม้อแปลงชนิดจุ่มในน้ำมันที่ใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคขนาด 160 kVA 3ph 50Hz 22000-416/240V Dyn 11 Class A ขดลวดเป็นชนิดทองแดง

2. การทดสอบจะทำการป้อนแรงดันด้านแรงสูงให้มีกระแสไหลตั้งแต่ 0-100% ของกระแสที่พิกัด แล้วทำการบันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน วงจรที่ใช้ในการทดสอบดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 วงจรการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงโดยวิธีลัดวงจร

3.2 การคำนวณอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลง

ในการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงจำหน่าย สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

3.2.1 อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด(Average winding temperature rise)

สามารถหาได้จากสมการ

$$\Theta_{wr} = \Theta_{w2} - \Theta_a \quad (3.1)$$

$$\Theta_{w2} = \frac{Rt_2}{Rt_1} (k + \Theta_{w1}) - k \quad (3.2)$$

โดยที่

Θ_{wr}	คือ	อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด, °C
Θ_a	คือ	อุณหภูมิแวดล้อม, °C
Θ_{w2}	คือ	อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่จุดตัดไฟ, °C
Θ_{w1}	คือ	อุณหภูมิแวดล้อมขณะวัดความต้านทาน ขดลวดที่จุดเริ่มต้น, °C
R_{t1}	คือ	ความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิแวดล้อม, Ω
R_{t2}	คือ	ความต้านทานของขดลวดที่จุดตัดไฟ, Ω
K	คือ	234.5 สำหรับทองแดง และ 224.5 สำหรับอลูมิเนียม

3.2.2 อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด(Top oil temperature rise at rated load, Θ_{or}), สามารถหาได้จากสมการ

$$\Theta_{or} = \Theta_o - \Theta_a \quad (3.3)$$

โดยที่

Θ_{or}	คือ	อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน, °C
Θ_o	คือ	อุณหภูมิของน้ำมันด้านบน, °C

บทที่ 4

ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบหม้อแปลงตามวงจรในบทที่ 3 ได้ทำการเก็บผลการทดสอบค่าอุณหภูมิที่พิกัดโหลด และค่าความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามระยะเวลา ซึ่งมีผลการทดสอบแสดงได้ ดังนี้

4.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่พิกัดโหลด

Capacity(kVA)	160
No load losses(W)	249.2
Load losses(W)	1921.5
Total losses(W)	2170.7
Hottest spot of top oil($^{\circ}\text{C}$)	72.0
Hottest spot of HV.wdg. ($^{\circ}\text{C}$)	76.67
Hottest spot of LV.wdg. ($^{\circ}\text{C}$)	74.28
Top oil temp. rise($^{\circ}\text{C}$)	41.0
HV.wdg. temp. rise($^{\circ}\text{C}$)	48.67
LV.wdg. temp. rise($^{\circ}\text{C}$)	46.28

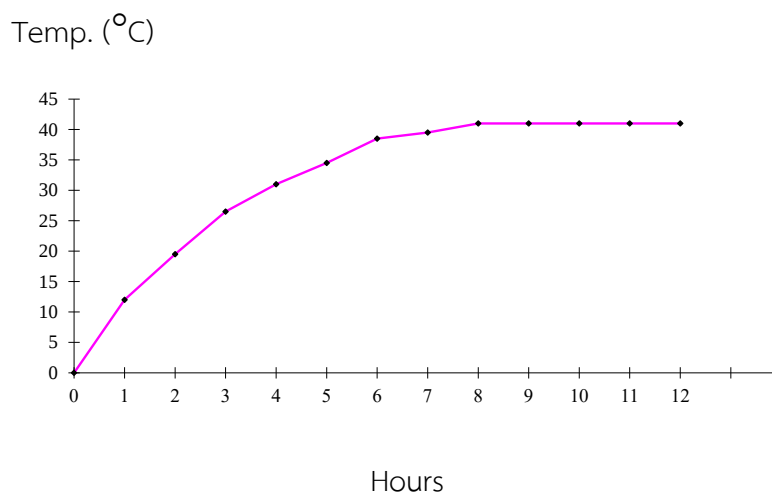
จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิที่พิกัดโหลดของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ค่าสูญเสียขณะไม่มีโหลดเก็บผลได้ที่ 249.3 W ค่าสูญเสียขณะมีโหลด 1924.5 W คิดเป็นค่าสูญเสียทั้งหมด 2170.7 W และสามารถคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด

	ขดลวดแรงดันต่ำ	ขดลวดแรงดันสูง
Θ_{w1} ($^{\circ}\text{C}$)	28.00	28.00
R_{t1} (Ω)	0.008032	31.65
Θ_{w2} ($^{\circ}\text{C}$)	74.28	76.67
R_{t2} (Ω)	0.00922	38.23
Θ_{wr} ($^{\circ}\text{C}$)	46.28	48.67

จากตารางที่ 4.2 ทำให้ทราบถึงอุณหภูมิขดลวดและน้ำมันของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะใช้งานที่พิกัดโดยมีค่าต่างๆ ดังนี้

1. อุณหภูมิเพิ่มของขดลวด (Θ_{wr}) โดยมาตรฐานการไฟฟ้าภูมิภาค (PEA) กำหนดให้มีค่าสูงสุดไม่เกิน 55 °C จากการทดสอบจะได้ค่าสูงสุดคือขดลวดแรงดันสูงมีค่า 49.67 °C
2. อุณหภูมิของน้ำมันด้านบน (Θ_o) , มีค่าเท่ากับ 73.0 °C
3. อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน Θ_{or} โดยมาตรฐานการไฟฟ้าภูมิภาค (PEA) กำหนดให้มีค่าสูงสุดไม่เกิน 50 °C จากการทดสอบจะได้ค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 41 °C



ภาพที่ 4.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลงขณะจ่ายโหลด 0-100% ของพิกัดโหลด

% Load (%)	No load loss (W)	load loss(W)	Total loss(W)	Top oil rise(° C)	Surface sq.cm./w
0	249.2	0.0	249.2	10	226.04
10	249.2	19.2	268.4	19	209.85
20	249.2	76.9	326.1	22	172.75
30	249.2	172.9	422.1	27	133.44
40	249.2	307.4	556.6	30	101.19
50	249.2	480.4	729.6	33	77.21
60	249.2	691.7	940.9	35	59.86
70	249.2	941.5	1190.7	37	47.31
80	249.2	1229.8	1479.0	39	38.09
90	249.2	1556.4	1805.6	40	31.20
100	249.2	1921.5	2170.7	41	25.95

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลงขณะจ่ายโหลด ตั้งแต่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ขณะจ่ายโหลด 0 เปอร์เซ็นต์ หรือไม่มีโหลดในวงจรการทำงาน มีค่าสูญเสียอยู่ที่ 249.2 W อุณหภูมิของน้ำมันด้านบนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส พื้นผิวการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลง เท่ากับ 226.04 sq.cm./w ขณะจ่ายโหลด 10 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูญเสียรวมอยู่ที่ 268.4 W อุณหภูมิของน้ำมันด้านบนเท่ากับ 19 องศาเซลเซียส พื้นผิวการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลง เท่ากับ 209.85 sq.cm./w ขณะจ่ายโหลด 20 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูญเสียรวมอยู่ที่ 326.1 W อุณหภูมิของน้ำมันด้านบนเท่ากับ 22 องศาเซลเซียส พื้นผิวการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลง เท่ากับ 172.75 sq.cm./w ขณะจ่ายโหลด 30 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูญเสียรวมอยู่ที่ 422.1 W อุณหภูมิของน้ำมันด้านบนเท่ากับ 27 องศาเซลเซียส พื้นผิวการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลง เท่ากับ 133.44 sq.cm./w ขณะจ่ายโหลด 40 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูญเสียรวมอยู่ที่ 556.6 W อุณหภูมิของน้ำมันด้านบนเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส พื้นผิวการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลง เท่ากับ 101.19 sq.cm./w ขณะจ่ายโหลด 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูญเสียรวมอยู่ที่ 729.6 W อุณหภูมิของน้ำมันด้านบนเท่ากับ 33 องศาเซลเซียส พื้นผิวการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลง เท่ากับ 77.21 sq.cm./w ขณะจ่ายโหลด 60 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูญเสียรวมอยู่ที่ 940.9 W อุณหภูมิของน้ำมันด้านบนเท่ากับ 35 องศาเซลเซียส พื้นผิวการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลง เท่ากับ 59.86 sq.cm./w ขณะจ่ายโหลด 70 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูญเสียรวมอยู่ที่ 1190.7 W อุณหภูมิของน้ำมันด้านบนเท่ากับ 37 องศาเซลเซียส พื้นผิวการ

ถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลง เท่ากับ 47.31 sq.cm./w ขณะจ่ายโหลด 80 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูญเสียรวมอยู่ที่ 1479.0 W อุณหภูมิของน้ำมันด้านบนเท่ากับ 39 องศาเซลเซียส พื้นผิวการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลง เท่ากับ 38.09 sq.cm./w ขณะจ่ายโหลด 90 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูญเสียรวมอยู่ที่ 1805.6 W อุณหภูมิของน้ำมันด้านบนเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส พื้นผิวการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลง เท่ากับ 31.20 sq.cm./w และ ขณะจ่ายโหลด 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูญเสียรวมอยู่ที่ 2170.7 W อุณหภูมิของน้ำมันด้านบนเท่ากับ 41 องศาเซลเซียส พื้นผิวการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลง เท่ากับ 25.95 sq.cm./w เมื่อจ่ายโหลดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความสูญเสีย อุณหภูมิ น้ำมันด้านบนเพิ่มขึ้น แต่พื้นที่ผิวระยะการระบายความร้อนของหม้อแปลงจะลดลง ในทางตรงข้ามกัน หากลดปริมาณโหลดลง ค่าความสูญเสีย และอุณหภูมิของน้ำมันด้านบนจะลดลงตาม แต่ระยะการระบายความร้อนของหม้อแปลงจะเพิ่มขึ้น

บทที่ 5

สรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการทดสอบ คำนวนและวิเคราะห์ผลอุณหภูมิของหม้อแปลงต่อพื้นที่ผิวขณะจ่ายโหลด โดยจากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มโหลดที่ 100 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าสูญเสียรวมอยู่ที่ 2170.7 W อุณหภูมิของน้ำมันด้านบนเท่ากับ 41 องศาเซลเซียส พื้นผิวการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลง เท่ากับ 25.95 sq.cm./w เมื่อจ่ายโหลดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความสูญเสียอุณหภูมิน้ำมันด้านบนเพิ่มขึ้น แต่พื้นผิวระยะการระบายความร้อนของหม้อแปลงจะลดลง ในทางตรงข้ามกันหากลดปริมาณโหลดลง ค่าความสูญเสียอุณหภูมิของน้ำมันด้านบนก็จะลดลงตาม แต่ระยะการระบายความร้อนของหม้อแปลงก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งการทดสอบนี้ถือได้ว่าหม้อแปลงขนาด 160 kVA 3ph 50Hz 22000-416/240V Dyn 11 Class A ขดลวดเป็นแบบชนิดทองแดงเครื่องนี้ มีการระบายความร้อนได้ดี อุณหภูมิไม่เกินมาตรฐานที่ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(PEA) กำหนดไว้อุณหภูมิน้ำมันด้านบนต้องไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส และ มาตรฐาน IEC 60076-2 กำหนดไว้อุณหภูมิน้ำมันด้านบนต้องไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส โดยผลของการวิเคราะห์ตามตัวอย่างข้างต้นจะเป็นเครื่องมือช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถวิเคราะห์ออกแบบ และตัดสินใจเลือกใช้พื้นที่ผิวระบายความร้อนต่อค่าความสูญเสียของหม้อแปลง เพราะจะมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการจ่ายโหลดของหม้อแปลง ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลอ้างอิงสำหรับใช้เป็นแนวทางในการใช้งาน และทำการวิเคราะห์ออกแบบหม้อแปลงให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะ ในการพัฒนาต่อไปคือ สามารถทดสอบหม้อแปลงที่กระแสโหลดต่างๆ นอกเหนือจากวิทยานิพนธ์หรือทดสอบในสภาวะโหลดเกิน ก็จะทำให้มีข้อมูลสำหรับใช้อ้างอิงในการออกแบบหาพื้นที่ผิวในการระบายความร้อนที่มากขึ้นกว่าเดิม

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC354, *Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformer*, 2006.
- [2] บุญเลิศ สี่อเฉย, “การออกแบบและการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่าย” : พิมพ์ครั้งที่ 8. สาโรจน์ปรีดิ์ 2562.
- [3] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, “หม้อแปลงระบบจำหน่ายสามเฟส 22/33 kV”, สืบค้นเมื่อวันที่ 22 ธันวาคม 2564, จาก <https://www.pea.co.th>
- [4] IEC 60076-5, *Power Transformer Part 5 : Ability to withstand Short circuit*, 2006.
- [5] IEC 60076-2, *Power Transformer Part 2 : Temperature Rise*, 2011.
- [6] เกรียงไกร กิจสวัสดิ์, บุญเลิศ สี่อเฉย, อติศักดิ์ มนต์ประภัสสร, สมมาตร ปิยะพงศ์เดชา, มณฑล สิลาจินดาไกรฤกษ์, “การวิเคราะห์ความสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า,” การประชุมวิชาการระดับชาติสหวิทยาการเอเชียอาคเนย์ 2565 ครั้งที่ 9, 24-25 มิถุนายน 2565, หน้า 321-328

ภาคผนวก ก

หลักเกณฑ์การตรวจประเมินรายผลิตภัณฑ์
ของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001 วันที่ 24/04/2563

หลักเกณฑ์การตรวจประเมินรายผลิตภัณฑ์ ของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

สารบัญ

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No. PEA-TRAN-001
		วันที่ 24/04/2563

เรื่อง	หน้า
1. บทนำ	3
2. เอกสารอ้างอิง	3
3. ขอบข่าย	3
4. ขั้นตอนการขึ้นทะเบียนและรับรองหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย	3
5. การจำแนกผลิตภัณฑ์	6
6. การตรวจสอบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย	6
7. การยอมรับผลตรวจสอบและ/หรือทดสอบ	12
8. ใบรับรอง และข้อตกลงในการรับรองผลิตภัณฑ์	12
9. ข้อกำหนดเพิ่มเติมสำหรับผู้ได้รับการรับรองและขึ้นทะเบียน	13
10. การตรวจติดตามผล	13
11. การต่ออายุใบรับรอง	14
12. การพักใช้ หรือเพิกถอนใบรับรอง	15
ภาคผนวก ก ตัวอย่างรายการหัวข้อแสดงคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายแบบ 1 เฟส	16
ภาคผนวก ข ตัวอย่างรายการหัวข้อแสดงคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายแบบ 3 เฟส	21
ภาคผนวก ค ตัวอย่างรายการ The critical documents of the transformers	26
ภาคผนวก ง ตาราง Watt Losses/Percent short-circuit impedance	27
ภาคผนวก จ ตาราง Temperature rise test ตาราง Dielectric tests และตาราง Tolerances for lightning impulse wave shape	28
ภาคผนวก ฉ ตำแหน่งและระยะ Spot checks สำหรับ Dry film thickness test	30
ภาคผนวก ช เกณฑ์การประเมินเพื่อการขึ้นทะเบียน สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย	34
ภาคผนวก ซ รายการเครื่องมือตรวจสอบและทดสอบประจำ	36
ภาคผนวก ฌ รายการตรวจสอบและทดสอบ	37
ภาคผนวก ฎ การพิจารณาข้อบกพร่องในการรับรองและการขึ้นทะเบียนหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย	39

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No. PEA-TRAN-001 วันที่ 24/04/2563
--	--	---

1. บทนำ

กฟภ. ได้จัดทำหลักเกณฑ์ฉบับนี้สำหรับให้การขึ้นทะเบียนและรับรองหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์ระเบียบ ข้อกำหนด และมาตรฐานที่ กฟภ. กำหนด โดยจะมีการกำหนดขั้นตอนการตรวจสอบเพื่อ การขึ้นทะเบียนและรับรอง การตรวจสอบระบบควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ การสุ่มหรือการคัดเลือกผลิตภัณฑ์ การตรวจสอบและทดสอบ การตัดสินใจผลการรับรอง การตรวจติดตามภายหลังการได้รับการรับรอง การแสดง เครื่องหมายรับรองผลิตภัณฑ์ และการขึ้นทะเบียน

2. เอกสารอ้างอิง

หลักเกณฑ์ฉบับนี้กำหนดขอบข่ายการให้การรับรองหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย อ้างอิงตามมาตรฐานในการตรวจสอบและทดสอบ เพื่อการขึ้นทะเบียนและรับรองหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

3. ขอบข่าย

หลักเกณฑ์ฉบับนี้กำหนดขอบข่ายการให้การรับรองหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายดังต่อไปนี้

- 3.1 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย พิกัดกำลัง 30 kVA 1 เฟส แบบน้ำมัน ระบายความร้อนด้วยอากาศ มีการออกแบบและสร้างให้สามารถทนการสั่นไหวจากภายนอก เหมาะสมสำหรับการติดตั้งภายนอก ในระบบแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 19 kV หรือ 22 kV 50 Hz
- 3.2 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย พิกัดกำลัง 50 kVA, 100 kVA, 160 kVA, 250 kVA, 3 เฟส แบบน้ำมัน ระบายความร้อนด้วยอากาศ มีการออกแบบและสร้างให้สามารถทนการสั่นไหวจากภายนอก เหมาะสมสำหรับการติดตั้งภายนอก ในระบบแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 22 kV หรือ 33 kV 50 Hz

4. ขั้นตอนการขึ้นทะเบียนและรับรองหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

หากไม่ได้มีการกำหนดอ้างอิงเอกสารหลักเกณฑ์ระเบียบ ข้อกำหนด และมาตรฐานที่จำเพาะเจาะจงไว้ในเอกสารฉบับนี้ ให้ใช้หลักเกณฑ์ต่างๆที่ได้กำหนดไว้โดยหน่วยรับรองและ กฟภ. เพื่อประกอบการควบคุมกระบวนการขึ้นทะเบียนและรับรองผลิตภัณฑ์

หมายเหตุ: ตลอดกระบวนการรับรองผลิตภัณฑ์และการขึ้นทะเบียนกับ กฟภ. ผู้ยื่น หรือผู้ได้รับการรับรอง ไม่มีสิทธิ์เรียกร้องการชดเชยความเสียหายใดๆที่เกิดขึ้นจากหน่วยรับรองในการยุติการดำเนินการ เนื่องจากสาเหตุที่ผู้ยื่นหรือผู้ได้รับการรับรองไม่ปฏิบัติตามหลักเกณฑ์ต่างๆที่กำหนด เพิกเฉย ไม่ให้ความร่วมมือ หรือที่คล้ายกัน ในการดำเนินการใดๆในกระบวนการรับรองผลิตภัณฑ์ที่ส่งผลให้หน่วยรับรองไม่สามารถปฏิบัติตามหลักเกณฑ์ที่กำหนดได้ และหากมีผลทำให้หน่วยรับรองถูกดำเนินการทางกฎหมายจาก กฟภ. อันเนื่องมาจากผลกระทบที่ผู้ยื่น หรือผู้ได้รับการรับรองกระทำการไม่เป็นไปตามหลักเกณฑ์ต่างๆที่กำหนด หน่วยรับรองสามารถเรียกร้องต่อผู้ยื่นหรือผู้ได้รับการรับรองให้รับผิดชอบต่อการดำเนินการทางกฎหมาย เช่น ค่าระงับปรับ ค่าเสียหาย หรือที่คล้ายกันต่อ กฟภ. โดยรวมถึงค่าใช้จ่ายอื่นใดที่หน่วยรับรองต้องรับผิดชอบระหว่างการดำเนินการทางกฎหมาย ทั้งหมดจนสิ้นสุดคดี หากเป็นเหตุให้หน่วยรับรองเสื่อมเสียชื่อเสียง หน่วยรับรองมีสิทธิ์เรียกร้องการชดเชยไปยังผู้ยื่นหรือผู้ได้รับการรับรอง การดำเนินคดีใดๆให้เป็นไปตามหลักกฎหมายไทย

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001
		วันที่ 24/04/2563

- 4.1 การควบคุมหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์การขึ้นทะเบียนและรับรองผลิตภัณฑ์ (PEA PRODUCT ACCEPTANCE) รหัส PEA-PC-001
- 4.2 การตรวจสอบควบคุมคุณภาพ ณ สถานที่ของผู้ผลิต หรือ โรงงาน ให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์การตรวจคุณภาพโรงงาน (Factory Inspection Requirement) รหัส PEA-FI-001 รวมถึงหลักเกณฑ์และเอกสารประกอบอื่นที่เกี่ยวข้อง
- 4.3 ในการขอรับการตรวจสอบรับรองและการขึ้นทะเบียนผลิตภัณฑ์ให้ยื่นเอกสาร ข้อมูล และหลักฐานต่างๆสำหรับการขึ้นทะเบียนและรับรองผลิตภัณฑ์ตามที่กำหนดในข้อ 5.2.1 และข้อ 5.2.2 ของหลักเกณฑ์ฯ PEA-PC-001 และเอกสารเพิ่มเติมสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ดังต่อไปนี้
- รายการและรายละเอียดแสดงคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย โดยอ้างอิงตามข้อกำหนดทางเทคนิค (Specification) No.RTRN-047/2561 หรือ No.RTRN-035/2561 ทั้งนี้กรณีที่มีการปรับปรุงเอกสารหรือเปลี่ยนแปลง ให้อ้างอิงตามประกาศฉบับล่าสุดที่ กฟภ. ได้ดำเนินการอนุมัติและประกาศใช้
 - เอกสารระบุความสามารถในการผลิต สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย เป็นรายสัปดาห์ หรือรายเดือน หรือตามช่วงเวลาที่เหมาะสม สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายแต่ละพิกัดกำลัง
 - เอกสารประเมินตนเองตามรูปแบบที่หน่วยรับรองกำหนด
 - รายละเอียดการให้ข้อมูลคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายให้เป็นไปตาม No.RTRN-047/2561 หรือ No.RTRN-035/2561 และแนวทางการให้ข้อมูลเป็นไปตามตัวอย่างตาม ภาคผนวก ก ข และ ค ของหลักเกณฑ์ฉบับนี้

หมายเหตุ:

1. เอกสาร ข้อมูลต่างๆที่กำหนด ในน้ำสัจจริง หรือสำเนาที่รับรองความถูกต้องจากผู้มีอำนาจตามกฎหมายของผู้ยื่นคำขอซึ่งรวมถึงหนังสือมอบอำนาจ ทั้งนี้ถ้าของหนังสือมอบอำนาจกำหนดให้ไม่เกิน 2 ปีนับตั้งแต่วันที่ลงนามในหนังสือมอบอำนาจ
2. กรณีในระหว่างดำเนินการตรวจประเมินพบความไม่สอดคล้อง หรือความไม่ครบถ้วนของเอกสารที่เกี่ยวข้องใดๆ หน่วยรับรองสามารถร้องขอเอกสารและข้อมูลเพิ่มเติมได้ตามความเหมาะสมเพื่อประกอบการพิจารณาดำเนินการ ผู้ยื่นคำขอต้องให้ความร่วมมือในการส่งมอบข้อมูลและเอกสารต่างๆประกอบการดำเนินการภายในระยะเวลาที่กำหนดโดยมิชักช้า หากไม่ดำเนินการตามการร้องขอ หน่วยรับรองจะดำเนินการยุติการรับรองผลิตภัณฑ์ และพิจารณาพักใช้ หรือเพิกถอนการรับรองผลิตภัณฑ์ (ถ้าเกี่ยวข้อง)

- 4.4 การขึ้นทะเบียนและการควบคุมผู้ได้รับการรับรองที่เป็นผู้ขึ้นทะเบียนกับ กฟภ. ให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์การควบคุมผู้ได้รับการรับรองและผู้ขึ้นทะเบียน รหัส PEA-AVL-001

หมายเหตุ: ผู้ได้รับการรับรองที่ไม่ได้ขึ้นทะเบียนกับ กฟภ. ไม่สามารถแสดงเครื่องหมายและรหัสตามข้อกำหนด ระบบ และหลักเกณฑ์ที่เกี่ยวข้องที่อ้างถึงจากเอกสารฉบับนี้ได้

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No. PEA-TRAN-001
		วันที่ 24/04/2563

4.5 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายทุกตัวหรือทุกหน่วยต้องมีการแสดงข้อมูลชนิดหรือแบบรุ่นที่ได้กำหนดหรือระบุไว้ตามหลักเกณฑ์ฉบับนี้ การแสดงเครื่องหมายรับรองผลิตภัณฑ์ รหัสผลิตภัณฑ์ของ กฟภ. และเครื่องหมายรับรองผลิตภัณฑ์ของหน่วยรับรองที่ กฟภ. แต่งตั้ง ให้เป็นไปตามเอกสารหลักเกณฑ์การใช้เครื่องหมายรับรองผลิตภัณฑ์ รหัส PEA-MARK-001 โดยให้แสดงในตำแหน่งที่เห็นได้ชัดเจน ไม่มีสิ่งบดบัง

4.6 ตามหลักเกณฑ์ฉบับนี้ ไม่ให้แสดงเครื่องหมายรับรองผลิตภัณฑ์รวมถึงรหัสผลิตภัณฑ์บนหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายด้วยวัสดุพลาสติก กระดาษ สติกเกอร์ วัสดุที่อ่อนตัวได้ง่ายจากความร้อน วัสดุที่เสื่อมสภาพได้ง่าย และที่คล้ายกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อการคงอยู่และความคงทนของเครื่องหมายรับรองผลิตภัณฑ์รวมถึงรหัสผลิตภัณฑ์

หมายเหตุ: ตัวอย่างการแสดงเครื่องหมายรับรองผลิตภัณฑ์และรหัสผลิตภัณฑ์ ใช้การอิงเลขหรือลงบนวัสดุโลหะ เป็นต้น

4.7 เครื่องหมายรับรองผลิตภัณฑ์รวมถึงรหัสผลิตภัณฑ์ต้องไม่ลบเลือนตลอดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย โดยหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายทุกหน่วยให้แสดงป้ายเครื่องหมายรับรองผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดอย่างน้อย 150 mm X 150 mm โดยมีมิติและสัดส่วนของเครื่องหมายของ กฟภ. ต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 130 mm ตามมิติด้านยาวสุด ระยะการแสดงผลเครื่องหมายรับรองผลิตภัณฑ์ของ กฟภ. ให้ห่างจากขอบของป้ายเครื่องหมายด้านบนและล่างประมาณ 10 mm และให้ปรับสัดส่วนนั้นสอดคล้องกับมิติที่กำหนดในหลักเกณฑ์ รหัส PEA-MARK-001

ทั้งนี้การวางตำแหน่งของเครื่องหมายการรับรองของหน่วยรับรอง ให้วางที่กึ่งกลางด้านล่างหรือด้านข้างขวาตามความเหมาะสมจากเครื่องหมายรับรองผลิตภัณฑ์ของ กฟภ. โดยให้มีระยะขอบระหว่างเครื่องหมายรับรองผลิตภัณฑ์ของ กฟภ. และหน่วยรับรองห่างกันอย่างน้อย 10 mm

มิติหลักของเครื่องหมายการรับรองของหน่วยรับรองต้องไม่น้อยกว่า 80 % และไม่เกินกว่ามิติเครื่องหมายรับรองผลิตภัณฑ์ของ กฟภ. ด้านที่แคบที่สุด

การแสดงผลเครื่องหมาย ให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์และเงื่อนไขที่หน่วยรับรองนั้นๆกำหนด และตามหลักเกณฑ์ รหัส PEA-MARK-001 ในส่วนที่เกี่ยวข้อง

ตำแหน่งในการแสดงป้ายเครื่องหมายการรับรองผลิตภัณฑ์ให้แสดงที่เปลือกหุ้มของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายในด้านที่ไม่ใช่ด้านที่ติดตั้งหันเข้ากับแท่นวาง เสา ก้าวแพง หรือคล้ายกัน ที่มีผลทำให้ปิดบังป้ายเครื่องหมายรับรองผลิตภัณฑ์ และการแสดงป้ายเครื่องหมายรับรองผลิตภัณฑ์ของ กฟภ. จะต้องอยู่ใกล้กับการแสดงพิกัดกำลังที่เปลือกหุ้มหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายและต้องไม่ส่งผลกระทบกับการเป็นไปตามมาตรฐานและหลักเกณฑ์ที่ กฟภ. และ/หรือ หน่วยรับรองกำหนด

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001 วันที่ 24/04/2563

5. การจำแนกผลิตภัณฑ์

Item	Number of phase	PEA Material No.	Rated Power (kVA)	Primary-Secondary Voltage (V)	Type	Vector Group	Model
1	1	1050000011	30	22,000 – 480/240	Withstand	-	ตามที่ผู้ยื่นกำหนด
2		1050000206		19,000 – 480/240	short-circuit		
3	3	1050010066	50	22,000 – 416/240	Permanently sealed and completely oil filled system (without gas cushion), withstand short-circuit	Dyn11	
4		1050010138		33,000 – 416/240			
5		1050010067	100	22,000 – 416/240			
6		1050010139		33,000 – 416/240			
7		1050010068	160	22,000 – 416/240			
8		1050010140		33,000 – 416/240			
9		1050010069	250	22,000 – 416/240			
10		1050010141		33,000 – 416/240			

6. การตรวจสอบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

- 6.1 สภาวะแวดล้อมในการทดสอบ ให้อ้างอิงตามมาตรฐานหม้อแปลงไฟฟ้าที่กำหนดในแต่ละหัวข้อ หากหัวข้อทดสอบหรือตรวจสอบใดไม่มีกำหนดไว้ ให้ใช้ตามตารางดังต่อไปนี้

อุณหภูมิแวดล้อม	ความชื้น	ความดันบรรยากาศ
ไม่เกิน 40 °C	ไม่เกิน 90 %RH	86 – 106 kPa

หมายเหตุ: หาก กฟภ. มีการกำหนดสภาวะไว้เป็นอย่างอื่นตามเอกสารทางเทคนิคหรือข้อกำหนดเฉพาะอื่นใด ให้อ้างอิงตามข้อกำหนดนั้นที่เกี่ยวข้อง เป็นลำดับต้น

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001 วันที่ 24/04/2563

6.2 การคัดเลือกตัวอย่างสำหรับการตรวจสอบรับรอง ให้เป็นไปตามตารางดังต่อไปนี้

Item	Number of phase	Rated Power (kVA)	Voltage (V)	Sample number / Model
1	1	30	22,000 – 480/240	1
2			19,000 – 480/240	1
3	3	50	22,000 – 416/240	1
4			33,000 – 416/240	1
5		100	22,000 – 416/240	1
6			33,000 – 416/240	1
7		160	22,000 – 416/240	1
8			33,000 – 416/240	1
9		250	22,000 – 416/240	1
10			33,000 – 416/240	1

หมายเหตุ: ให้การขึ้นทะเบียนและรับรองผลิตภัณฑ์ เฉพาะหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายขนาด 30 kVA, 50 kVA, 100 kVA, 160 kVA และ 250 kVA เท่านั้น

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001 วันที่ 24/04/2563

6.3 การตรวจสอบและทดสอบเพื่อการรับรอง

สำหรับ Routine test ให้ดำเนินการดังหัวข้อตามตารางต่อไปนี้

Group	Test items	ระเบียบ มาตรฐาน/ ข้อกำหนด	Remark
T1	Total Weight and Dimensions (ดูภาคผนวก ก และ ข)	PEA RTRN-047-2561 และ RTRN-035-2561	- เกณฑ์ ± 5 % of weight declared value(s) ตาม Performance data and guarantee จากผู้ผลิต - เกณฑ์ ± 3 % of dimension declared value(s) ตาม Performance data and guarantee จากผู้ผลิต - Dimensions ให้พิจารณามิติภายนอกที่ สำคัญของหม้อแปลง
T2	Name plate		ให้ทำการเพิ่มชื่อรุ่นเข้าไปใน Name plate การตรวจประเมินทำโดยการตรวจพินิจ
T3	(1) Measurement of voltage ratio and check of phase displacement	IEC 60076-1	วิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน IEC - ค่า voltage ratio ให้วัดทุก tab และค่าที่วัด ได้ต้องแตกต่างจากค่าที่ระบุไม่เกิน $\pm 0.5\%$ - กรณีหม้อแปลง 3 เฟส Phase displacement ต้องเป็นไปตามที่ระบุ
	(2) Measurement of winding resistance 2.1) Single phase transformer 2.2) Three phase transformer	IEC 60076-1	วิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน IEC - การวัดความต้านทานให้วัดทุก tab โดยค่า ความต้านทานแต่ละเฟสต้องแตกต่างจาก ค่าเฉลี่ยของทุกชุดวัดไม่เกิน ± 0.5 % (สำหรับหม้อแปลง 3 เฟส) - การพิจารณาค่าความต้านทานให้ทำการ Correction ไปที่ อุณหภูมิอ้างอิง 75°C

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001 วันที่ 24/04/2563

Group	1. Test items	ระเบียบ มาตรฐาน/ ข้อกำหนด	Remark
	(3) Applied voltage test	IEC 60076-3 และ ภาคผนวก ง	วิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน IEC และ ประเมินตามภาคผนวก ง ตาราง ง.2 (หัวข้อ Power frequency for 1 min)
	(4) Induced voltage withstand test	IEC 60076-3	วิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน IEC
	(5) Measurement of no-load loss and current at 90%, 100% and 110% of rated voltage	IEC 60076-1 และ ภาคผนวก ง	วิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน IEC - ค่า no-load loss ¹ ที่ TAP 3 ผลการทดสอบ ต้องไม่เกินค่าในตารางภาคผนวก ง และต้อง ไม่เกิน +5 % ² จากค่าที่วัดหรือระบุจากผู้ผลิต - ค่า no-load current ¹ ที่ TAP 3 ต้องไม่เกิน +30 % จากค่าที่ระบุตาม Performance data and guarantee จากผู้ผลิต หมายเหตุ: 1. ประเมินจากแรงดันไฟฟ้าทดสอบ 100 % 2. อ้างอิง "The European commission working document Directive 2009/125/EC
	(6) Measurement of short-circuit impedance and load loss	IEC 60076-1 และ ภาคผนวก ง	วิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน IEC - ค่า short-circuit impedance ที่ TAP 3 ต้องไม่เกิน ± 10 % จากค่าที่ระบุในตาราง ภาคผนวก ง - ค่า load loss ที่ TAP 3 ผลการทดสอบต้อง ไม่เกินค่าในตาราง ภาคผนวก ง และต้อง แตกต่างจากค่าที่วัดที่โรงงานไม่เกิน +5 % [*] [*] อ้างอิง "The European commission working document Directive 2009/125/EC
	(7) Leak testing with pressure	IEC 60076-1	วิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน IEC โดย ตรวจประเมินแล้วต้องไม่เกิดการรั่วของน้ำมัน

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001 วันที่ 24/04/2563

สำหรับ Type test ให้ดำเนินการดังหัวข้อตามตารางต่อไปนี้

Group	Test items	ระเบียบ มาตรฐาน/ ข้อกำหนด	Remark
T4	Routine test T3 except (7) (before short-circuit)	IEC 60076-1, IEC 60076-3, ภาคผนวก ง และ ภาคผนวก จ	วิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน IEC ประเมินตามภาคผนวก ง และ ภาคผนวก จ ตาราง จ.2 (หัวข้อ Power frequency for 1 min)
T5	Temperature rise	IEC 60076-2 และ ภาคผนวก จ	วิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน IEC และประเมินตามภาคผนวก จ ตาราง จ. 1
T6	Short-circuit withstand test with Full wave lightning impulse test	IEC 60076-5, IEC 60076-3, IEC 60060-1 และ ภาคผนวก จ	วิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน IEC ประเมินตามภาคผนวก จ ตาราง จ.2 (หัวข้อ Full wave lightning impulse) และ ตาราง จ.3
T7	Routine test T3 except (7) (after short-circuit)	IEC 60076-1 , IEC 60076-3, ภาคผนวก ง และ ภาคผนวก จ	วิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน IEC ประเมินตามภาคผนวก ง และ ภาคผนวก จ ตาราง จ.2 (หัวข้อ Power frequency for 1 min)

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001 วันที่ 24/04/2563

สำหรับ Addition test ให้ดำเนินการดังหัวข้อตามตารางต่อไปนี้

T8	Oil dielectric strength test	IEC 60296 Table 2 และ IEC 60156 with partially spherical electrodes	วิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน IEC โดยต้องมีค่าแรงดันเบรกดาวน ≥ 30 kV สำหรับน้ำมันใหม่ (drain จากหม้อแปลง)
T9	Dry film thickness test	ISO 12944-5 และ ภาคผนวก ข	วิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ISO และประเมินตามภาคผนวก ข โดยการวัดค่า ความหนาผิวภายนอกให้วัดทุกด้านของตัว หม้อแปลง ยกเว้นด้านล่าง โดย หม้อแปลง 1 เฟส : ทุกจุดที่ตรวจสอบต้องมี ความหนาไม่ต่ำกว่า $200\ \mu\text{m}$ หม้อแปลง 3 เฟส : ทุกจุดที่ตรวจสอบต้องมี ความหนาไม่ต่ำกว่า $160\ \mu\text{m}$
T10	Bushing Clearance (a) Between HV to HV (b) Between HV to Earth	PEA RTRN-047-2561 และ RTRN-035-2561	ตรวจสอบตามข้อกำหนดของ กฟภ. - At least 225 mm for 22 kV system - At least 320 mm for 19/33 kV system

หมายเหตุ:

1. สำหรับการทดสอบ Group T1 - T3 (Routine test) ให้ดำเนินการที่หน่วยทดสอบของโรงงานผู้ผลิต
2. สำหรับการทดสอบ Group T4 - T7 (Type test) ให้ดำเนินการที่หน่วยทดสอบที่ กฟภ. ยอมรับ
3. สำหรับการทดสอบ Group T8 - T10 (Addition test) ให้ดำเนินการที่หน่วยทดสอบของโรงงานผู้ผลิต
4. หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตัวอย่างจะต้องผ่านการตรวจสอบและทดสอบตาม Group T1-T10 ทุกรายการตามภาคผนวก ข

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No. PEA-TRAN-001
		วันที่ 24/04/2563

7. การยอมรับผลตรวจสอบและ/หรือทดสอบ ที่ดำเนินการโดย

- 7.1 หน่วยงานบุคคลที่สามที่ได้รับการแต่งตั้งและขึ้นทะเบียนจาก กฟภ. และ/หรือ หน่วยรับรอง โดยต้องได้รับการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการทดสอบ มอก. 17025 หรือ ISO/IEC 17025 ในขอบข่ายและตามหลักเกณฑ์ที่ กฟภ. และ/หรือ หน่วยรับรอง กำหนด หรือ
- 7.2 หน่วยงานบุคคลที่สามที่ได้รับการแต่งตั้งและขึ้นทะเบียนจาก กฟภ. และ/หรือ หน่วยรับรอง โดยผ่านการตรวจประเมินและรับรองความสามารถของห้องปฏิบัติการตามหลักการของ มอก. 17025 หรือ ISO/IEC 17025 ในขอบข่าย และเป็นไปตามหลักเกณฑ์ที่ กฟภ. และ/หรือ หน่วยรับรอง กำหนด หรือ
- 7.3 หน่วยงานภายในโรงงานที่ได้รับการแต่งตั้งและขึ้นทะเบียนจาก กฟภ. และ/หรือ หน่วยรับรอง โดยผ่านการตรวจประเมินและรับรองความสามารถของห้องปฏิบัติการตามหลักการของ มอก. 17025 หรือ ISO/IEC 17025 หรือได้รับการรับรองความสามารถของห้องปฏิบัติการตาม มอก. 17025 หรือ ISO/IEC 17025 ในขอบข่ายและเป็นไปตามหลักเกณฑ์ที่ กฟภ. และ/หรือ หน่วยรับรอง กำหนด หรือ
- 7.4 ห้องปฏิบัติการสำหรับการทดสอบในรายการเฉพาะที่ได้รับการแต่งตั้งและขึ้นทะเบียนจาก กฟภ. และ/หรือ หน่วยรับรอง โดยผ่านการตรวจประเมินและรับรองความสามารถของห้องปฏิบัติการตามหลักการของ มอก. 17025 หรือ ISO/IEC 17025 ในบางรายการ ที่อยู่ในขอบข่ายและเป็นไปตามหลักเกณฑ์ที่ กฟภ. และ/หรือ หน่วยรับรอง กำหนด หรือ
- 7.5 หน่วยงานหรือห้องปฏิบัติการทดสอบที่ กฟภ. และ/หรือ หน่วยรับรอง ให้การยอมรับ ตามเกณฑ์ที่ กฟภ. และ/หรือ หน่วยรับรองกำหนด

หมายเหตุ: หน่วยรับรองจะยอมรับผลการตรวจสอบและ/หรือทดสอบ จากห้องปฏิบัติการทดสอบเฉพาะที่ไม่สามารถแต่งตั้งหรือขึ้นทะเบียน หรือไม่มีหน่วยงานที่ได้รับการรับรองความสามารถตาม มอก. 17025 หรือ ISO/IEC 17025 เท่านั้น

8. ใบรับรอง และข้อตกลงในการรับรองผลิตภัณฑ์

- 8.1 ให้เป็นตามที่กำหนดตามหลักเกณฑ์การขึ้นทะเบียนและรับรองผลิตภัณฑ์ รหัส PEA-PC-001 ข้อ 5.4 และ ข้อ 5.5 รวมถึงเงื่อนไขที่ระบุไว้ในเอกสารรับคำขอ เอกสารหรือใบรับรองผลิตภัณฑ์ และอื่นๆที่เกี่ยวข้อง
- 8.2 ผู้ยื่นและผู้ได้รับการรับรอง ต้องปฏิบัติตามข้อตกลงที่ได้กำหนดไว้ในเอกสารหรือแบบคำขอรับรองผลิตภัณฑ์ และข้อตกลงในการรับรองผลิตภัณฑ์ที่ได้ลงนามยอมรับกับหน่วยรับรองอย่างสม่ำเสมอ หากหน่วยรับรองพบว่าผู้ยื่นหรือผู้ได้รับการรับรองฝ่าฝืน ไม่ปฏิบัติตาม หรือละเมิดข้อตกลง หน่วยรับรองสามารถพิจารณาเพิกถอนหรือยกเลิกการรับรองผลิตภัณฑ์ได้ตามความเหมาะสม

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No. PEA-TRAN-001
		วันที่ 24/04/2563

9. ข้อกำหนดเพิ่มเติมสำหรับผู้ได้รับการรับรองและขึ้นทะเบียน

การประเมินความสามารถผู้ได้รับการรับรองและผู้ขึ้นทะเบียน ให้เป็นไปตามแนวทาง ภาคผนวก ข ผู้ได้รับการรับรอง และ/หรือ ผู้ขึ้นทะเบียน ต้องจัดทำรายงานการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตาม ขอบข่ายที่ได้รับการรับรอง โดยระบุข้อมูลต่างๆที่สามารถสลับไปยังข้อกำหนดทางเทคนิคที่อ้างอิงตามที่ระบุไว้ในข้อ 4.3 หรือ TOR อื่นๆของ กฟภ. ได้ (ถ้าเกี่ยวข้อง) ต้องระบุถึงจำนวน และ/หรือ หน่วยงานของ กฟภ. ที่รับมอบ ที่ส่งมอบหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายให้กับ กฟภ. โดยผู้ได้รับการรับรอง และ/หรือ ผู้ขึ้นทะเบียนให้จัดทำรายงานทุกๆ 6 เดือน

10. การตรวจติดตามผล

หน่วยรับรอง จะดำเนินการตรวจติดตามผล โดยทำการ

10.1 ตรวจประเมินระบบการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ ณ สถานที่ของผู้ผลิต หรือ โรงงาน อย่างน้อย 1 ครั้งต่อปี และ

10.2 สุ่มหรือคัดเลือกหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายเพื่อทำการตรวจสอบและทดสอบอย่างน้อย 2 ครั้งต่อปี โดย

- สุ่ม/คัดเลือก หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายอย่างน้อย 1 ชุดต่อรุ่นต่อใบรับรอง จากผู้ผลิตหรือโรงงานที่ทำ เพื่อตรวจสอบและ/หรือทดสอบตามมาตรฐานและหลักเกณฑ์ต่างๆที่หน่วยรับรองกำหนด และ/หรือ
- สุ่ม/คัดเลือก หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายอย่างน้อย 1 ชุดต่อรุ่นต่อใบรับรองจากคลังพัสดุของ กฟภ. หรือจากสถานที่อื่นใดนอกเหนือจากสถานที่ของโรงงานหรือผู้ผลิต เพื่อตรวจสอบและ/หรือทดสอบตามมาตรฐานและหลักเกณฑ์ต่างๆที่หน่วยรับรองกำหนด

โดยผลของการตรวจประเมินระบบการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ การตรวจสอบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายต้องผ่านเป็นไปตามหลักเกณฑ์ฉบับนี้ และหลักเกณฑ์อื่นที่เกี่ยวข้องดังที่กำหนด

หากผลการตรวจติดตามผลสามารถแสดงได้ว่าผู้ได้รับการรับรอง รักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์ต่างๆที่กำหนดไว้ได้อย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง หน่วยรับรอง อาจพิจารณาปรับลดจำนวนครั้ง การตรวจสอบ ทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย และการตรวจประเมินระบบการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ แต่ในทางกลับกันหากผลการตรวจติดตามผลแสดงได้ว่าผู้ได้รับการรับรองไม่สามารถรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์และระบบการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์ต่างๆที่กำหนดได้อย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง หน่วยรับรอง อาจพิจารณาปรับเพิ่มจำนวนครั้งการตรวจสอบผลิตภัณฑ์และตรวจประเมินระบบการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ ตามความเหมาะสม แต่จะยังคงมีการดำเนินการอย่างน้อย 1 ครั้งในรอบการรับรองผลิตภัณฑ์

หมายเหตุ: กรณีที่ต้องมีการบรรจุ การป้องกัน และการขนย้ายใดๆ เพื่อนำไปดำเนินการตรวจสอบและทดสอบหม้อแปลงตามที่กำหนด ให้ผู้ได้รับการรับรองรับผิดชอบดำเนินการและค่าใช้จ่ายต่างๆที่เกิดขึ้น เว้นแต่ กฟภ. และ/หรือ หน่วยรับรอง กำหนดเป็นอย่างอื่น

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001
		วันที่ 24/04/2563

10.3 หน่วยรับรองจะดำเนินการตรวจสอบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่สุ่มหรือคัดเลือกตามข้อ 10.2 ของแต่ละครั้งใน หัวข้อตามตารางภาคผนวก ณ โดยหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตัวอย่างจะต้องผ่านการตรวจสอบและทดสอบตาม Group S1 – S7 ทุกรายการ ณ ห้องปฏิบัติการทดสอบที่ประกาศโดย กฟภ.

ในกรณีที่พบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่สุ่มตัวอย่างมาทำการทดสอบชุดแรก “ไม่ผ่าน” ให้ดำเนินการสุ่มตัวอย่างในคุณสมบัติขณะเดียวกันเพิ่มเติมอีกอย่างน้อย 1 ชุด เพื่อดำเนินการการตรวจสอบและทดสอบซ้ำทุกรายการดังข้างต้น

ถ้าพบว่าผลของชุดตัวอย่างที่สอง “ผ่าน” แต่ชุดตัวอย่างแรก “ไม่ผ่าน” ผู้ได้รับการรับรองต้องดำเนินการ จัดทำข้อมูลการวิเคราะห์หาสาเหตุและดำเนินการแก้ไขข้อบกพร่องโดยอ้างอิงแนวทางตามเอกสาร หลักเกณฑ์การขึ้นทะเบียนและรับรองผลิตภัณฑ์ รหัส PEA-PC-001 ข้อ 7

ถ้าผล “ไม่ผ่าน” ทั้งสองชุด หน่วยรับรองจะดำเนินการพิจารณาพักใช้หรือเพิกถอนตามภาคผนวก ณ และตามเอกสารหลักเกณฑ์การขึ้นทะเบียนและรับรองผลิตภัณฑ์ รหัส PEA-PC-001 ข้อ 8

10.4 กรณีที่ไม่สามารถสุ่มหรือคัดเลือกตัวอย่างเพื่อทำการตรวจติดตามประจำปีตามข้อ 10.2 ได้ เนื่องจาก

- ผู้ผลิต หรือ โรงงาน ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ผลิตจำนวนจำกัด หรือผลิตขึ้นมาจำนวนตามคำสั่งผลิต
- ไม่มีหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายรุ่นนั้นๆในคลังสินค้าของผู้ผลิต หรือ โรงงาน
- ผลิตตามคำสั่งผลิต ทำให้ไม่สามารถสุ่มตัวอย่างได้ เนื่องจากเป็นข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อและผู้ขาย
- เกิดจากเหตุสุดวิสัย เช่น ความเสียหายของเครื่องจักร การขาดแคลนวัตถุดิบ หรือภัยธรรมชาติ

หน่วยรับรองจะมีการร้องขอให้ผู้ได้รับการรับรองจัดเตรียมตัวอย่างหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายอย่างน้อย 1 ชุดเพื่อนำไปทำการตรวจสอบและทดสอบผลิตภัณฑ์ตามหัวข้อที่กำหนด หากหน่วยรับรอง ไม่สามารถดำเนินการสุ่มหรือคัดเลือกตัวอย่างหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายจากผู้ผลิต โรงงาน คลังพัสดุของ กฟภ. หรือจากสถานที่อื่นใดนอกเหนือจากสถานที่ของโรงงานหรือผู้ผลิต ตามหลักเกณฑ์ที่กำหนด และมีระยะเวลาเกิน 2 ปี นับตั้งแต่วันที่ให้การรับรอง หน่วยรับรองจะดำเนินการพิจารณาเพิกถอน หรือ ยกเลิก การรับรอง และดำเนินการแจ้งข้อมูลดังกล่าวต่อ กฟภ. เพื่อดำเนินการถอดรายชื่อออกจากทะเบียนของ กฟภ. ต่อไป

11. การต่ออายุใบรับรอง

ก่อนที่ใบรับรองผลิตภัณฑ์จะหมดอายุล่วงหน้าอย่างน้อย 160 วันทำการ แต่ไม่เกิน 240 วันทำการ กฟภ. และ/หรือ หน่วยรับรองจะสุ่มหรือคัดเลือกตัวอย่างหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่ได้รับการรับรองและขึ้นทะเบียน อย่างน้อย 1 ชุดตัวอย่าง มาตรวจสอบและทดสอบตามรายการหัวข้อทดสอบดังกล่าวในหัวข้อ 6.3 และ

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No. PEA-TRAN-001
		วันที่ 24/04/2563

ภาคผนวก ณ โดยผลการดำเนินการตรวจสอบและทดสอบต้องผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนดและต้องแล้วเสร็จก่อน 25 วันทำการ นับจากวันที่ใบรับรองจะหมดอายุ

หมายเหตุ: หากมีเหตุสุดวิสัย เหตุฉุกเฉินเนื่องจากสภาวะการณที่ไม่ปกติ หรือเหตุผลทางเศรษฐกิจ หรือเหตุอื่นใดที่ไม่สามารถดำเนินการได้แล้วเสร็จ ให้หน่วยรับรอง และ กฟภ. สามารถพิจารณากำหนดแนวทางเพิ่มเติมได้ตามความเหมาะสม

12. การพักใช้ หรือเพิกถอนใบรับรอง

ให้เป็นไปตามเอกสารหลักเกณฑ์การขึ้นทะเบียนและรับรองผลิตภัณฑ์ รหัส PEA-PC-001 ข้อ 8 และเอกสารหลักเกณฑ์การควบคุมผู้ได้รับการรับรองและผู้ขึ้นทะเบียน รหัส PEA-AVL-001 ข้อ 6 โดยดำเนินการ ดังต่อไปนี้

- 12.1 ผู้ได้รับการรับรองที่ถูกพักใช้ใบรับรอง เนื่องจากจากการไม่ปฏิบัติตามหลักเกณฑ์ ระเบียบ ข้อกำหนด จะถูกพักใช้ใบรับรองเป็นการชั่วคราวจนกว่าจะดำเนินการปรับปรุงแก้ไขจนเป็นที่ยอมรับจากหน่วยรับรอง ผู้ที่ถูกพักใช้ต้องแสดงหลักฐานที่ได้รับจากหน่วยรับรองต่อ กฟภ. เพื่อพิจารณาและอนุมัติรับสถานะจากการถูกพักใช้กลับมาสู่สถานะผู้ขึ้นทะเบียน

- 12.2 ผู้ได้รับการรับรองที่ถูกพักใช้ใบรับรองและไม่สามารถปฏิบัติตามหลักเกณฑ์ ระเบียบ ข้อกำหนดภายในระยะเวลาที่กำหนด จะถูกเพิกถอนใบรับรองและถอดออกจากการเป็นผู้ขึ้นทะเบียนของ กฟภ. ถ้าต้องการขึ้นทะเบียนใหม่อีกครั้ง ต้องดำเนินการปรับปรุงแก้ไขให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์ ระเบียบ ข้อกำหนด จนเป็นที่ยอมรับจากหน่วยรับรอง และเริ่มกิจกรรมขอการรับรองและขึ้นทะเบียนผลิตภัณฑ์ใหม่ ทั้งนี้หน่วยรับรองขอสงวนสิทธิ์ในการเรียกพิจารณาเอกสาร ข้อมูลประกอบต่าง ๆ ทั้งก่อนและในระหว่างการดำเนินการให้การรับรองผลิตภัณฑ์

หน่วยรับรองขอสงวนสิทธิ์ไม่รับดำเนินการให้การรับรองจนกว่าจะมั่นใจได้ว่าผู้ที่ถูกเพิกถอนใบรับรองและถูกถอดออกจากการเป็นผู้ขึ้นทะเบียนของ กฟภ. ได้ดำเนินการใดๆจนสามารถควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์ ระเบียบ ข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ กฟภ. และ/หรือหน่วยรับรองกำหนด

หมายเหตุ: กรณีที่ผู้ได้รับการขึ้นทะเบียนได้รับผลกระทบต่อนโยบายการจัดซื้อจัดจ้างต่าง ๆ ของ กฟภ. ที่กำหนด ให้เป็นไปตามภาระผูกพันตามข้อสัญญานั้น ๆ ด้วย

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001
		วันที่ 24/04/2563

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างรายการหัวข้อแสดงคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายแบบ 1 เฟส

Manufacturer's name and country of origin		
Type or Model		
Applied standard		
Rated output	kVA	
Rated frequency	Hz	
Polarity	-	
Rated primary voltage	V	
Rated secondary voltage	V	
Operation duty: continuous operation (Type DB)	Yes/No	
Max. temperature rise of winding, at full load	K	
Max. temperature rise of top oil, at full load	K	
Primary tapping: off-circuit condition	Yes/No Steps	
Number of steps of primary tapping	%	
Per cent of rated voltage of each tapping	%	
No-load current & Tolerance	% & %	
Short-circuit impedance at 75 °C & Tolerance	% & %	
Losses, for each transformer unit:		
No-load loss plus positive tolerance	W	
Load loss, plus positive tolerance, at 75 °C	W	
Efficiency in %, at 75 °C and at load:		
- 1/2 of rated power and P.F. = 1.0	%	
- 1 of rated power and P.F. = 1.0	%	
Voltage regulation at P.F. = 1.0	%	
Connection symbol	Dyn11	
Type of oil preservation system	-	

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001 วันที่ 24/04/2563

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างรายการหัวข้อแสดงคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายแบบ 1 เฟส (ต่อ)

		HV	LV
Bushings			
- Manufacturer's name	-		
- Country of origin	-		
- Applied standard	-		
- Rated current	A		
- BIL	kV, peak		
- Low-frequency dry 1-minute test voltage	kV, r.m.s.		
- Low-frequency wet 10-second test voltage	kV, r.m.s.		
- Colour of glazing	-		
- Stud thread size, Metric	-		
Winding			
- Manufacturer's name	-		
- Country of origin	-		
- Material: copper	-		
- Type of enamel or insulating material of wire	-		
- Size of wire	Yes/No		
- for HV side (diameter)	mm		
- for LV side (dimension)	mm x mm		
- Resistance per phase at 75°C	Ohm		
- Full-wave impulse withstand voltage, or BIL	kV, peak		
- Power-frequency test voltage, 1 min	kV, r.m.s.		
- Construction of winding	-		
- Current density	A/mm ²		
- Number of layer per coil	-		
- Number of turns of each coil in tap No.3	Turns		
- Number of turns of each tapping position	Turns		
- Total turns of each coil	Turns		

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001 วันที่ 24/04/2563

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างรายการหัวข้อแสดงคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายแบบ 1 เฟส (ต่อ)

Terminal connectors on HV and LV bushings		
- Manufacturer's name	-	
- For copper conductor diameter range (HV side)	mm	
- For aluminium conductor diameter range (HV side)	mm	
- For copper conductor diameter range (LV side)	mm	
- For aluminium conductor diameter range (LV side)	mm	
- Number of circuits, take-off (LV side)	Circuits	
- Terminal pads are according to PEA's Drawing	Yes/No	
Core		
- Manufacturer's name	-	
- Country of origin	-	
Method of cooling	-	
Total cooling surface	m ²	
Brand of oil used for initial filling	-	
Completely assembled transformer shall withstand, without permanent deformation, a maximum pressure of	kg/cm ²	
Colour of tank: grey (RAL 7036)		
Tank finish conforms to PEA's requirement	Yes/No	
Quantity of oil filling	liters	
Mass of core	kg	
Mass of winding	kg	
Mass of the part liftable from tank	kg	
Mass of complete transformer with oil	kg	
Terminal markings and connections conform to PEA's requirement	Yes/No	

	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001
		วันที่ 24/04/2563

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างรายการหัวข้อแสดงคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายแบบ 1 เฟส (ต่อ)

Tank Dimensions		
- Thickness of side wall	mm	
- Thickness of the top plate	mm	
- Thickness of bottom plate	mm	
Internal dimensions		
- Height	mm	
- Width	mm	
- Depth	mm	
Dimensions of transformer		
- Overall height	mm	
- Overall width	mm	
- Overall depth	mm	
- Height over cover	mm	
Total dry film thickness	μm	
Fin		
- Fin radiators or Corrugated thickness	mm	
- Dimension of each fin (L x B x T)	mm	
- Number of Fins per radiator	-	
- Total number of Fin	-	
Bushing clearance	-	
- Fill in the shortest of clearance	-	
- LV to earth	mm	
- HV to earth	mm	
- Between LV bushing	mm	
- Between HV bushing	mm	
Pressure relief valve	-	
- Manufacturer's name	-	
- Country of origin	-	
- Type or model	-	
- Operating pressure	kg/cm ²	
- Flow rate at..... kg/cm ²	cc/sec	

เอกสารนี้หากพิมพ์ออกจากเครื่องพิมพ์ถือเป็นเอกสารไม่ควบคุม

หน้า 19/39

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001 วันที่ 24/04/2563

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างรายการหัวข้อแสดงคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายแบบ 1 เฟส (ต่อ)

X/R ratio		
Rated short circuit current and withstanding duration		
- Current	kA	
- Duration	s	
Duration of overload		
- 25% overload	minutes	
- 50 % overload	minutes	
Magnetic flux density	Tesla	
Other:		

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001
		วันที่ 24/04/2563

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างรายการหัวข้อแสดงคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายแบบ 3 เฟส

Manufacturer's name and country of origin		
Type or Model		
Applied standard		
Rated power	kVA	
Rated frequency	Hz	
Rated primary voltage	V	
Rated secondary voltage	V	
Connection symbol	Dyn11	
Type of oil preservation system	-	
Operation duty: continuous operation (Type DB)	Yes/No	
Max. temperature rise of winding, at full load	K	
Max. temperature rise of top oil, at full load	K	
Primary tapping: off-circuit condition	Yes/No	
Number of steps of primary tapping	Steps	
Per cent of rated voltage of each tapping	%	
No-load current & Tolerance	% & %	
Short-circuit impedance at 75 °C & Tolerance	% & %	
Losses, for each transformer unit:		
No-load loss plus positive tolerance	W	
Load loss, plus positive tolerance, at 75 °C	W	
Efficiency in %, at 75 °C and at load:		
1/2 of rated power and P.F. = 1.0	%	
1 of rated power and P.F. = 1.0	%	
Voltage regulation at P.F. = 1.0	%	

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001
		วันที่ 24/04/2563

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างรายการหัวข้อแสดงคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายแบบ 3 เฟส (ต่อ)

Bushings		HV	LV
- Manufacturer's name	-		
- Country of origin	-		
- Applied standard	-		
- Rated current	A		
- Full-wave impulse withstand voltage, or BIL	kV, peak		
- Low-frequency dry 1-minute test voltage	kV, r.m.s.		
- Low-frequency wet 10-second test voltage	kV, r.m.s.		
- Protection class ?	-		
- Colour of glazing	-		
- Stud thread size, Metric	-		
Secondary neutral point is loaded with rated current	Yes/No		
Terminal connectors on HV and LV bushings			
- Manufacturer's name	-		
- For copper conductor diameter range (HV side)	mm		
- For aluminium conductor diameter range (HV side)	mm		
- For copper conductor diameter range (LV side)	mm		
- For aluminium conductor diameter range (LV side)	mm		
- Number of circuits, take-off (LV side)	Circuits		
- Terminal pads are according to PEA's Drawing	Yes/No		

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001 วันที่ 24/04/2563

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างรายการหัวข้อแสดงคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายแบบ 3 เฟส (ต่อ)

Winding		HV	LV
- Manufacturer's name	-		
- Country of origin	-		
- Material: copper	Yes/No		
- Type of enamel or insulating material of wire	-		
- Size of wire			
- for HV side (diameter)	mm		
- for LV side (dimension)	mm x mm		
- Resistance per phase at 75°C	Ohm		
- Full-wave impulse withstand voltage, or BIL	kV, peak		
- Power-frequency test voltage, 1 min	kV, r.m.s.		
- Construction of winding	-		
- Current density	A/mm ²		
- Number of layer per coil	-		
- Number of turns of each coil in tap No.3	Turns		
- Number of turns of each tapping position	Turns		
- Total turns of each coil	Turns		
Core			
- Manufacturer's name	-		
- Country of origin	-		
Pressure relief valve			
- Manufacturer's name	-		
- Country of origin	-		
- Type or model	-		
- Operating pressure	kg/cm ²		
- Flow rate at..... kg/cm ²	cc/sec		

	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001
		วันที่ 24/04/2563

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างรายการหัวข้อแสดงคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายแบบ 3 เฟส (ต่อ)

Method of cooling	-	
Total cooling surface	m ²	
Brand of oil used for initial filling	-	
Completely assembled transformer shall withstand, without permanent deformation, a maximum pressure of	kg/cm ²	
Colour of tank: grey (RAL 7036)	Yes/No	
Tank finish conforms to PEA's requirement	Yes/No	
Quantity of oil filling	liters	
Mass of core	kg	
Mass of winding	kg	
Mass of the part liftable from tank	kg	
Mass of complete transformer with oil	kg	
Terminal markings and connections conform to PEA's requirement	Yes/No	
Tank Dimensions		
- Thickness of side wall	mm	
- Thickness of top plate	mm	
- Thickness of bottom plate	mm	
Internal Dimensions		
- Height	mm	
- Width	mm	
- Depth	mm	
Dimensions of transformer		
- Overall height	mm	
- Overall width	mm	
- Overall depth	mm	
Height over cover	mm	
Total dry film thickness	2. µm	

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001 วันที่ 24/04/2563

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างรายการหัวข้อแสดงคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายแบบ 3 เฟส (ต่อ)

Fin		
- Fin radiators or Corrugated thickness	mm	
- Dimension of each fin (L X B X T)	mm	
Number of Fins per radiator		
- Side of tank	-	
- Front of tank	-	
- Total number off fin	-	
Bushing clearance		
- Fill in the shortest of clearance	mm	
- LV to earth	mm	
- HV to earth	mm	
- Between LV bushing	mm	
- Between HV bushing	mm	
Additional detail documents according to PEA requirement	Yes/No	
X/R ratio		
Rated short circuit current and withstanding duration		
- Current	kA	
- Duration	s	
Duration of overload		
- 25% overload	Minutes	
- 50 % overload	Minutes	
Magnetic flux density	Tesla	
Other :		

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001
		วันที่ 24/04/2563

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างรายการ The critical documents of the transformers

No.	Required documents
1	HV and LV Bushing test report
2	Dry film thickness test report
3	Routine test report
4	Short-circuit withstand test report
5	TIS 17025 or ISO/IEC 17025 accreditation certificate for the TIS 384 and/or IEC 60076 and related standard scope (if any)
6	Drawing of inside tank and overall transformer with dimensions in mm showing of particulars of normal construction details.
7	Drawing of active part(s) and cross section area of core
8	Drawing of core and coil construction
9	Drawing, with dimensions in mm, of the following accessories: HV and LV bushings, Terminal connectors on HV and LV bushings with description of materials used for the component parts, Nameplate with connection diagram, Valve (showing the internal construction), Earthing terminal connector, Bracket for surge arrester, Earthing terminal for surge arrester, Bracket for surge arrester, Lifting lug, Supporting lugs, Compression type of cable lug, Accessories according to manufacturer's design
10	Catalogues and/or drawings with details of the following accessories: Bird guard, Core, HV and LV winding, Off load tap changer, Insulation paper, Gaskets, Oil drain valve, Accessories according to manufacturer's design
11	Specification of transformer oil and test report
12	Quality management system certificate/license and quality procedure
13	Bill of material and supplier lists
14	Process flow chart or Control flowchart or the like
15	Test equipment and performance characteristic lists
16	License / Certificate / letter related to the production and/or transformer.
17	Production capacity and yield (if possible) per day/month/year
18	Manufacturing process risk analysis / FMEA /FTA or the like
19	Label and/or Marking drawing
20	Photograph of transformer or 3D or the like

เอกสารนี้หากพิมพ์ออกจากเครื่องพิมพ์ถือเป็นเอกสารไม่ควบคุม

หน้า 26/39

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001
		วันที่ 24/04/2563

ภาคผนวก ง

ตาราง Watt Losses / Percent short-circuit impedance

1. หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 1 เฟส

Transformer Rating (kVA)	Watt Losses (W)		Short-circuit impedance at 75 °C (%)
	No-load loss for system voltage of :	Load loss at 75 °C	
	22 kV and 19/33Y kV		
30	120	430	2.0

2. หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 3 เฟส

Transformer Rating (kVA)	Watt Losses (W)			Short-circuit Impedance at 75 °C (%)
	No load loss for system voltage of :		Load loss at 75 °C	
	22 kV	33 kV		
50	110	170	875	4
100	180	260	1,450	4
160	260	370	2,000	4
250	360	520	2,750	4

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001 วันที่ 24/04/2563

ภาคผนวก จ

ตาราง จ.1: Temperature rise test

Requirements for	Temperature rise limit (K)
Top oil	50
Average winding	55

ตาราง จ.2: Dielectric tests

Dielectric tests for 1 phase		
Nominal system voltage (kV, r.m.s.)	Full wave lightning impulse (kV, peak)	Power frequency for 1 min (kV, r.m.s.)
19/33 Y	170	70
22	125	50
0.48/0.24	30	10
Dielectric tests for 3 phase		
Nominal system voltage (kV, r.m.s.)	Full wave lightning impulse (kV, peak)	Power frequency for 1 min (kV, r.m.s.)
33	170	70
22	125	50
0.416/0.24	30	10

การทดสอบ Lightning impulse test

กำหนดรายละเอียดการทดสอบ lightning impulse test จากเอกสาร No. RTRN-047-2561 และเอกสาร No. RTRN-035-2561 เพิ่มเติมในหัวข้อ 1e.2.2 Test procedure of Type test and Short-circuit withstand test ข้อ (3) และหัวข้อ 1e.5 Acceptance test items and acceptance test procedures ดังต่อไปนี้

(1) Test connections: For the lightning impulse test on the LV windings ($U_m \leq 1.1$ kV), PEA will accept test connections as the following:

The impulse test is applied to all the LV terminals (including the LV neutral) connected together with the higher voltage terminals earthed.

เอกสารนี้หากพิมพ์ออกจากเครื่องพิมพ์ถือเป็นเอกสารไม่ควบคุม

หน้า 28/39

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001 วันที่ 24/04/2563

(2) Test voltage: The standard lightning-impulse voltage and tolerances shall be in accordance with the IEC 60060-1 as the table below:

ตาราง ๑.3: Tolerances for lightning impulse wave shape

Description	HV	LV
Test voltage value	125 kV, peak $\pm 3\%$ (for 22 kV system) 170 kV, peak $\pm 3\%$ (for 33 kV system)	30 kV, peak $\pm 3\%$
Front time	1.2 μs $\pm 30\%$	
Time to half-value	50 μs $\pm 20\%$	
Relative overshoot magnitude	Not exceed 10 %	

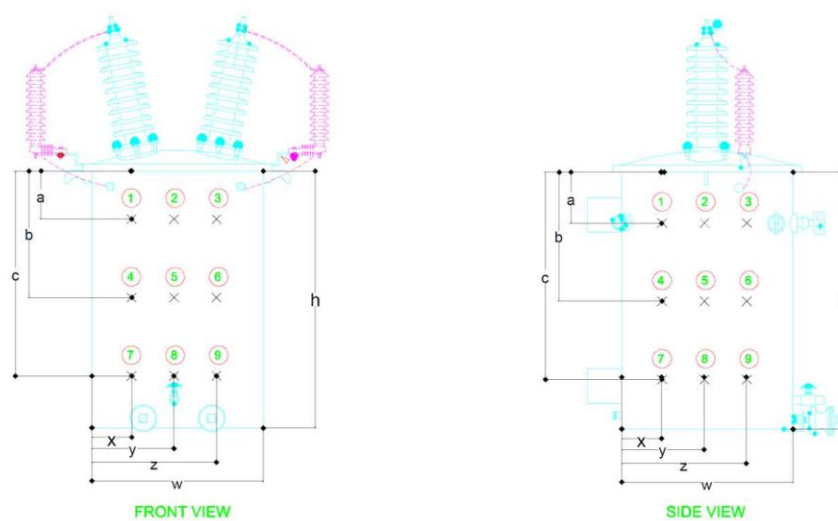
The minimum information on the wave shape in the test report shall consist of test voltage, front time (T_1), time to half-value (T_2) and overshoot.

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No. PEA-TRAN-001
		วันที่ 24/04/2563

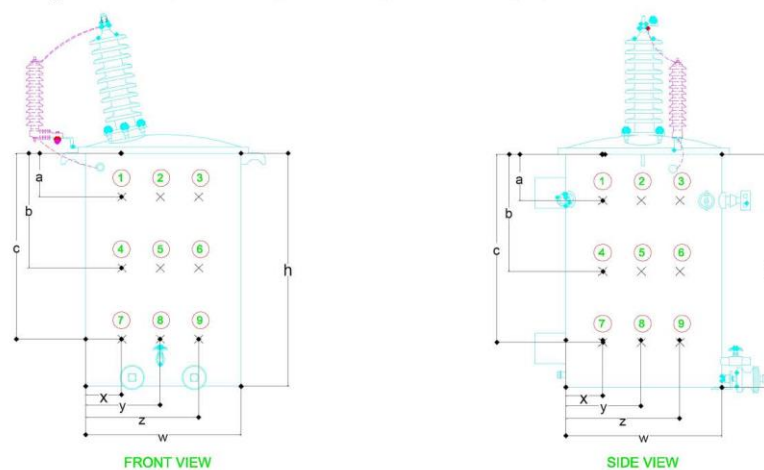
ภาคผนวก จ

ตำแหน่งและระยะ Spot checks สำหรับ Dry film thickness test

จ.1 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 1 เฟส



รูป จ.1: The position of spot checking for 22 kV single-phase transformers



รูป จ.2: The position of spot checking for 19 kV single-phase transformers

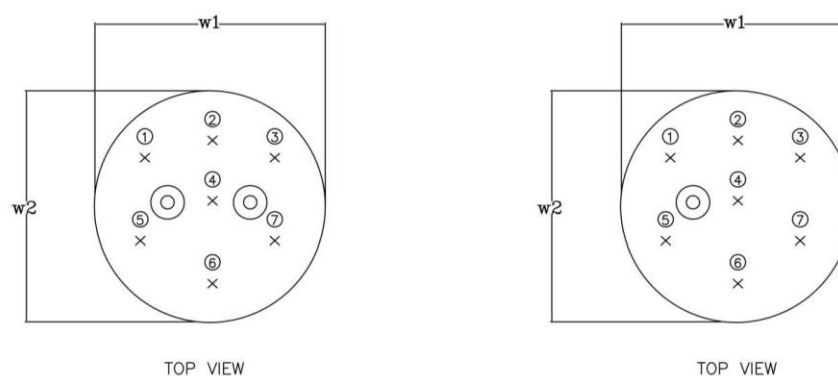
เอกสารนี้หากพิมพ์ออกจากเครื่องพิมพ์ถือเป็นเอกสารไม่ควบคุม

หน้า 30/39

	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001
		วันที่ 24/04/2563

ตาราง จ.1: Distance for spot checking at the side of single-phase transformers

Symbols	Distance	Symbols	Distance
a	About 25% of height (h)	x	About 25% of width (w)
b	About 50% of height (h)	y	About 50% of width (w)
c	About 75% of height (h)	z	About 75% of width (w)



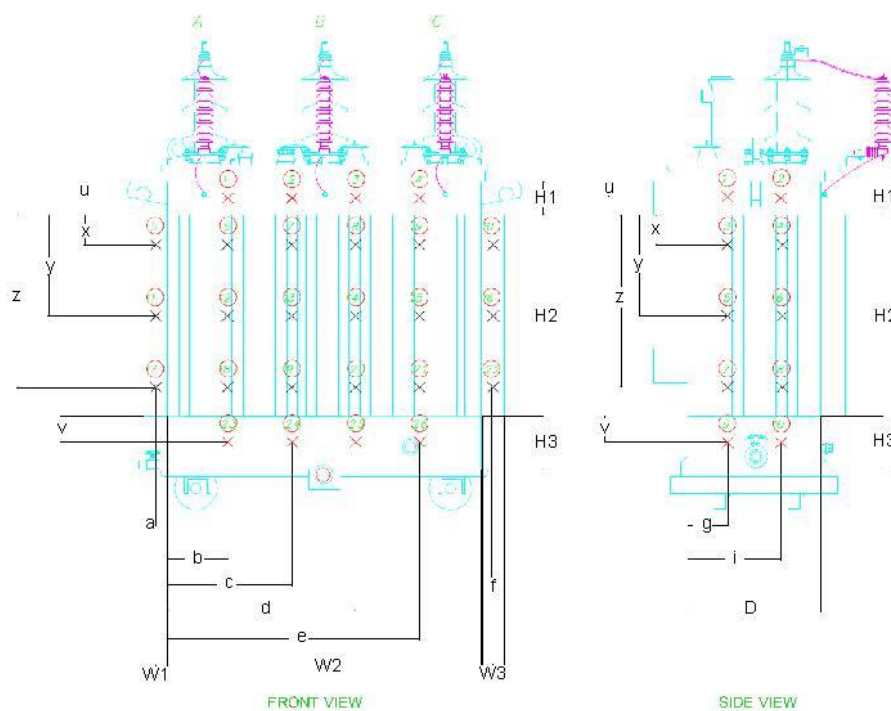
รูป จ.3: The position of spot checking for single-phase transformers

ตาราง จ.2: Distance for spot checking at the top of single-phase transformers

จุดวัดที่	ตำแหน่ง	จุดวัดที่	ตำแหน่ง
1	1/4 of $w1$ and 1/3 of $w2$	5	1/4 of $w1$ and 2/3 of $w2$
2	1/2 of $w1$ and 1/4 of $w2$	6	1/2 of $w1$ and 3/4 of $w2$
3	3/4 of $w1$ and 1/3 of $w2$	7	3/4 of $w1$ and 2/3 of $w2$
4	1/2 of $w1$ and 1/2 of $w2$		

	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001
		วันที่ 24/04/2563

จ.2 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 3 เฟส



รูป จ.4: The position of spot checking for 22 kV and 33 kV three-phase transformers

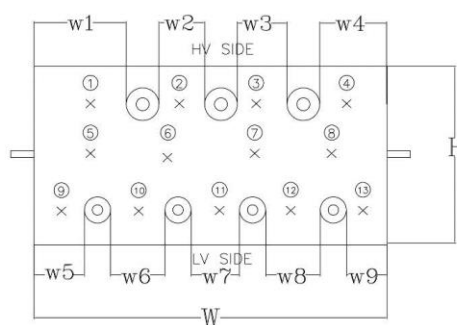
ตาราง จ.3 : Distance for spot checking at the side of three-phase transformers

Symbols	Length	Symbols	Length
a	About 1/2 of width (W1)	u	About 1/2 of height (H1)
b	About 1/5 of width (W2)	v	About 1/2 of height (H3)
c	About 2/5 of width (W2)	x	About 1/4 of height (H2)
d	About 3/5 of width (W2)	y	About 2/4 of height (H2)
e	About 4/5 of width (W2)	z	About 3/4 of height (H2)
f	About 1/2 of width (W3)		
g	About 1/3 of width (D)		
i	About 2/3 of width (D)		

เอกสารนี้หากพิมพ์ออกจากเครื่องพิมพ์ถือเป็นเอกสารไม่ควบคุม

หน้า 32/39

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001
		วันที่ 24/04/2563



TOP VIEW

รูป จ.5: The position of spot checking for three-phase transformers

ตาราง จ.4 : Distance for spot checking at the top of three-phase transformers

จุดวัดที่	ตำแหน่ง	จุดวัดที่	ตำแหน่ง
1	1/2 of w1 (ความสูงระดับเดียวกับ Bushing)	9	1/2 of w5 (ความสูงระดับเดียวกับ Bushing)
2	1/2 of w2 (ความสูงระดับเดียวกับ Bushing)	10	1/2 of w6 (ความสูงระดับเดียวกับ Bushing)
3	1/2 of w3 (ความสูงระดับเดียวกับ Bushing)	11	1/2 of w7 (ความสูงระดับเดียวกับ Bushing)
4	1/2 of w4 (ความสูงระดับเดียวกับ Bushing)	12	1/2 of w8 (ความสูงระดับเดียวกับ Bushing)
5	1/5 of W and 1/2 of H	13	1/2 of w9 (ความสูงระดับเดียวกับ Bushing)
6	2/5 of W and 1/2 of H		
7	3/5 of W and 1/2 of H		
8	4/5 of W and 1/2 of H		

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001 วันที่ 24/04/2563

ภาคผนวก ข

เกณฑ์การประเมินเพื่อการขึ้นทะเบียนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

สัดส่วนคะแนน	กรอบการให้คะแนนหลัก	สัดส่วนคะแนนย่อย	กรอบการให้คะแนนย่อย
40 %	ผลการตรวจสอบและทดสอบเป็นไปตามเกณฑ์และ/หรือมาตรฐานที่ กฟภ. และ/หรือที่หน่วยรับรอง กำหนด	40 %	ผลการตรวจสอบและทดสอบผ่านตามเกณฑ์กำหนด
		0%	ผลการตรวจสอบและทดสอบไม่ผ่านตามเกณฑ์กำหนด
35 %	ระบบควบคุมคุณภาพสินค้าและผลิตภัณฑ์สอดคล้องตามที่กำหนด	35 %	ระบบควบคุมคุณภาพ สินค้าและผลิตภัณฑ์ สอดคล้องตามที่กำหนดทุกรายการ
		1 – 34 %	เป็นไปตามสัดส่วนของการประเมินระบบควบคุมคุณภาพ
		0 %	ไม่มีระบบควบคุมคุณภาพ สินค้าและผลิตภัณฑ์ หรือระบบควบคุมคุณภาพ ไม่สอดคล้องตามที่กำหนดทุกรายการ
15 %	ห้องปฏิบัติการทดสอบ หรือ ส่วนงานที่เกี่ยวข้อง ของ ผู้ผลิต หรือ โรงงาน ได้รับการรับรองมาตรฐานระบบคุณภาพ 17025 หรือ เทียบเท่า	15 %	ได้รับการรับรองระบบ ISO/IEC 17025 ทุกรายการตามมาตรฐาน (ทุกรายการ หมายถึง การได้รับการรับรอง หัวข้อ Routine test ทุกรายการ, temperature rise และ Full wave lightning impulse test) ตามที่ กฟภ. กำหนด
		12 %	ได้รับการรับรองระบบ ISO/IEC 17025 ในรายการตามมาตรฐานในหัวข้อ Routine test ทุกรายการ และ temperature rise หรือ Full wave lightning impulse test ตามที่ กฟภ. กำหนด
		8 %	ได้รับการรับรองระบบ ISO/IEC 17025 ครบถ้วนทุกรายการของหัวข้อ Routine test ตามที่ กฟภ. กำหนด
		5 %	- ไม่ได้รับการรับรอง ISO/IEC 17025 Routine test ไม่ครบทุกรายการ หรือ temperature rise หรือ Full wave lightning impulse test หรือ - ไม่ได้ได้รับการรับรอง ISO/IEC 17025 แต่ดำเนินการสอดคล้องตามมาตรฐานระบบบริหารงานคุณภาพ และหลักเกณฑ์ที่หน่วยรับรองกำหนด ในรายการตรวจสอบและทดสอบตามที่ กฟภ. และ/หรือ หน่วยรับรองกำหนดทุกรายการ
		0 %	- ไม่ได้ได้รับการรับรอง ISO/IEC 17025 และไม่ได้ดำเนินการสอดคล้องตามมาตรฐานระบบบริหารงานคุณภาพ และหลักเกณฑ์ที่หน่วยรับรองกำหนด ในรายการตรวจสอบและทดสอบตามที่ กฟภ. และ/หรือ หน่วยรับรองกำหนด

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001 วันที่ 24/04/2563

ภาคผนวก ข

เกณฑ์การประเมินเพื่อการขึ้นทะเบียนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย (ต่อ)

สัดส่วนคะแนน	กรอบการให้คะแนนหลัก	สัดส่วนคะแนนย่อย	กรอบการให้คะแนนย่อย
10 %	มีกระบวนการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์	10 %	มีการดำเนินกิจกรรมการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์โดยใช้ทรัพยากรของผู้ผลิต และไม่มีการใช้ผู้รับจ้างช่วงในการดำเนินการใดๆ
		5 %	มีการดำเนินกิจกรรมการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์โดยใช้ทรัพยากรของผู้ผลิต และทรัพยากรร่วมกับหน่วยงานอื่น รวมถึงใช้ผู้รับจ้างช่วงในการดำเนินการใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์
		0 %	ไม่มีระบบในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ และไม่มีการดำเนินการใดๆ ที่เกี่ยวข้อง หรือได้มาซึ่งแบบของผลิตภัณฑ์จากการซื้อ เข้าได้รับมอบสิทธิ์ หรือสิทธิในการใช้ประโยชน์จากต้นแบบนั้นๆ

	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement		Document No. PEA-TRAN-001
			วันที่ 24/04/2563

ภาคผนวก ข

รายการเครื่องมือตรวจสอบและทดสอบประจำ

หัวข้อทดสอบ หม้อแปลงไฟฟ้า ระบบจำหน่าย	หมายเลข ทะเบียน (Code)	รายการ ชื่อและเครื่องหมายการค้า No. (Name/Brand)	รายละเอียดเครื่องมือ (The details of equipment)						วันที่ครบ อายุสอบ เทียบ (Cal date/ Due date)	สอบเทียบ ล่าสุด (Calibration date)	หน่วยงานที่สอบ เทียบ (Calibration provided by)
			ประเภท รุ่นแบบ (Class /Model /Type)	เลขที่รหัส (Serial no.)	ขีด ความสามารถ (Capacity)	ช่วง การใช้งาน (Range of measurement)	เกณฑ์การ ยอมรับ (Acceptance criteria)	สอบเทียบ			

- หมายเหตุ: 1. ผลการสอบเทียบเครื่องมือ ต้องทำโดยหน่วยงานที่ได้รับการรับรองตาม มอก. 17025 หรือ ISO/IEC 17025
2. เครื่องมือสำหรับการทดสอบในหัวข้อ Oil dielectric strength test ให้ทำการทดสอบระยะ มิติ และผลความถูกต้องของการวัด
3. โปรแกรมการสอบเทียบเครื่องมือประจำปี ต้องมีการทบทวนและปรับปรุงข้อมูลตามความเป็นเพื่อรักษาสถานะการสอบเทียบ
4. ค่าความแม่นยำของเครื่องมือที่กำหนดให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด และหากมาตรฐานไม่ได้กำหนดให้อย่างอิง IEEE OD-5014

	PEA Product Acceptance		Document No.
	Distribution Transformer Requirement		PEA-TRAN-001
			วันที่ 24/04/2563

ภาคผนวก ฉ
 รายการตรวจสอบและทดสอบ

No.	Test items	Testing	Sample ตัวอย่าง No.	Group		
				ขอการรับรอง		ตรวจเพื่อ คํ้าอยู่ การรับรอง
				ที่ Lab โรงงาน	ที่ Lab กฟภ. ขอนแก่น	
1	Total Weight and Dimension	Routine test	1	T1	S1	T1
2	Name plate			T2	S2	T2
3	(1) Measurement of voltage ratio and check of phase displacement			T3	S3	T3
	(2) Measurement of winding resistance					
	2.1) Single phase transformer					
	2.2) Three -phase transformer					
	(3) Applied voltage test					
	(4) Induced voltage withstand test					
	(5) Measurement of no-load loss and current at 90%, 100% and 110% of rated voltage					
	(6) Measurement of short-circuit impedance and load loss					
	(7) Leak testing with pressure					

	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No.
		PEA-TRAN-001
		วันที่ 24/04/2563

ภาคผนวก ฅ
 รายการตรวจสอบและทดสอบ (ต่อ)

No.	Test items	Testing	Sample ตัวอย่าง No.	Group			
				ขอการรับรอง		ตรวจติดตาม ที่ Lab กฟภ.ขอนแก่น	ตรวจเพื่อ ตัวอย่าง การรับรอง
				ที่ Lab โรงงาน	ที่ Lab กฟภ.ขอนแก่น		
4	Routine test No.3 except (7) (before short-circuit)	Type test	1		T4		T4
5	Temperature rise				T5	S4	T5
6	Short-circuit withstand with Full wave lightning impulse test				T6		T6
7	Routine test No.3 except (7) (after short-circuit)				T7		T7
8	Oil dielectric strength test	Addition test	1		T8	S5	T8
9	Dry film thickness test				T9	S6	T9
10	Bushing Clearance						
	(a) Between HV to HV (b) Between HV to Earth			T10		S7	T10

 PEA PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PEA Product Acceptance Distribution Transformer Requirement	Document No. PEA-TRAN-001 วันที่ 24/04/2563
--	--	---

ภาคผนวก ก

การพิจารณาข้อบกพร่องในการรับรองและการขึ้นทะเบียนหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

พิจารณาข้อบกพร่อง	แนวทางการพิจารณา
ข้อบกพร่องวิกฤต พิจารณาเพิกถอน การรับรองผลิตภัณฑ์ และการขึ้นทะเบียน	- ข้อบกพร่องที่ตรวจพบในระหว่างการรับรองผลิตภัณฑ์ทำให้ผลิตภัณฑ์ส่งผลให้ไม่เป็นไปตามหลักเกณฑ์การขึ้นทะเบียนและรับรองผลิตภัณฑ์ หลักเกณฑ์การตรวจประเมินรายผลิตภัณฑ์ และอื่นๆที่เกี่ยวข้องในการให้การรับรองผลิตภัณฑ์นำไปสู่ความไม่น่าเชื่อถือ ไม่ปลอดภัยในการใช้งาน ไม่รักษาคุณภาพอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า หรือ - ข้อบกพร่องที่ตรวจพบในระหว่างการประเมิน มีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่เป็นไปตามหลักเกณฑ์การตรวจประเมินรายผลิตภัณฑ์ ซึ่งหน่วยรับรองให้การรับรอง หรือ - ผู้ผลิต ผู้ได้รับการรับรอง และ/หรือ ผู้ที่ขึ้นทะเบียน ไม่ปฏิบัติตามหลักเกณฑ์ต่างๆที่หน่วยรับรองกำหนด ส่งผลให้การควบคุมผลิตภัณฑ์ไม่เป็นไปตามหลักเกณฑ์อย่างมีนัยสำคัญต่อ กฟผ. ยกตัวอย่าง เช่น ไม่มีประสิทธิภาพในการดำเนินการสอบเทียบ และทวนสอบความใช้ได้ของเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบตามหลักเกณฑ์การตรวจประเมินรายผลิตภัณฑ์ ไม่ดำเนินการตรวจสอบและทดสอบผลิตภัณฑ์ตามหลักเกณฑ์ฯ (กรณีขอการรับรองใหม่ หรือไม่มีการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการรับรอง) มีการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการรับรองผลิตภัณฑ์โดยไม่ได้รับการยอมรับการเปลี่ยนแปลงจากหน่วยรับรอง และ/หรือ กฟผ. และส่งผลต่อการเป็นไปตามหลักเกณฑ์ที่กำหนด เป็นต้น
ข้อบกพร่องไม่วิกฤต พิจารณาพักใช้ การรับรองผลิตภัณฑ์ และการขึ้นทะเบียน	ผู้ยื่น ผู้ได้รับการรับรอง ผู้ที่ขึ้นทะเบียน และโรงงาน ไม่ปฏิบัติตามหลักเกณฑ์ต่างๆที่ หน่วยรับรองกำหนด แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อควบคุมผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์ที่กำหนด ยกตัวอย่าง เช่น ไม่มีวิธีการปฏิบัติงาน และบันทึกผล แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบบริหารงานคุณภาพและหลักเกณฑ์ต่างๆที่กำหนด หรือ ฉลาก เครื่องหมายต่างๆบนผลิตภัณฑ์ที่การระบุไม่ครบถ้วนหรือสับสน ไม่ส่งผลกระทบต่อความเป็นไปตามหลักเกณฑ์ที่กำหนด เป็นต้น



แบบประวัติการแก้ไขหลักเกณฑ์

ชื่อเอกสาร PEA-TRAN-001 เรื่อง หลักเกณฑ์การตรวจประเมินรายผลิตภัณฑ์ของหน่วยแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

[illegible]

ภาคผนวก ข.
บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์



**SAUNIC
2022**

ประกาศนียบัตรฉบับนี้ให้ไว้เพื่อแสดงว่า

**เกรียงไกร กิจสวัสดิ์, บุญเลิศ สือเจย, อติศักดิ์ มนต์ประภัสสร,
สมมาตร ปิยะพงศ์เดชา และ มณฑล สิลาจินดาไกรฤกษ์**

ได้นำเสนอผลงานวิจัยและผลงานวิชาการในหัวข้อ

การวิเคราะห์ความสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า

ประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 9 สหวิทยาการเอเชียอาคเนย์ 2565

"การพัฒนางานวิจัยและนวัตกรรมสู่เศรษฐกิจ BCG เพื่อความยั่งยืน" (Development of Research and Innovation to BCG Economy for Sustainability)
ในวันศุกร์ที่ 24 – วันเสาร์ที่ 25 มิถุนายน 2565 ณ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

นิพนธ์ ฟูเนอ

(ดร.ฉัททวุฒิ พิษชล)

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์



PP. No. 113



รายงานสืบเนื่อง การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 9 สหวิทยาการเอเชียอาคเนย์ 2565

The 9th SAU National Interdisciplinary Conference 2022



"การพัฒนางานวิจัยและนวัตกรรมสู่เศรษฐกิจ BCG เพื่อความยั่งยืน"

(Development of Research and Innovation to BCG Economy for Sustainability)

ในวันศุกร์ที่ 24 - วันเสาร์ที่ 25 มิถุนายน 2565

ณ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์



บริษัท คันโซ 1980 เอ็นจิเนียริง จำกัด (ผู้สนับสนุน)
Kansai 1980 Engineering Co., Ltd.



<http://saunic2022.sau.ac.th>



**SAUNIC
2022**



ร่วมกับ สวทช. NSTDA



สารบัญบทความ (ต่อ)

เลขที่บทความ / ชื่อเรื่อง / ผู้แต่ง	หน้าที่
107 การบำบัดน้ำเสียโดยการกระจายน้ำเสียนดินบนพื้นที่การเพาะปลูก ภาณุวัฒน์ แดระกุล, วฐา ยงสมิทธิ์ และ ณัฐพล พุฒยางกูร	290 - 297
108 การเปรียบเทียบต้นทุน เวลา และคุณภาพระหว่างวิธีการใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูป กับวิธีหล่อในที่ของโครงสร้างหลักในการก่อสร้างบ้านเดี่ยว วรเทพ วโรตมะกุล และ สุรศักดิ์ คลังสุภาวิวัฒน์	298 - 305
109 การสำรวจความคิดเห็นเพื่อการพัฒนาสิ่งอำนวยความสะดวกบนสะพานลอยคนข้าม กรณีศึกษา : สะพานลอยคนข้ามหน้ามหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์ ปราโมทย์ หาปัญญา และ สุรศักดิ์ คลังสุภาวิวัฒน์	306 - 312
112 การเปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มเจาะระบบเปียก ด้วยวิธีทดสอบแบบพลศาสตร์และทฤษฎีทางสถิติศาสตร์ วรารธร แก้วแสง	313 - 320
113 การวิเคราะห์ความสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า เกรียงไกร กิจสวัสดิ์, บุญเลิศ สื่อเฉย, อติศักดิ์ มนต์ประภัสสร, สมมาตร ปิยะพงศ์เดชา และ มณฑล สีสัจจินดาไกร ฤกษ์	321 - 328
114 เครื่องลดความชื้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก ณรงค์ฤทธิ์ ยางสวย, บุญเลิศ สื่อเฉย, นกุล สุวรรณชาติ และ ศุภี บรรจงจิตร	329 - 335
115 สถานที่อยู่อาศัยจากกล้องจากก๊าซแอลพีจีกับก๊าซไนโตรเจน สมยศ เสาะหาอึ้ง	336 - 341



การวิเคราะห์ความสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า Analysis of Losses Per Cooling Surface Area of Transformer

เกรียงไกร กิจสวัสดิ์^{1*}, บุญเลิศ สือเฉย², อติศักดิ์ มนต์ประภัสสร³
สมมาตร ปิยะพงศ์เดชา⁴ และมณฑล สีสัจจินดาไกรฤกษ์⁵

^{1,2,3} สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

⁴ สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
19/1 ถนนเพชรเกษม แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160

⁵ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
*ติดต่อ: E-mail: s6344010004@sau.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์ความสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อนำข้อมูลไปใช้อ้างอิงในการออกแบบหม้อแปลงให้มีอุณหภูมิเป็นไปตามข้อกำหนด โดยทำการทดสอบหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่าย 160 kVA 3 ph 50 Hz 22000-416/240 V Dyn 11 ตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การทดสอบทำโดยจ่ายโหลดให้กับหม้อแปลงที่ 0-100% แล้วทำการบันทึกค่าความสูญเสีย อุณหภูมิของน้ำมันด้านบน แล้วทำการหาค่าความสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อนเทียบกับอุณหภูมิ ผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้อ้างอิงในการออกแบบพื้นที่ผิวการระบายความร้อนเพื่อให้หม้อแปลงมีการระบายความร้อนที่ดี มีอุณหภูมิเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

คำหลัก : หม้อแปลงไฟฟ้า พื้นที่ผิวการระบายความร้อน ความสูญเสียของหม้อแปลง

Abstract

This research presents the results of the loss analysis on the cooling surface area of the transformer. To use the information as a reference in the design of transformers to meet the temperature requirements. The transformer used in distribution system 160 kVA 3 ph 50 Hz 22000-416/240 V Dyn 11 was tested according to the Provincial Electricity Authority standard. The test is performed by supplying the load to the transformer at 0-100% and recording the losses. Top oil temperature then, The loss per cooling surface area compared to the temperature was determined. The results of this research can be used as a reference for the design of the cooling surface area for the transformer to have good heat dissipation. The temperature is in accordance with the specified standards.

Keywords: Transformer, Cooling Surface, Transformer Losses



**SAUNIC
2022**



ร่วมกับ สวทช. NSTDA



1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้า นับเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าที่ดีจะต้องมีเสถียรภาพและความปลอดภัยสูง ดังนั้นถ้าผู้ผลิตสามารถออกแบบและผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีคุณสมบัติที่ดีทนต่อสภาวะการใช้งานตามมาตรฐานที่กำหนด ก็จะสามารถช่วยให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพและเกิดความมั่นคงต่อระบบไฟฟ้ามากขึ้น ประกอบกับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ทำการปรับปรุงแก้ไขคุณสมบัติ (Specification) ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่าย ให้สามารถทนกระแสลัดวงจรได้ตามที่มาตรฐานกำหนด [00] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอผลการทดสอบและวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของหม้อแปลง เพื่อนำผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการออกแบบพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของหม้อแปลงปรับปรุงและพัฒนาการออกแบบให้หม้อแปลงใช้งานได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. นำเสนอวิธีการทดสอบและแสดงผลการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่ายตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคขณะจ่ายโหลดที่ปกติ
2. ทำการคำนวณหาความสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อน เพื่อให้ได้อุณหภูมิเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด
3. นำผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง ในการออกแบบพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของหม้อแปลง ปรับปรุงและพัฒนาการออกแบบให้หม้อแปลงใช้งานได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การทดสอบประจำ (Routine Test)

การทดสอบประจำนี้ หม้อแปลงจำหน่ายที่ผลิตหรือสร้างขึ้นจะต้องผ่านการทดสอบประจำทุกเครื่อง

ลักษณะของการทดสอบให้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temperature) ระหว่าง 10 - 40 °C ผลของการทดสอบให้ปรับผลการทดสอบไปที่อุณหภูมิอ้างอิงดังตารางที่ 1 [1]

ตารางที่ 1 อุณหภูมิอ้างอิงของการปรับผลการทดสอบ

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

3.2 ขีดจำกัดของอุณหภูมิเพิ่ม

(Limits of Temperature Rise) [2]

ตามมาตรฐาน IEC 60076-2 ได้กำหนดขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงที่ระบายความร้อนด้วยน้ำมันโดยอากาศธรรมชาติ (Oil-Immersed Self-Cooled Transformer) หรือด้วย ONAN โดยกำหนดให้อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temperature) สูงสุดเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส สถานที่ติดตั้งใช้งานไม่เกิน 1000 เมตร เหนือระดับน้ำทะเล กรณีที่สถานที่ติดตั้งใช้งานสูงเกิน 1000 เมตร เหนือระดับน้ำทะเล อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยจะลดลง 1 องศาเซลเซียสต่อระยะความสูงทุกๆ 400 เมตร สำหรับแกนเหล็กและชิ้นส่วนอื่นๆ อุณหภูมิต้องไม่สูงถึงค่าที่จะทำให้แกนเหล็กหรือส่วนที่ติดกันเสียหายได้

ตารางที่ 2 ขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงชนิดจุ่มน้ำมัน

	อุณหภูมิเพิ่ม (K)
น้ำมันส่วนบน (Top Oil)	ไม่เกิน 60
ขดลวด	ไม่เกิน 65

3.3 ขีดจำกัดของอุณหภูมิเพิ่มตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [3]

ตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้กำหนด



SAUNIC
2022



ร่วมกับ สถาบัน NSTDA



ขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่าย โดยกำหนดให้อุณหภูมิแวดล้อม(Ambient Temperature) เฉลี่ย 40 องศาเซลเซียส สูงสุดเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส สถานที่ติดตั้งใช้งานไม่เกิน 1000 เมตร เหนือระดับน้ำทะเล

ตารางที่ 3 ขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน PEA

	อุณหภูมิเพิ่ม (K)
น้ำมันส่วนบน (Top Oil)	ไม่เกิน 50
ขดลวด	ไม่เกิน 55

3.4 การคำนวณอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลง

ในการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงจำหน่าย สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้[4, 5]

1. อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด (Average winding temperature rise) สามารถหาได้จากสมการ

$$\Theta_{wr} = \Theta_{w2} - \Theta_a \quad (1)$$

$$\Theta_{w2} = \frac{R_{t2}}{R_{t1}} (k + \Theta_{w1}) - k \quad (2)$$

โดยที่

Θ_{wr} คือ อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด, °C

Θ_a คือ อุณหภูมิแวดล้อม, °C

Θ_{w2} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่จุดตัดไฟ, °C

Θ_{w1} คือ อุณหภูมิแวดล้อมขณะวัดความต้านทานขดลวดที่จุดเริ่มต้น, °C

R_{t1} คือ ความต้านทานขดลวดที่อุณหภูมิแวดล้อม, Ω

R_{t2} คือ ความต้านทานของขดลวดที่จุดตัดไฟ, Ω

k คือ 234.5 สำหรับทองแดง และ 224.5 สำหรับอลูมิเนียม

2. อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด (Top oil temperature rise at rated load, Θ_{or}), สามารถหาได้จากสมการ

$$\Theta_{or} = \Theta_o - \Theta_a \quad (3)$$

โดยที่

Θ_{or} คือ อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน, °C

Θ_o คือ อุณหภูมิของน้ำมันด้านบน, °C

3.5 การระบายความร้อนของหม้อแปลง [1,6,7]

การสูญเสีย (Losses) พลังงานไฟฟ้าต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงเช่น การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) การสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper Loss) และในส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงในขณะที่จ่ายโหลดอยู่ พลังงานสูญเสียทั้งหมดจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของวัสดุมีโอกาสมากกว่าจุดสูงสุดที่วัสดุนั้นจะทนได้ และทำลายฉนวนของหม้อแปลงในที่สุด ทำให้หม้อแปลงใช้งานไม่ได้ (Failure) ดังนั้นการระบายความร้อนของหม้อแปลงจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง การระบายความร้อน ถ้ากระทำถูกวิธีจะสามารถเพิ่มอัตรากำลัง(Rating) ของหม้อแปลงได้โดยขนาดเท่าเดิมหรืออาจลดขนาด(กว้าง, ยาว, สูง) ของหม้อแปลงได้โดยที่ขนาดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงยังคงเดิม โดยธรรมชาติแล้วความร้อนจะระบายออก(Dissipate)ตามผิวของวัตถุ (Material) ด้วยวิธีการแผ่รังสี(Radiation) และวิธีการนำพา(Convection) ในหม้อแปลงนั้นการระบายความร้อนจะใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับขนาดทั้งรูปร่างและอัตรากำลังของหม้อแปลงที่ใช้ หม้อแปลงก่อนที่จะถูกนำไปใช้งานนั้นอุณหภูมิภายในหม้อแปลงเท่ากับอุณหภูมิรอบ ๆ ภายนอก (Ambient Temperature) หลังจากทีหม้อแปลงจ่ายโหลด อุณหภูมิภายในหม้อแปลงโดยเฉพาะส่วนที่มีกระแสไหล(Active Component) จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะถ่ายเทความร้อนให้แก่วัสดุหรืออากาศรอบ ๆ ทำให้มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดๆ หนึ่งก็จะไม่เพิ่มขึ้นอีก แสดง



SAUNIC
2022



สวทช. NSTDA



ว่าความร้อนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีกระแสไหลผ่าน จะเท่ากับความร้อนที่ระบายออกผลก็คือ อุณหภูมิคงที่

3.6 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

ความร้อนในหม้อแปลงชนิดแช่น้ำมันมีระบบถ่ายเทความร้อน 2 ขั้นตอนคือ

1. ระบบความร้อนของแกนเหล็กและขดลวดถ่ายเทสู่น้ำมัน

2. ระบบความร้อนของน้ำมันถ่ายเทสู่อากาศ โดยความร้อนจะถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง หรือ ทั้ง 3 วิธีดังต่อไปนี้

- วิธีการนำความร้อน (Conduction)
- วิธีการแผ่รังสีความร้อน (Radiation)
- วิธีการพาความร้อน (Convection)

เมื่อพิจารณาถึงวิธีการถ่ายเทความร้อนจากขดลวดของหม้อแปลงไปสู่บรรยากาศแวดล้อม การถ่ายเทความร้อนแต่ละวิธีจะถูกปฏิบัติแยกจากกัน โดยการนำความร้อนมีความสำคัญน้อยที่สุด และการพาความร้อนมีความสำคัญมากที่สุด ดังนั้นการออกแบบการระบายความร้อนของหม้อแปลง จึงพิจารณาเฉพาะการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเท่านั้น

3.7 การแผ่รังสีความร้อน

การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการแผ่รังสีความร้อนเกิดขึ้นเพราะทุกส่วนของวัตถุที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเหนืออุณหภูมิแวดล้อม จะแผ่พลังงานความร้อนมาในรูปของคลื่น (Waves) พลังงานความร้อนสูงสุดที่ถูกแผ่ออกมาที่อุณหภูมิหนึ่ง จะเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นหนึ่ง แต่หากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจุดของพลังงานความร้อนสูงสุดจะเลื่อนไปในช่วงความยาวคลื่นที่สั้นกว่า โดยทั่วไปพื้นที่ของพลังงานความร้อนสูงสุดมักอยู่ในช่วงอินฟราเรด (Infrared Spectrum) พื้นที่สำหรับการแผ่รังสีความร้อนที่มีประสิทธิภาพคือ พื้นผิวภายนอกที่ห่อหุ้มด้วยวัสดุ พื้นผิวที่แผ่รังสีความร้อนได้จริงคือ ผลคูณของความสูงและความยาวของถังผิวเรียบ (Plain Tank) ที่ห่อหุ้มหม้อแปลง อย่างไรก็ตามสีของพื้นผิวซึ่งมีแฟคเตอร์ของการแผ่รังสี (Emissivity Factor) ถ้าพื้นผิวมีสีดำสนิทจะมีแฟคเตอร์

ของการแผ่รังสีเท่ากับ 1 แต่ถ้าแฟคเตอร์ของการแผ่รังสีน้อยกว่า 1 ประสิทธิภาพของการแผ่รังสีความร้อนจะมีค่าลดลงเท่ากับพื้นที่ผิวที่ห่อหุ้มด้วยแฟคเตอร์ของการแผ่รังสี การแผ่รังสีของสีที่ใช้ในทางปฏิบัติส่วนมากจะมีค่าใกล้เคียงกับ 1 โดยทั่วไปประมาณ 0.90-0.95 เช่น สีเขียวหรือสีเทาเป็นต้น การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการแผ่รังสีความร้อนสามารถเขียนเป็นสมการโดยกฎของสเตฟานโบลซ์มานน์ (Stefan Boltzman Law) ได้ดังนี้

$$W_{\text{rad}} = 5.7 \times 10^{-8} \times E(T_2 - T_1) \quad (4)$$

โดยที่

W_{rad} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียวัดต่อตารางเมตรของพื้นผิว

E คือ แฟคเตอร์ของการแผ่รังสี (0.90-0.95)

T_1 คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของบรรยากาศแวดล้อม (°C)

T_2 คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัสดุส่วนที่ร้อน (°C)

3.8 การพาความร้อน

เมื่อนำวัสดุที่ร้อนจุ่มลงไปในของไหล ความร้อนของวัตถุจะถูกพาออกจากพื้นผิวของวัตถุไปสู่ตัวกลางที่เย็นกว่าวัตถุนั้น การเพิ่มอุณหภูมิในของไหลจะทำให้ความหนาแน่นของตัวกลางลดลง ดังนั้นจะทำให้เกิดขบวนการไหลเวียนของของไหล โดยของไหลที่เบากว่าจะจากไปและจะมีของไหลที่หนักกว่ามาแทนที่ ขบวนการไหลเวียนของของไหลจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ความร้อนที่ถูกถ่ายเทโดยการพาความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$W_{\text{con}} = K\theta_c n \quad (5)$$

โดยที่

W_{con} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียวัดต่อตารางเมตร

K คือ ค่าคงที่

θ_c คือ อุณหภูมิเพิ่ม (°C)

n คือ ค่ายกกำลังประมาณ 1.0-1.25 ขึ้นอยู่กับรูปร่างและพื้นผิวของวัตถุที่จะระบายความร้อนสำหรับถังผิวเรียบ



SAUNIC
2022



สํานักงาน
ASTDA



อยู่ในอากาศที่มีความสูงประมาณ 60 ซม. ขึ้นไป และมีอุณหภูมิเพิ่มถึง 75 องศาเซลเซียส ที่ระดับน้ำทะเลจะมีค่าคงที่ต่าง ๆ ดังนี้

$$K = 2.17$$

$$n = 1.25$$

การสูญเสียที่ทำให้เกิดอุณหภูมิเพิ่ม มีการเปลี่ยนแปลงตามรากที่สองของความหนาแน่นของอากาศ สำหรับพื้นที่ผิวของถังหม้อแปลงที่มีการติดครีระบายความร้อน ซึ่งต้องมีความต้านทานของการไหลของอากาศ จึงจำเป็นต้องมีค่าแฟคเตอร์แก้ไขคือ แฟคเตอร์ความเสียดทานของอากาศ (Air Friction Factor) ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับลักษณะของครีระบายความร้อน ดังนั้นแฟคเตอร์นี้จะต้องหาค่าโดยการทดลอง

$$W_{con} = 2.17 F_a \theta_c^{1.25} \quad (6)$$

โดยที่

F_a คือ แฟคเตอร์ความเสียดทานของอากาศ

P คือ ความกดดันของบรรยากาศ (ที่ระดับน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ 1)

3.9 การถ่ายเทความร้อนร่วมของการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อน

ผลรวมของการถ่ายเทความร้อน จากถังหม้อแปลงพื้นผิวแนวตั้งเรียบสามารถรวมเป็นสมการดังนี้

$$W = 5.7 \times 10^{-8} E (T_2 - T_1) + 2.17 F_a \theta_c^{1.25} \quad (7)$$

ในทางปฏิบัติพื้นที่ผิวของตัวถังหม้อแปลงอาจจะไม่สามารถระบายความร้อนออกสู่อากาศเพื่อให้อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะใช้งานมีค่าไม่สูงเกินกว่าข้อกำหนดได้ ดังนั้นผู้ออกแบบจึงต้องทำการออกแบบให้หม้อแปลงมีพื้นที่ผิวในการระบายความร้อนได้อย่างเพียงพอโดยทำการติดตั้งครีระบายความร้อนที่ด้านข้างของตัวถังหม้อแปลงเพื่อช่วยในการระบายความร้อน พื้นที่ผิวของการระบายความร้อนหาได้จากสมการ

$$A_R = W_t / W_k \quad (8)$$

โดยที่

A_R คือ พื้นที่ผิวของการระบายความร้อน (วัดต่อตารางเมตร)

W_t คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของหม้อแปลง (วัตต์)

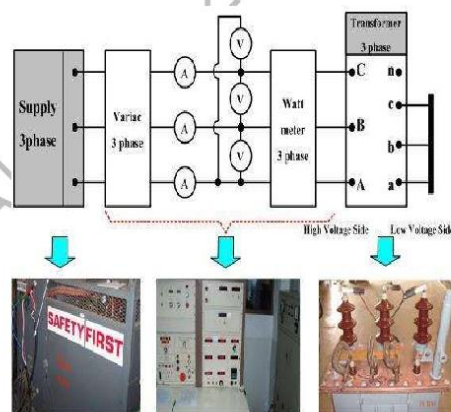
W_k คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อน (วัดต่อตารางเมตร)

4. การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่าย

ในการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายสามารถทำได้ดังนี้[8-10]

4.1 หม้อแปลงที่นำมาทำการทดสอบ เป็นหม้อแปลงชนิดจุ่มในน้ำมันที่ใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคขนาด 160 kVA 3ph 50Hz 22000-416/240V Dyn 11 : Class A

4.2 การทดสอบจะทำการป้อนแรงดันด้านแรงสูงให้มีกระแสไหลตั้งแต่ 0-100% ของกระแสที่พิกัด แล้วทำการบันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน วงจรที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงโดยวิธี
ลัดวงจร



**SAUNIC
2022**



Source: NSTDA



เอกสารอ้างอิง

- [1] บุญเลิศ สื่อเฉย การออกแบบและการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่าย พิมพ์ครั้งที่ 8 สาโรงปรินต์ 2562.
- [2] IEC 60076-2, 2011. Power Transformer Part 2 : Temperature Rise.
- [3] Provincial Electricity Authority Thailand. 2019. Three-Phase Transformer for 22 kV and 33 kV Distribution Systems with Ability to Withstand Short Circuit. Specification No.RTRN-035/2561.
- [4] ANSI/IEEE. C57.91-2010. IEEE Guide for Loading Mineral Oil-Immersed Overhead and Pad Mounted Distribution Transformer Rated 500 kVA and Less with 65 °C or 55 °C Average Winding Rise.
- [5] IEC354, 2006. Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformer.
- [6] ANSI/IEEE. C57.12.00-2010. An American National Standard IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers.
- [7] Bharat Heavy Electrical Limited. 2003. Transformer. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2nd Edition.
- [8] B.Suechoey, and M.Leelajindakraierk. 2014. "Proposition of Individual Guide for Distribution Transformer Design to Withstand Short Circuit Condition." International Conference on Electrical Engineering (ICEE 2014). Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju, Korea.
- [9] B. Suechoey, W. Tangsrianukul, M. Leelajindakraierk, and C. Chompoo inwai. (July 5-9, 2015). Novel techniques for improving short circuit withstand capability of distribution transformer considering short circuit force and winding temperature. *Proceedings of the 21th ICEE International Conference on Electrical Engineering*. The University of Hong Kong. Hong Kong. 1-4.
- [10] B. Suechoey, J. Boonseng, and C. Chompoo inwai, (2018). "Analysis of Winding Temperature and Design of Distribution Transformer for Improving Short Circuit Withstand Capability under Renewable Generations Mixed Environment", *International Journal of Intelligent Engineering and Systems (IJIES2018)*, 11, 6, 11 – 20.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายเกรียงไกร กิจสวัสดิ์
 วัน เดือน ปีเกิด 28 กันยายน 2525 จังหวัดนครปฐม
 ที่อยู่ปัจจุบัน 34/4 ม.4 ต.ท่าข้าม อ.สามพราน จ.นครปฐม 73110
 โทร. 084-8462967
 การศึกษา 2560 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

ประสบการณ์ทำงาน

พ.ศ. 2553 – ปัจจุบัน บริษัท ทองไทย เอ็นจิเนียริง (1992) จำกัด

ความชำนาญเฉพาะด้าน

1. ออกแบบ วางระบบไฟฟ้ากำลัง
2. ทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์

ผลงานทางวิชาการขณะศึกษา

1. เกรียงไกร กิจสวัสดิ์, บุญเลิศ สี่อเนย, อติศักดิ์ มนต์ประภัสสร, สมมาตร ปิยะพงศ์เดชา, มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ “การวิเคราะห์ความสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า” การประชุมวิชาการระดับชาติสหวิทยาการเอเชียอาคเนย์ 2565 ครั้งที่ 9, 24-25 มิถุนายน 2565, หน้า 321-328.